
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

HERMETİK TİP BİRLEŞİK GAZ YAKICI CİHAZLARDA HİDROJEN YAKITININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Mert ÖKTEN

DOKTORA TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mert ÖKTEN

02/12/2024

HERMETİK TİP BİRLEŞİK GAZ YAKICI CİHAZLARDA HİDROJEN YAKITININ KULLANILABİLİRLİĞİNİN SAYISAL VE DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Mert ÖKTEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2024

ÖZET

Bu çalışmada, doğal gaz-hidrojen yakıt karışımının yanmasının ev tipi kombi brülöründe herhangi fiziksel değişime ve performans kaybına neden olmadan kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmış ve sayısal olarak modellenmiştir. Çalışma iki aşamadan meydana gelmektedir. Birinci aşamada hidrojen yakıt ilaveli ve hidrojen yakıt destekli doğal gaz yakıt karışımı, kondenzasyonlu hermetik tip kombide deneysel olarak yakılmıştır. İkinci aşamada ise bir HAD programında modellenmiştir. Hidrojen yakıt ilaveli doğal gaz yanmasında metan miktarı 20 Sl/dk değerinde sabit tutulmuş, oluşturulan yakıt karışımında hidrojen, hacimce %0 ile %75 arasında %5'erlik artışlarla eklenmiştir. Yanma odasında en üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktasından alınan alev sıcaklığı ölçümlerinde %0 H_2'de 571.1 K'den %75 H_2'de 908.1 K'e yükselmiştir. Deney sırasında yapılan emisyon değerleri ölçümünde karbon monoksit (CO) oranı 15 ppm'den 3 ppm seviyelerine azalırken, karbon dioksit (CO_2) oranı %2.6 'dan %4.5 değerlerine, azot oksit (NO_x) oranı ise 10 ppm seviyelerinden 21 ppm seviyelerine artmıştır. Hidrojen yakıt destekli doğal gaz yanmasında ise kombi ısıl gücü 20 kW'ta sabit tutulmuştur. Karışımdaki CH_4 hacimce %5 değerinde azaltılarak aynı oranda H_2 ilave edilmiştir. Deney, yakıt karışımı %60 CH_4 - %40 H_2 olana kadar devam etmiştir. Yanma odasında en üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktasından alınan alev sıcaklığı ölçümlerinde yakıt karışımındaki H_2 oranı %0'da 1136.4 K'den %60'ta 1167.7 K'e yükselmiştir. Yapılan emisyon değerleri ölçümünde CO emisyonunda %96, CO_2 emisyonunda %25, NO_x emisyonunda ise %46 oranında azalma meydana gelmiştir. Çalışma sonucunda kombilerde %60 doğalgaz ve %40 hidrojen karışım oranları ile kullanılabilirliği ön görülmüştür. Doğal gazda dışa bağımlı ülkelerde temiz yakıt olarak kullanılabilecek hidrojenin sera gazı emisyonlarının yanı sıra ekonomiye de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 92814
Anahtar Kelimeler : HAD analizi, hidrojen, hermetik kombi, yanma
Sayfa Adedi : 73
Danışman : Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE USABILITY OF HYDROGEN FUEL IN HERMETIC TYPE COMBINED GAS BURNERS

(Ph. D. Thesis)

Mert ÖKTEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2024

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the feasibility of combustion of a natural gas-hydrogen fuel mixture in a domestic boiler burner without causing any physical change or performance loss. This investigation is conducted both experimentally and through numerical modelling. The study is comprised of two distinct phases. In the initial phase of the study, a natural gas fuel mixture with hydrogen fuel addition and hydrogen fuel support was subjected to combustion experimentation in a condensing hermetic boiler. In the second stage, the model was created using a computational fluid dynamics (CFD) program. In the combustion of natural gas with the addition of hydrogen, the methane content was maintained at a constant rate of 20 Sl/min, with hydrogen introduced to the fuel mixture in increments of 5% between 0% and 75% by volume. Flame temperature measurements were taken from the measurement point at the top level (12 cm) in the combustion chamber. These measurements revealed an increase in flame temperature from 571.1 K at 0% H_2 to 908.1 K at 75% H_2. The measurement of emission values during the experiment revealed a decrease in carbon monoxide (CO) rate from 15 ppm to 3 ppm, an increase in carbon dioxide (CO_2) rate from 2.6% to 4.5%, and an increase in nitrogen oxide (NO_x) rate from 10 ppm to 21 ppm. In the combustion of natural gas with the assistance of hydrogen fuel, the thermal power of the boiler was maintained at a constant value of 20 kW. The methane content of the mixture was reduced by five percent by volume, and hydrogen was introduced at the same rate. The experiment was conducted until the fuel mixture reached a composition of 60% methane and 40% hydrogen. Flame temperature measurements taken at the top of the combustion chamber (12 cm) demonstrated that the hydrogen content in the fuel mixture increased from 1136.4 K at 0% to 1167.7 K at 60%. In the measurement of emission values, a decrease was observed in the emission of CO (96%), CO_2 (25%) and NO_x (46%). The results of the study suggest that this method can be applied to boilers with a mixture ratio of 60% natural gas and 40% hydrogen. The use of hydrogen as a clean fuel in countries dependent on natural gas is thought to contribute to economic growth while also reducing greenhouse gas emissions.

Science Code : 92814
Key Words : CFD analysis, hydrogen, hermetic combi boiler, combustion
Page Number : 73
Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamın fikir aşamasından sonuçlandırılmasına kadar geçen süreçte bilgi ve deneyimini benden hiç esirgemeyen, ayrıca her konuda desteğini gördüğüm, mesleki ve hayati anlamda görüşleri ile her zaman yoluma ışık tutan, uzun yıllardır birlikte çalışmaktan onur duyduğum başta tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Halil İbrahim VARİYENLİ hocama, tecrübelerinden faydalandığım değerli katkı ve desteklerini benden esirgemeyen Tez İzleme Komitesi Üyelerim Prof. Dr. Mustafa İLBAŞ ve Prof. Dr. Eşref BAYSAL hocalarıma ve Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ndeki kıymetli tüm hocalarım ile bu süreçte desteklerini her daim yanımda hissettiğim sevgili aileme teşekkürlerimi sunarım.

Sunulan doktora çalışması, G.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenerek yürütülmüştür. FDK-2022-7756 numaralı projemize verdikleri katkılardan dolayı G.Ü. BAP Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ viii

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

2. GAZ YAKICI CİHAZLAR 11

3. YAKITLAR VE YANMA 15

4. MATERYAL VE METOT 29

5. ARAŞTIRMA BULGULARI 37

5.1. Hidrojen Yakıt Destekli Yanma 39

5.2. Hidrojen Yakıt İlaveli Yanma 49

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 59

KAYNAKLAR 63

ÖZGEÇMİŞ 71

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Mevcut ve devam eden projeler 5

Çizelge 1.2. Doğal gaza hidrojen ilavesinde alınan patentler 6

Çizelge 1.3. Doğal gaz - hidrojen dönüşümünün sistem elemanları üzerine etkisi 7

Çizelge 3.1. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri 17

Çizelge 3.2. Hidrojenin diğer yakıtlar ile karşılaştırılması 18

Çizelge 3.3. Fosil kökenli kaynaklar ve hidrojenin çevreci karşılaştırılması 19

Çizelge 3.4. Hidrojenin adlandırılması 20

Çizelge 3.5. Bazı yanıcı gazların yanabilirlik limitleri 25

Çizelge 3.6. Çalışma gazları için Wobbe İndeksi aralığı 26

Çizelge 3.7. Karışım gazının farklı hidrojen oranlarındaki termofiziksel özellikleri 27

Çizelge 4.1. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre CH_4 yanma reaksiyonları 32

Çizelge 4.2. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre H_2 yanma reaksiyonları 32

Çizelge 4.3. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre NO_x oluşum reaksiyonları 32

Çizelge 4.4. Malzemeler ve özellikleri 34

Çizelge 4.5. Kullanılan gazlar ve termofiziksel özellikleri 34

Çizelge 4.6. Ölçüm cihazları ve hassasiyetleri 35

Çizelge 5.1. CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve H_2 gazının yüzdesel değeri 39

Çizelge 5.2. Yanma odası sıcaklık ölçüm değerleri 40

Çizelge 5.3. Baca gazı ölçüm değerleri 42

Çizelge 5.4. Ölçüm cihazları ve belirsizlikleri 45

Çizelge 5.5. Yanma odası sıcaklık HAD tahmin değerleri 46

Çizelge 5.6. CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve yüzdesel değerleri 49

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.7. Yanma odası sıcaklık ölçüm değerleri..... 50

Çizelge 5.8. Baca gazı ölçüm değerleri..... 51

Çizelge 5.9. Yanma odası sıcaklık HAD tahmin değerleri 55

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Enerji kaynakları gösterimi..... 1

Şekil 2.1. Hermetik konvansiyonel kombi şeması..... 12

Şekil 2.2. Hermetik kondenzasyonlu kombi şeması..... 13

Şekil 2.3. Kombi çalışma prensibi şeması..... 14

Şekil 3.1. Hidrojen üretim kaynak ve yöntemlerinin sınıflandırılması..... 21

Şekil 3.2. Yeşil hidrojen üretim yöntemleri..... 21

Şekil 3.3. Hidrojen üretim yöntemleri ve verimleri..... 22

Şekil 3.4. CO_2 emisyonları ve atmosferik konsantrasyonlarının yıllar boyunca değişimi..... 23

Şekil 3.5. Yakıtların karbon ve hidrojen oranının değişimi..... 24

Şekil 4.1. Deney sistemi görüntüsü..... 33

Şekil 5.1. Deney sistemi şeması..... 37

Şekil 5.2. Hermetik tip kombi yanma odası görüntüsü..... 38

Şekil 5.3. Ağ yapısı (a) genel görüntüsü ve (b) eleman sayısı..... 38

Şekil 5.4. Yakıt içerisindeki hidrojen değerine göre alev görünümü ((a): %0, (b): %5, (c): %15, (d): %25, (e): %35, (f): %45, (g): %55, (h): %65, (i): %75)..... 40

Şekil 5.5. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre ısıl güç değişimi..... 41

Şekil 5.6. Baca gazı ölçümü görüntüsü..... 41

Şekil 5.7. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonu değişimi..... 42

Şekil 5.8. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyon değişimi..... 43

Şekil 5.9. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre baca gazı sıcaklığı değişimi..... 43

Şekil 5.10. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre radyasyon akısı değişimi..... 44

Şekil 5.11. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre hava/yakıt oranı değişimi..... 45

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.12. Yanma HAD görüntüsü ((a): %0, (b): %5, (c): %15, (d): %25, (e): %35, (f): %45, (g): %55, (h): %65, (i): %75) 46

Şekil 5.13. Yanma odası içerisindeki karbon emisyonu değişimi 47

Şekil 5.14. Yanma odası içerisindeki azot oksit emisyonu değişimi 47

Şekil 5.15. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre sıcaklık değişimi 48

Şekil 5.16. Deneysel ve sayısal verilerin literatürde doğrulanması 48

Şekil 5.17. Yakıt içerisindeki hidrojen değerine göre alev görünümü ((a): %0, (b): %5 (c): %10, (d): %15, (e): %20, (f): %25, (g): %30, (h): %35, (i): %40)..... 50

Şekil 5.18. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonu değişimi..... 51

Şekil 5.19. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyon değişimi…… 52

Şekil 5.20. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre baca gazı sıcaklığı değişimi..... 52

Şekil 5.21. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre radyasyon akısı değişimi..... 53

Şekil 5.22. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre hava/yakıt oranı değişimi..... 53

Şekil 5.23. Yanma HAD görüntüsü ((a): %0, (b): %5, (c): %10, (d): %15, (e): %20, (f): %25, (g): %30, (h): %35, (i): %40) 54

Şekil 5.24. Yanma odası içerisindeki karbon emisyonu değişimi 55

Şekil 5.25. Yanma odası içerisindeki azot oksit emisyonu değişimi 55

Şekil 5.26. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre sıcaklık değişimi 57

Şekil 5.27. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre eşdeğerlik oranı değişimi..... 57

Şekil 5.28. Eşdeğerlik oranına göre baca gazı sıcaklığı - azot oksit emisyonu değişimi 58

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A_r	Üssel öncesi faktör (s^{-1})
$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, C_\mu$	Fonksiyon sabitleri
d/d	devir/dakika
D_r	Difüzyon katsayısı (m^2s^{-1})
Ea	Aktivasyon enerjisi ($kJmol^{-1}$)
G	Radyasyon yoğunluğu (kJm^{-3})
G_b	Kaldırma kuvvetine bağlı türbülans kinetik enerji üretimi
G_κ	Ortalama hız gradyanlarına bağlı türbülans kinetik enerji üretimi ($kJm^{-1}s^{-3}$)
h	Entalpi ($kJkg^{-1}$)
J_i	i türünün difüzyon akısı ($kgm^{-2}s^{-1}$)
$k_{f,r}$	Reaksiyon oran sabiti (s^{-1})
L	Yanma odası genişliği (m)
$\dot{m}$	Kütlesel debi (kgs^{-1})
n	Ortamın kırılma indisi (Hava için = 1)
p	Basınç (Pa)
q	Isı akısı (kWm^{-2})
R	Evrensel gaz sabiti (8.314 $Jmol^{-1}K^{-1}$)
R_j	j türünün reaksiyon yoluyla net üretim oranı (%)
S_κ, S_ϵ	Kullanıcı tanımlı kaynak terimler
T	Sıcaklık (K)
u	Hız (ms^{-1})
Y_i	i türünün kütle kesri (%kg)
Y_M	Dalgalanan dilatasyonun sıkıştırılabilir türbülansın genel dağılma oranına katkısı (%)
%	Yüzde

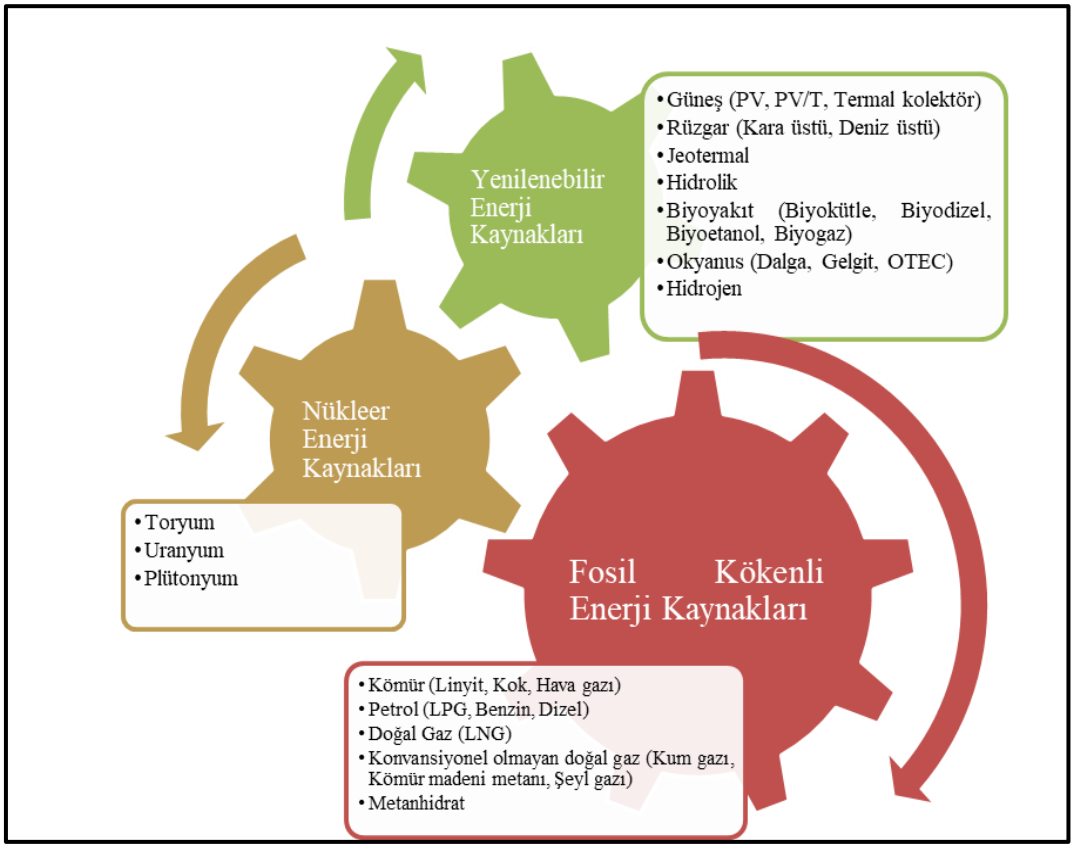
Simgeler	**Açıklamalar**
ºC	Derece Celsius
$\boldsymbol{\beta_r}$	Sıcaklık üssü
$\boldsymbol{\epsilon}$	Duvar yüzeyinin yayıcılık katsayısı (m^2s^{-1})
ε	Türbülans dağılım oranı (m^2s^{-3})
$\boldsymbol{\xi}$	Absorpsiyon katsayısı (CO_2 0.1-10 m^{-1}, H_2O 0.01-1 m^{-1})
$\boldsymbol{\xi_{eff}}$	Etkin absorpsiyon katsayısı (m^{-1})
$\boldsymbol{\sigma}$	Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67*10^{-8}$ $Wm^{-2}K^{-4}$)
$\boldsymbol{\sigma_\kappa, \sigma_\epsilon}$	Türbülanslı Prandtl sayıları
$\boldsymbol{\sigma_s}$	Saçılma katsayısı (Gazlar için ≈ 0)
κ	Türbülans kinetik enerjisi (m^2s^{-2})
$\boldsymbol{\rho}$	Yoğunluk (kgm^{-3})
$\boldsymbol{\tau_{ij}}$	Stres tensörü (Pa)
λ	Hava fazlalık katsayısı
$\boldsymbol{\varphi}$	Eşdeğerlilik oranı
∇	Radyasyon yoğunluğunun uzaysal değişimi

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
Ar-Ge	Araştırma-Geliştirme
CH_4	Metan
CO	Karbon monoksit
CO_2	Karbon dioksit
H_2	Hidrojen
K	Kelvin
kg	kilogram
kW	kilo Watt
m^3	metreküp
MJ	Mega Joule
NO_x	Azot oksit
s	Saniye

1. GİRİŞ

Ülkelerin iktisadi ve sosyal kalkınmasında en önemli kaynak enerjidir. Enerji; hızlı nüfus artışı, sanayideki önemli gelişmeler, şehirleşme, kaynakların plansız kullanılması ve küreselleşme sonucu değişen üretim ve tüketim metodolojisi nedeniyle önemini artırarak korumakta ve günümüzün en önemli sorunlarından biri haline dönüşmektedir. Petrol ve doğal gaz gibi fosil yakıt rezervleri hızla tükenmekte, ozan tabakası incelmekte ve sera gazı emisyonları insan hayatını tehdit eder duruma gelmektedir. Bu durum mevcut kaynakların verimli şekilde kullanılmasını, yeni kaynak-yöntem arayışına ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeye zorunlu kılmıştır. Enerji sorunlarının giderek arttığı ancak kaynakların tükendiği bir dünyada enerjinin verimli kullanılması önem kazanacaktır.

Enerji kaynakları fosil kökenli, nükleer ve yenilenebilir kaynaklı olmak üzere Şekil 1.1'de gösterildiği gibidir [1].



Şekil 1.1. Enerji kaynakları gösterimi

Literatür taraması

Bu tez konusunda yapılan literatür taramasında ev tipi gaz yakıcı cihazlar ile hidrojenin yanması konusuna yoğunlaşılmıştır.

Dört kişilik bir ailenin ısı enerjisi ve sıcak su ihtiyacının yoğuşmalı ve konvansiyonel kombi kullanarak karşılaştırılması ile ekonomik analizinde, yoğuşmalı kombi kullanıldığında aileye ortalama olarak %15.6 enerji tasarrufu sağladığı belirlenmiştir [2]. Hermetik yoğuşmalı kombi cihazlarının özellikleri ve performanslarının irdelendiği [3], kombi tiplerinin kirletici gaz emisyonu üzerindeki etkisinin deneysel olarak incelendiği [4, 5] çalışmalarda yoğuşmalı kombilerin NO, NO_x ve SO_2 gaz emisyonlarını önemli miktarda azalttığı görülmüştür.

Hidrojen/hava karışımının yanması [6], hidrojen/sentez gazı (H_2/CO) karışımının yanması [7], kömür, propan, biyogaz gibi hidrojence zenginleştirilmiş gazların yakılmasının alev sıcaklığı, yanma hızı, emisyon ve girdap oluşumu üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çalışmaları yapılmaktadır [8-10]. CO_2 ile seyreltilmiş hidrojenle zenginleştirilmiş metan/hava akımlarının incelendiği diğer bir çalışmada ise hidrojen ilavesinin türbülanslı yanma hızını artırdığı, CO_2 seyreltmesinin ise türbülanslı yanma hızını azalttığı sonucuna ulaşılmıştır [11]. Radyant tüp uygulamasında, yakıt olarak doğal gaz/hidrojen karışımlarının uygulamasında yakıt gazında hacimce %40 hidrojende yaklaşık %1.2'lik toplam yanma verimliliği ölçülmüştür [12].

Metan-hidrojen karışımının yakıt bakımından zengin enine kademeli enjeksiyonla yanmasının deneysel bir çalışmasında NO_x, CO_2 emisyonlarının azaldığını, CO ve C_xH_y emisyon değerlerinin arttığını ve artan hidrojen yüzdesi ve yakıt bakımından zengin yanma ile termal verimlilik değerlerinin azaldığı görülmüştür [13]. Çeper (2012). yapılan çalışmada içten yanmalı motorlarda hidrojen-metan (hitan) kullanımı incelenmiş, hidrojen etkili doğal gaz motorunun normal doğalgazlı motora göre gücü %3-4, torku %2-3 oranında artırdığı, yakıt tüketimini yaklaşık %4 oranında düşürdüğü ve yanma sonucu açığa çıkan CO ve NO_x emisyonlarını azalttığı sonucuna ulaşmıştır [14]. Hitan zenginleştirmenin bir sıkıştırma ateşlemeli motorunun performansı, emisyonu ve yanma özellikleri üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada duman emisyonunun, 2100 d/d

motor devrinde %50 gaz yakıt oranında %95.44 oranında azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [15].

Riahi vd. (2022), oksijen zenginleştirmesinin hitan alevinin sıcaklığını arttırdığı ve çevreye zararlı gazların oluşumunu en aza indirdiği sonucuna ulaşmışlardır [16]. Amez vd. (2021), 100 kW'a kadar çalışabilen geleneksel bir doğal gaz brülöründe biyogaz-hidrojen yanması, biyogazın üç farklı bileşimi (BG70 (%30 CO_2), BG60 (%40 CO_2), BG50 (%50 CO_2)) için test edilmiş ve daha iyi alev stabilitesi elde etmek için, her biyogaz %5'ten %25'e kadar hidrojenle zenginleştirilmiştir. Biyogaz bileşimi %40'tan fazla CO_2 içerdiğinde brülör tutuşmadığı için, geleneksel sistemlerde biyogaz yakmanın zorluğu kanıtlanmış ve egzoz gazı sıcaklığında en iyi iyileştirmeler %5 hidrojen bileşiminde elde edilmiştir [17].

Propan, kömür gazı, biyogaz, amonyak gibi yakıtlara hidrojen ilavesinin CO_2 emisyonunu azalttığı, NO_x emisyonunu ise artırdığı görülmüştür [18-25].

Türbülans üreteçleri ve ön karışımlı yanma koşullarında, hidrojenin ilave yakıt olarak kullanıldığı çalışmalarda daha kararlı alev sağlamıştır [26-29].

Türbülanslı önceden karıştırılmamış hidrojen ve hidrojen-hidrokarbon alevinin radyasyonlu ve radyasyonsuz modellerinin modellenmesinin yapıldığı çalışmalarda, saf doğal gazdan hidrojene yakıt bileşiminin etkileri de araştırılmış, radyasyon modelinin kullanılması, radyasyonsuz model kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında tüm yakıt bileşimleri için tüm düşük sıcaklık seviyelerine neden olmuş dolayısıyla daha düşük NO_x emisyonları ortaya çıkarmıştır [30-35].

İlbaş vd. (2006), hidrojen-havanın ve farklı bileşimdeki hidrojen-metan-hava karışımlarının laminer alev hızlarını, ortam sıcaklıklarında değişken eşdeğerlik oranları için ölçülmüş, hidrojen-metan karışımındaki hidrojen yüzdesinin arttırılmasının, elde edilen yanma hızında bir artışa ve yanıcılık sınırlarının genişlemesine neden olduğunu göstermiştir [36].

Yılmaz (2006), hava fazlalık değeri λ=1,2'de kompozit yakıtın tam yanma durumuna yaklaştığını, içeriğinde daha yüksek miktarda hidrojen içeren kompozit yakıtta yanma işleminin daha kısa sürede gerçekleştiği, kompozit yakıt karışımındaki hidrojen içeriğinin artması ile CO emisyonun azaldığı ve yüksek alev sıcaklığına bağlı olarak NO_x emisyonun arttığı belirlenmiştir. Ayrıca daha yüksek hidrojen içeren kompozit yakıtta hızlı ve çabuk yanmaya bağlı olarak alev boyunun kısmen daha kısa olduğu tespit edilmiştir. Yakıt karışımında hidrojen miktarının artması ile alevden radyasyonla ısı kaybının azaldığı, mevcut doğalgaz brülörlerinde hacimsel olarak %30 seviyelerinde hidrojen içeren kompozit gaz yakıtın brülörde herhangi bir önemli değişikliğe ve düzenlemeye gerek kalmadan kullanılabileceği belirlenmiştir. Alev sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak artan NO oluşumunun azaltılmasında hidrojenin çok geniş alevlenme limitlerinde yanmasından dolayı kademeli yanma tekniğinin kullanımının fayda sağlayacağı belirtilmiştir [37].

Cornell Üniversitesi öğretim üyelerinden Robert Howarth yaptığı çalışmalarda, sondajdan taşımaya kadar üretimin her aşamasında meydana gelen metan sızıntılarından dolayı doğal gazın en iyi senaryoda dahi iklim açısından kömürden %24 daha zararlı olduğunu belirtmiştir. Eğer kirli tankerlerde uzun yolculukların yapıldığı en kötü senaryoda bu durum %274'e çıkmaktadır [38, 39].

Götz vd. (2016), araştırmacılar konut uygulamalarında doğal gaza yenilenebilir hidrojenin hacimce %20 oranında ilavesinin, evsel cihazlardaki yanma reaksiyonundan kaynaklı CO_2 emisyonunu azalttığını belirtmişlerdir [40]. Mevcut doğal gaz boru hatlarına hidrojen ilavesi doğal gazın, Wobbe indeksini azaltarak yanma karakteristiğini değiştirmektedir. Hatlardaki uyum probleminden dolayı karışım limiti hacimce %20 civarındadır [41].

Çizelge 1.1'de, mevcut doğal gaz boru hatlarında hidrojeni kullanmanın pratik ve güvenlik problemlerinin çözümü için laboratuvar ve pilot ölçekte devam eden çalışmalar verilmiştir [42].

Çizelge 1.2'de ise hidrojenin doğal gaz şebekesine enjeksiyonunda gerekli sistem veya alt ekipman için alınan patentler özetlenmiştir [43-50].

Çizelge 1.1. Mevcut ve devam eden projeler [42]

Proje İsmi	*Ülke*	*Karışım Oranı*	*Başlama Yılı*
Ameland	Hollanda	%20'ye kadar	2008
RH2-WKA	Almanya	Bilinmiyor	2009
WindGas Falkenhagen	Almanya	Bilinmiyor	2013
Thüga-Demonstrationsanlage	Almanya	Bilinmiyor	2014
Wind2Hydrogen	Avusturya	%1-10	2015
Power-to-Gas	Kanada	Bilinmiyor	2015
Energiepark Mainz	Almanya	%0-15	2015
H2BER	Almanya	Bilinmiyor	2015
RWE Ibbenbüren	Almanya	Bilinmiyor	2015
WindGas Hamburg	Almanya	Bilinmiyor	2015
Agerbæk-Helle	Danimarka	%15'e kadar	2015
P2G Hassfurt	Almanya	Bilinmiyor	2016
Hydrogen Injection in The Gas Grid	Danimarka	%15'e kadar	2017
GRHYD	Fransa	%20'ye kadar	2017
Hybridge	Almanya	Bilinmiyor	2017
HyStock	Hollanda	Bilinmiyor	2017
Jupiter 1000	Fransa	Bilinmiyor	2018
Underground Sun Storage	Avusturya	%10'a kadar	2018
Wind to Gas Südermarch	Almanya	Bilinmiyor	2018
Kidman Park	Avustralya	Bilinmiyor	2018
HyDeploy	Birleşik Krallık	%20'ye kadar	2019
Low-Carbon Energy Project	Kanada	Bilinmiyor	2021
H2V Product	Fransa	Bilinmiyor	2021
HyNet North West	Birleşik Krallık	Bilinmiyor	2023

Birkitt vd. (2021), araştırmacılar hacimce %20 hidrojen ilavesinin 2 bar basınca kadar İngiltere'nin doğal gaz şebekesindeki malzemelere etkisini incelemişlerdir. Ortam sıcaklığına yakın sıcaklıklarda gövde merkezli kübik kristal yapısına sahip metallerin, kristal kafes yapısındaki boşluk veya arayer kristal boşluklarından kaynaklı düşük yük taşıma kapasitesi olarak tanımlanan hidrojen kırılganlığına hassas olduklarını belirtmişlerdir [51].

Çizelge 1.2. Doğal gaza hidrojen ilavesinde alınan patentler

Patent İsmi	*Patent Numarası*	*Kısa Açıklama*	*Referans*
Gaz boru hatlarına ve diğer basınçlı kaplara hidrojen enjeksiyonu	US4294274A	Doğal gaz boru hatlarına ve basınçlı kaplara hidrojen enjeksiyonu ile ilgili çalışma.	[43]
Enerji ve hidrojen üretimi için sistem ve yöntem	US20080127646A1	Hidrojen üretmek için rüzgar, güneş ve dalga enerjisi kullanılmıştır. Üretilen hidrojenin sentez gazı, petrol ürünleri ve doğal gaz ile karıştırıldığı belirtilmiştir.	[44]
Gazları karıştırmak ve sıkıştırmak için sistem	US7740031B2	Araçta kullanım için hidrojen ve doğal gazın yüksek basınçta karıştırılmasına yönelik sistem bilgisi.	[45]
Elektrolizör ve enerji sistemi	US2015167182A1	Suyun elektrolizinden elde edilen hidrojenin %5 gibi düşük konsantrasyonunun, ev tipi ocak gibi gazla çalışan cihazların çalışmasını değiştirmeden doğal gaza enjekte edilebileceğini bildirmektedir.	[46]
Çok fonksiyonlu doğal gaz ve hidrojen karışımlı gaz istasyonu ve dolum yöntemi	CN105090738A	Çok fonksiyonlu bir hidrojen ve doğal gaz karıştırma ve doldurma tekniği sunulmaktadır.	[47]
LPG, doğal gaz veya hitan gibi gaz yakıt tedariki için sürdürülebilir ve güvenli tüp	CA2552167C	Çeşitli polyester tüp konfigürasyonlarının tasarımı belirtilmektedir.	[48]
Elektrolitik hidrojen üretimi sağlayan temiz enerji kaynağı kullanılarak gaz işinin enjekte edildiği bir tür sistem	CN207166137U	Temiz enerjiden elektroliz yoluyla hidrojen üretmek ve üretilen hidrojeni gaz boru hattına enjekte etmek için sistem önerisi sunmaktadır.	[49]
Hidrojen karışımlı doğal gaz boru hattı vana odası güvenli boşaltma sistemi ve yöntemi	CN110671605A	Hidrojen ve doğal gaz karışımı boru hattı valf odası güvenli boşaltma sistemi yöntemi sunmaktadır.	[50]

Zhao vd. (2019), bir ocak brülörünün yanma ve pişirme performansını incelemiş ve doğal gazın hidrojen içeriği %75'e kadar yükseldiğinde brülörün sabit durum çalışma koşullarında hala kararlı bir şekilde yanabildiğini, ancak brülörün üzerine bir pişirme tenceresi yerleştirildiğinde geri tepme sınırının %55'e düştüğünü bulmuştur [52].

Hidrojen karışım oranı %0, %10, %20 ve %30 olan doğal gaz kullanıldığında ev tipi gaz sobalarının [53-55], gazlı su ısıtıcılarının [56-58], duvara monte gaz kazanlarının [59] yanma özelliklerinin ve baca gazı emisyonlarının incelendiği çalışmalarda, hidrojen karışım oranının artmasıyla, birincil hava katsayısının, ısı yükünün ve dumandaki CO, NO ve NO_x içeriğinin kademeli olarak azaldığını, termal verimliliğin ise kademeli olarak arttığı görülmüştür.

Doğal gazdan hidrojene dönüşümün sistem elemanları üzerine etkisi Çizelge 1.3'te gösterilmiştir [60]. Burada; ocak (O), fırın (F), ateş (A), kazan (K) ile gösterilmiş, (+) doğal gazdan hidrojene dönüştürme bileşeni üzerinde öngörülen önemli bir etkinin olmadığını, prensip olarak mevcut bileşen kullanılabilirliğini, (*) performansı optimize etmek için bileşenin yeniden tasarlanmasını veya yeniden boyutlandırılmasını gerektirdiğini ancak bileşenin temel çalışma ilkeleri aynı kaldığını, (-) ise bileşenin hidrojenle çalışmayacağı arklı bir teknolojik çözümün gerektirdiğini belirtmektedir.

Çizelge 1.3. Doğal gaz - hidrojen dönüşümünün sistem elemanları üzerine etkisi [60]

Bileşen	*Fonksiyon*	*O*	*F*	*A*	*K*	*Bileşen üzerindeki etki*	*Tasarım değişikliği*
YANMA							
Brülör (Atmosferik ve fan dahil ön karışım)	Yanma yeri. Güvenli ve verimli yanma ve alev resmini kontrol eder.	√	√	√	√	(-) Mevcut atmosferik veya ön karışımlı brülörlerde hidrojen kullanımı; ∴Brülör yüzeyinin arkasındaki yanıcı gazın arka ışığı ∴Gaz sızıntısı durumunda brülör yüzeyinin arkasında veya cihazın içinde yanıcı gaz karışımının tutuşması – alev alma veya patlamaya neden olur ∴Muhtemelen daha yüksek NOx ∴Hidrojen çok soluk mavi alev rengine sahiptir ve gün ışığında görülmesi kolay değildir.	(-) ∵Birincil havanın çıkarılması ∵ Brülör sisteminin iç hacmini azaltın (gaz birikimini azaltmak için) ∵Düşük NOx için dikkatli tasarım ∵Parçacıkları ve dolayısıyla farklı renkleri yaymak için hidrojene renklendiriciler ekleyin veya yanma yüzeyinde gazlı bez veya malzeme kullanın ∵Fanları ortadan kaldırın.
Kıvılcım ateşleyici	Brülörde gaz/hava karışımını ateşler.	√	√	√	√	Hidrojen, doğal gaza göre daha düşük tutuşma enerjisine sahiptir ve daha geniş bir yanıcılık aralığına sahiptir. Bu, tutuşmayı kolaylaştıracaktır. (+)	Bazı özel brülörler için olası çapraz aydınlatma sorunları ancak genel olarak olumlu bir özellik. (+)
Pilot ışık	Ana brülörün çalışmasını desteklemek.	x	√	√	x	Hidrojen, pilot ışığın boyutunu ve kararlılığını değiştirecek önemli ölçüde daha yüksek bir alev hızına sahiptir. (*)	Hidrojenin yeni yanma özellikleri için yeniden tasarım. (*)
Gaz vanası	Gaz kesme ve kısma.	√	√	√	√	Hidrojenin contalardan sızma potansiyeli. Yeni brülör yanma özelliklerine ve genel enerji performansındaki değişikliklere bağlı olarak farklı gaz akış hızı gerekebilir. (*)	Sızıntıyı azaltmak için contaların geliştirilmesi gerekebilir. Farklı akış kapasitesine sahip vanaları seçerek farklı akış hızı için ayarlayın. (*)

Çizelge 1.3 (devamı) Doğal gaz - hidrojen dönüşümünün sistem elemanları üzerine etkisi

Bileşen	*Fonksiyon*	*O*	*F*	*A*	*K*	*Bileşen üzerindeki etki*	*Tasarım değişikliği*
ISI TRANSFERİ VE EGZOZ							
Baca	Yanma ürünlerinin dış ortama salınımını kontrol eder.	x	x	√	√	Egzoz gazı daha sıcak olabilir ve daha fazla su buharı içerir. Bu, cihaz içindeki diğer bileşenlere ve potansiyel olarak cihaz dışındaki bina kumaşına ısı transferini artıracaktır. (*)	Isı eşanjörünün dikkatli tasarımı ile baca gazının doğal gaz sisteminden daha sıcak olması gerekmez. (*)
Eşanjör Alev Kalkanı İç Panelleri	Kullanılabilir ısı çıkışı sağlamak için ısıyı yanma bölgesinden aktarır.	x	√	√	√	(*) Hidrojen yanması için ısı transferi farklı olacaktır: ∴ Artan alev sıcaklığı ∴ Farklı IR/UV emisyon özellikleri ∴ Farklı alev uzunluğu ∴ Yanma ürünlerinde artan su buharı.	Isı transferini (cihazın verimliliği) optimize etmek için yeniden tasarım gerektirebilir, ancak temel çalışma prensibi değişmez. (*)
Karter	Isı eşanjöründen kondensat toplar.	x	x	x	√	Hidrojen yanması, doğal gazdan %60 daha fazla su buharı üretir. Toplanan yoğuşma miktarı artabilir. (*)	Karter veya tahliye hacminin arttırılması gerekebilir. (*)
KONTROLLER							
Alev Sensörü: Termokupl	Gaz yakıtlarının brülöre salınımını düzenlemek için kullanılan emniyet cihazı.	√	√	√	x	Alev sıcaklığı daha yüksek olabilir ve alev uzunluğu ve şekli farklı olacaktır. (*)	Yeni yanma özellikleri için kritik konumun yeniden tanımlanması ancak temel çalışma prensibi değişmez. (*)
İyonizasyon sensörü		x	x	x	√	Hidrojen yanması hidrokarbon iyonları üretmez. İyonizasyon sensörü kullanılamaz. (-)	Alternatif sensörlere geçilmesi gerekiyor – örneğin UV veya IR. (-)
Otomatik ve manuel kontroller (ör. termostat)	Cihaz ısı çıkışının otomatik düzenlenmesi.	x	√	x	√	Önemli endişeler yok. (+)	Öngörülen değişiklik yok. (+)
GÖVDE VE BORU							
Boru	Cihazda yakıt gazı dağıtır.	√	√	√	√	Akış kapasitesi/malzeme/gaz sızdırmazlığı sorunlarıyla ilgili olası endişeler. Gaz valflerinde gaz geçirmez kalması gereken birçok conta vardır. (*)	Gerekirse enjektörün/kısıtlayıcının yeniden boyutlandırılması. Tüm boru tesisatı ve bağlantı parçalarının özelliklerini kontrol edin ve daha küçük molekül boyutu için gaz sızdırmazlığını test edin. (*)
Gövde	Bileşenleri korur ve yanmamış gazların birikmesine izin veren muhafaza sağlar.	x	√	√	√	Hidrojen, doğal gazdan daha fazla sızıntı yapma eğilimindedir. Dış muhafaza, yanıcı bir gaz karışımının oluşmasına izin verebilir. (*)	Yanıcı karışımların oluşmasına izin verebilecek iç boşlukların boyutunun azaltılması. Gaz sensörlerini kasanın içine dahil edin. Ateşlemeden önce yanıcı karışım olmadığından emin olmak için ön ve son temizleme yapın. (*)

Bu çalışmayla, Yeşil Mutabakat Kapsamındaki Öncelikli Ar-Ge ve Yenilik konularından "Temiz, Erişilebilir ve Güvenli Enerji Arzı" başlığına yönelik olarak, yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının geliştirilmesi ve mevcut enerji sistemleri ile entegrasyonlarının sağlanmasına yönelik uygulamalar kapsamında bir çalışma gerçekleştirilmiş olacaktır. Türkiye sera gazı emisyonlarında enerjiden kaynaklı %72 payın, hidrojen gibi yenilenebilir kaynakların sisteme dahil edilmesiyle düşeceği ve bu kapsamda yapılan çalışmaların 11. Kalkınma Planında [61] yer alan "Sera gazı emisyonuna sebep olan binalar ile enerji, sanayi, ulaştırma, atık, tarım ve ormancılık sektörlerinde emisyon kontrolüne yönelik Niyet Edilmiş Ulusal Katkı çerçevesinde çalışmalar yürütülecektir. (714.1)" çerçevesine uygun olacağı değerlendirilmektedir.

Yenilenebilir, farklı tip yakıtların ısıtma sistemlerinde kullanılabilmesinin ülkemizin enerji kaynaklarının yönetimine önemli katkı sağlayacağı açıktır. Bu kapsamda hidrojenin özellikle ısıtma sistemlerinde kullanılabilirliğinin araştırılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında, hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda hidrojenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın, ithal girdili doğal gaz ile çalışan ısıtma sistemlerinin yerli ve yenilenebilir kaynakla da çalıştırılabildiğini göstermesi beklenmekte ve literatüre önemli katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. GAZ YAKICI CİHAZLAR

Gaz yakıcı cihazlar, genellikle ısıtma, pişirme veya endüstriyel amaçlarla kullanılan cihazlardır. Yiyecekleri pişirmek için kullanılan ocak ve fırınlar, banyoda ve mutfakta sıcak su ihtiyacını karşılayan şofbenler, mekan ısıtmasında kullanılan kalorifer, kazan, şömine ve sobalar ile açık hava etkinliklerinde veya geçici mekanlarda ısı sağlamak için kullanılan gazlı ısıtıcılar gaz yakıcı cihazlara örnektir.

Evsel ısıtma sistemleri, evlerdeki ısıtma ihtiyacını karşılamak için kullanılan sistemlerdir. Bunlar;

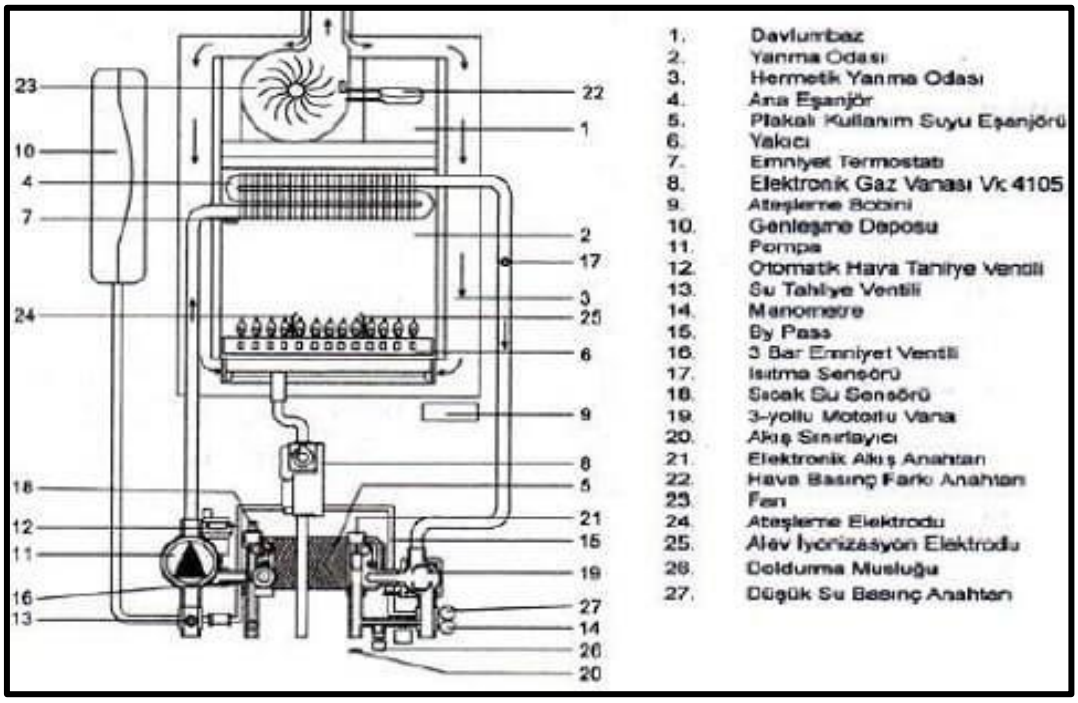
- *Merkezi ısıtma sistemi*, bir kazan evin merkezi bir noktasında bulunur ve genellikle doğal gaz, kömür, fuel-oil veya odun gibi yakıtları kullanır. Kazan tarafından üretilen sıcak su veya buhar, boru hatları veya kanallar aracılığıyla evin farklı odalarına taşınır. Radyatörler, fan-coil üniteleri veya yerden ısıtma sistemleri gibi ısıtma üniteleriyle evin her odası ısıtılır.
- *Kombi (Kombine) ısıtma sistemi*, evlerde hem ısıtma hem de sıcak su ihtiyacını karşılamak için kullanılır. Kombi, bir kazan ve sıcak su deposunu bir araya getiren kompakt bir cihazdır. Doğrudan bir duvara monte edilir ve gaz yakarak sıcak su ve ısıtma sağlar.
- *Odun veya kömür sobaları*, geleneksel bir şekilde evleri ısıtmak için kullanılan sistemlerdir. Odun veya kömür yakılarak elde edilen ısı, soba aracılığıyla yayılır. Bu sistemlerin kullanımı, düzenli yakıt temini ve dikkatli kullanım gerektirir.
- *Şömine*, odun veya diğer biyokütle yakıtlarını kullanarak doğrudan ısı sağlar. Bu sistemler, evin ortamına dekoratif bir özellik katar ve atmosferik bir ısıtma sağlar. Ancak, yanma emisyonları ve odun temini gibi bazı ek faktörleri dikkate almak önemlidir.
- *Elektrikli ısıtma sistemleri*, elektrik enerjisi kullanarak ısı üretir. Elektrikli radyatörler, elektrikli zemin ısıtma sistemleri veya elektrikli ısıtma paneli gibi elektrikli ısıtma cihazları, evin farklı odalarında kullanılabilir.
- *Hava kaynaklı ısı pompaları*, dışarıdaki havadan ısı enerjisi çeker ve bunu evi ısıtmak için kullanır. Bu sistemler, elektrik enerjisi kullanarak çalışır ve enerji verimliliği yüksektir.

<u>Kombine kazanlar (kombiler)</u>

Kombi, hem ısınma sistemini hem de kullanma sıcak su ihtiyacını karşılamak için üretilmiş cihazlardır. Gelişen teknoloji ile kombiler, kullanıcıların ihtiyaçları doğrultusunda değişik özellik ve donanıma sahip olarak (konvansiyonel ve kondenzasyonlu) üretilmektedir. Bu

kombi çeşitlerinden konvansiyonel kombilerde, yanma sonucu ortaya çıkan atık gaz içerisindeki yoğuşma gizli ısısı hermetik baca borusu yoluyla atmosfere atılırken, kondenzasyonlu kombilerde ise yanma sonucu ortaya çıkan atık gaz içerisindeki yoğuşma gizli ısı enerjisi yoğuşma teknolojisi vasıtasıyla sistem içerisine aktarılmaktadır. Bu farklılıktan dolayı yoğuşmalı kombiler daha az fosil enerji kaynağı kullanarak çevreye daha az karbondioksit (CO_2) salınımı yapmaktadır. Bu nedenle yoğuşmalı kombilerin kullanımı hızlı bir şekilde artmaktadır.

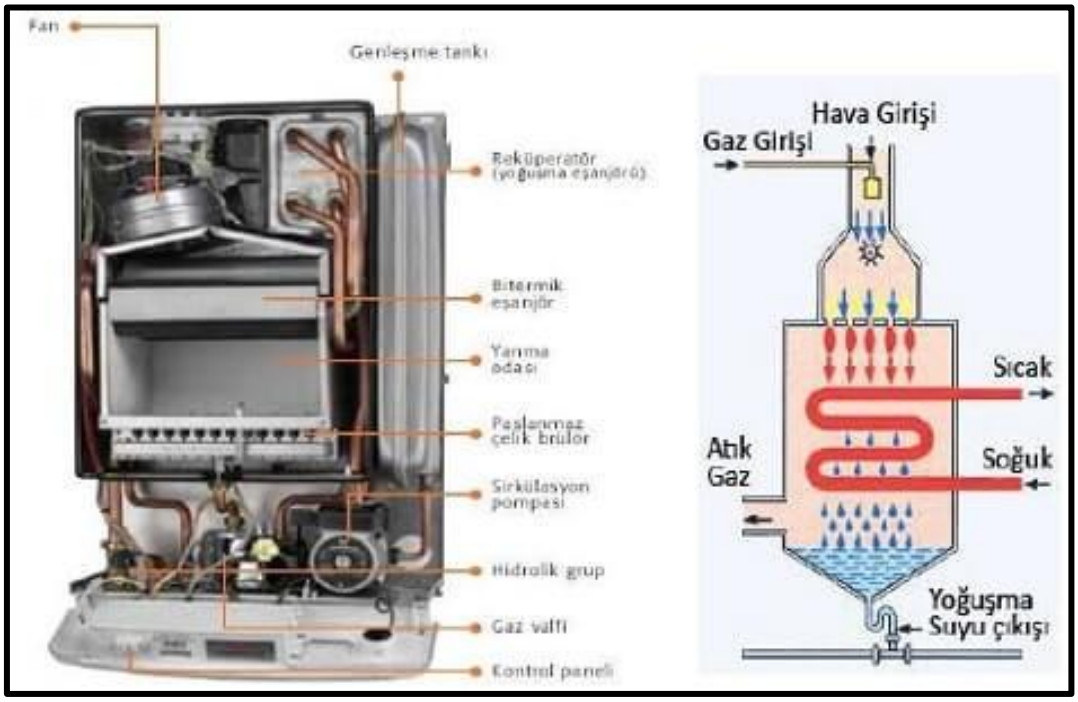
Bu kombi çeşitlerinden hermetik konvansiyonel kombilerde, yanma için ortam havası kullanılmaz gereken oksijen dışarıdan alınır ve yanma sonucunda açığa çıkan ürünler de baca yoluyla dışarıya atılır (Şekil 2.1). Hava akışının fan ile sağlanması, yanma odasının kapalı olması, baca zorunluluğunun olmaması bacalı kombilerden ayıran en önemli özelliktir [62].



Şekil 2.1. Hermetik konvansiyonel kombi şeması [62]

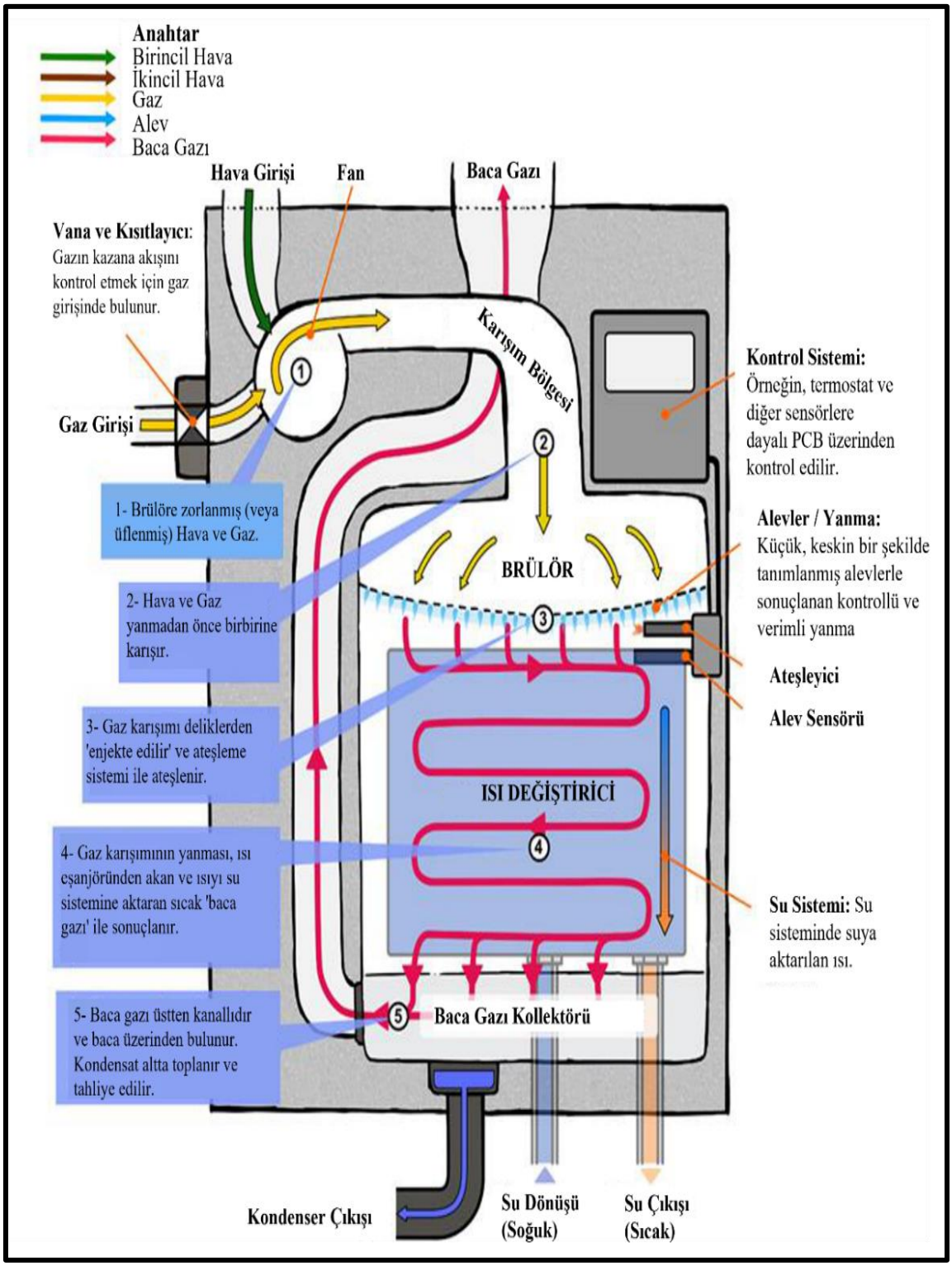
Bir başka kombi çeşidi olan hermetik kondenzasyonlu kombilerde (Şekil 2.2), kombiden çıkan buhar fazındaki su, içindeki enerji ısı değiştiricileri vasıtasıyla alınarak sıvı halde drenaj edilir. Klasik kombilerde 100-150 ºC'yi bulan baca gazı sıcaklıkları, yoğuşmalı kombilerde 40-60 ºC kadardır. Baca gazı içerisinde bulunan su buharının 54 ºC'de

yoğuşmaya başlaması dönüş suyu sıcaklığını düşürür ve bu durum klasik kombilere nazaran % 15-20 oranla daha az yakıt kullanımını sağlar [62].



Şekil 2.2. Hermetik kondenzasyonlu kombi şeması [62]

Kombilerin çalışma prensibi Şekil 2.3’te gösterilmiştir [62].



Şekil 2.3. Kombi çalışma prensibi şeması [62]

3. YAKITLAR VE YANMA

Yakıtlar

Yakıtlar, enerji elde etmek veya bir süreci gerçekleştirmek için kullanılan yanıcı maddelerdir. Tarihte, insanların günlük aktivitelerindeki enerji ihtiyacı ilk olarak odun ile karşılanmış, daha sonra bu kaynak yerini sanayi devrimiyle kömüre, birinci dünya savaşından sonra petrole ve 1980'lerde de doğal gaza bırakmıştır. Bu süreçte fosil yakıtların yakılmasında ortaya çıkan CO_2 sera gazı emisyonunda artışa sebebiyet vermiştir. Fosil yakıtlara bağımlılığın, bu yakıtların sebep olduğu zararlı emisyonlarının azaltılması güneş, rüzgar, dalga gibi yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz enerji kaynaklarının kullanımı ile sağlanabilir. Fakat bu kaynakların süreksiz karakteristikleri, etkin depolama yöntemlerine ihtiyaç duyulmasına sebebiyet vermektedir.

Doğal yakıtlar, doğal olarak bulunan ve doğal süreçlerle oluşan yakıtlardır. Bu yakıtlar, milyonlarca yıl süren jeolojik süreçler sonucu oluşurlar. Örnek olarak petrol, doğal gaz, kömür ve uranyum verilebilir. İşlenmiş yakıtlar, doğal kaynaklardan elde edilen ve çeşitli işlemlerle rafine edilen yakıtlardır. İşlenmiş yakıtlara örnek olarak rafine edilmiş petrol ürünleri (benzin, dizel, fuel-oil), LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) ve doğalgazın işlenerek elde edilen ürünler verilebilir. Sentetik yakıtlar, kimyasal işlemlerle sentezlenen yakıtlardır. Sentetik yakıtlara örnek olarak sentetik dizel, sentetik benzin ve metanol verilebilir. Yenilenebilir yakıtlar, doğal kaynaklardan elde edilen ancak sınırlı bir süre içinde yenilenebilen yakıtlardır. Biyokütle yakıtları (odun, bitki atıkları, biyogaz), biyodizel, biyoetanol, hidrojen ve güneş enerjisi yenilenebilir yakıtlara örnek olarak verilebilir.

Fiziksel hallerine göre yakıtlar üçe ayrılır.

Katı yakıtlar, katı formda bulunan yanıcı maddelerdir. Katı yakıtlar genellikle evlerde soba veya şömine gibi ısıtma sistemlerinde kullanılır.

- *Kömür*: En yaygın kullanılan katı yakıttır. Bitkisel materyallerin milyonlarca yıl süren çürüme süreci sonucu oluşur. Taş kömürü, linyit ve antrasit kömürü gibi farklı tipleri bulunur.
- *Kömür Peletleri*: Öğütülmüş kömürün sıkıştırılmasıyla oluşturulan yakıt parçalarıdır. Isıtma ve enerji üretimi için kullanılabilir.
- *Odun*: Ağaçlardan elde edilen ve doğal olarak bulunan bir katı yakıttır. Isıtma ve pişirme amaçlarıyla yaygın olarak kullanılır.
- *Odun Peletleri*: Ahşap talaşı ve diğer bitkisel atıkların sıkıştırılmasıyla oluşturulan küçük silindirik parçalardır. Odun sobaları ve ısıtma sistemlerinde kullanılır.

Sıvı yakıtlar, sıvı formda bulunan yanıcı maddelerdir. Sıvı yakıtlar, evsel ısıtma sistemlerinde (kombi, kazan vb.) ve taşıtlarda (otomobil, kamyon vb.) yaygın olarak kullanılır.

- *Petrol*: Ham petrolden rafine edilen yakıt çeşitleridir. Benzin, dizel yakıt, fuel-oil gibi çeşitleri bulunmaktadır.
- *LNG (Sıvılaştırılmış Doğal Gaz)*: Doğal gazın sıkıştırılıp sıvı hale getirilmesiyle elde edilen bir yakıttır. Evlerde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.
- *Biyodizel*: Bitkisel yağlardan veya hayvansal yağlardan üretilen bir sıvı yakıttır. Dizel motorlu araçlarda kullanılabilir.
- *Metanol*: Metanol, kimyasal bir bileşik olup sıvı formda bulunan bir yakıttır. Endüstriyel uygulamalarda ve yakıt hücrelerinde kullanılabilir.

Gaz yakıtlar, gaz halinde bulunan yanıcı maddelerdir. Gaz yakıtlar, gaz ocakları, şofbenler, ısıtma sistemleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

- *Doğal Gaz*: Metan gazından oluşan ve doğal olarak bulunan bir gazdır. Evlerde, endüstriyel tesislerde ve elektrik üretiminde kullanılır.
- *LPG* (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı): Petrolden elde edilen bir yakıttır. Taşıtlarda, evlerde ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.
- *Propan*: Petrol rafinerilerinde elde edilen bir gazdır. Evlerde, taşınabilir yakıtlar ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

- *Butan*: Doğal gazın rafinasyonunda elde edilen bir gazdır. Taşınabilir yakıtlar, tüplü gazlar ve çakmak gazı gibi uygulamalarda kullanılır.
- *Hidrojen*: En yaygın element olan hidrojenin gaz formudur. Genellikle yakıt hücreleri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılır.

Jet yakıtları, uçaklarda kullanılan özel bir türdür. Genellikle havacılık sektöründe kullanılan jet yakıtları, jet motorlarında yüksek hızlı yanma sağlamak için özel olarak formüle edilmiş hidrokarbon karışımlarıdır. Kerosen (JP-8), Jet A, Jet A-1 gibi türleri bulunur. Jet yakıtları, uçakların büyük miktarda enerji üretmelerine olanak sağlar.

Hidrojen enerjisi

Büyük patlamadan sonra oluşan ilk element olan hidrojen, evrende en yaygın olarak bulunan maddedir. Doğada her zaman bileşik halinde bulunur. Bilinen tüm elementler arasında 1,00794 kg/mol atom kütlesi ile en hafif element olma özelliğine sahip olan hidrojenin, bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1'de verildiği şekildedir [63].

Çizelge 3.1. Hidrojenin fiziksel ve kimyasal özellikleri [63]

Özellik	*Değer*	*Birim*
Yoğunluk	0.0838	kg/m^3
Sıvı olarak yoğunluk	70.8	kg/m^3
Moleküler ağırlık	2	amu
Üst ısıl değeri	141.9	MJ/kg
Alt ısıl değeri	119.9	MJ/kg
Kritik yoğunluk noktası	31.4	kg/m^3
Kritik basınç noktası	12.84	bar
Kritik sıcaklık noktası	32.94	K
Kendiliğinden tutuşma sıcaklığı	858	K
Havadaki alev sıcaklığı	2318	K
Havada ateşleme sınırı	4.0-75.0	% hacim
Havadaki stokiyometrik karışım	29.53	% hacim
Sabit basınçta özgül ısısı	14.89	kJ/kgK
Hava içindeki yayılma katsayısı	0.61	cm^2/s
Patlama enerjisi	0.17	gTNT/kJ
Alev yayılması	17-25	%

Hidrojen;

- doğada bol miktarda bulunması,
- sıfır emisyon ile sudan üretilebilmesi,
- gaz, sıvı veya metal hidritler gibi farklı fazlarda depolanabilmesi,
- uzun mesafelere transferinin minimum kayıpla gerçekleşebilmesi,
- üretiminde yenilenebilir enerji kullanımıyla çevreye zararının olmaması,
- geleneksel fosil yakıtlara göre daha yüksek alt ve üst ısıl değerlere sahip olması (Çizelge 3.2) [64],

özelliklerine sahip olması nedeniyle iyi bir enerji taşıyıcısıdır [65].

Çizelge 3.2. Hidrojenin diğer yakıtlar ile karşılaştırılması [64]

Yakıt	*LHV (MJ/kg)*	*HHV (MJ/kg)*	*A/F*	*CR (%)*	*FT (^oC)*	*AIT (^oC)*
Benzin	44.5	47.3	14.6	1.3-7.1	2307	260-460
Dizel	42.5	44.8	14.5	0.6-5.5	2327	180-320
Hidrojen	119.9	141.6	34.3	4.0-75.0	2207	585
Metan	50.0	55.5	17.2	5.0-15.0	1914	540-630
Metanol	18.0	22.7	6.5	6.7-36.0	1870	460
Propan	45.6	50.3	15.6	2.1-9.5	1925	450

Çizelge 3.2'de verilen *LHV*; alt ısıl değeri, *HHV*; üst ısıl değeri, *A/F*; stokiyometrik hava yakıt oranını, *CR*; yanma aralığını, *FT*; alev sıcaklığını, *AIT*; kendiliğinden ateşleme sıcaklığını ifade etmektedir.

Hidrojenin çevreci bir kaynak olarak fosil yakıtlarla karşılaştırılmasında kullanılan faktörler şunlardır [66];

- *Çevresel etki faktörü (EIF)*: 1 kg yakıtın yakılması sonucu açığa çıkan CO_2 miktarı.
- *Yeşil etki faktörü (GF)*: En büyük ve yakıta özgü çevresel etki faktörü değerlerine göre hesaplanan faktördür.
- *Hidrojen içerik faktörü (HCF)*: 1 kg yakıt içinde bulunan H_2 miktarı.

Çizelge 3.3'te gösterildiği gibi enerji kaynağındaki H_2 içeriğinin artması kaynağı daha çevreci olarak tanımlamaktadır [66].

Çizelge 3.3. Fosil kökenli kaynaklar ve hidrojenin çevreci karşılaştırılması [66]

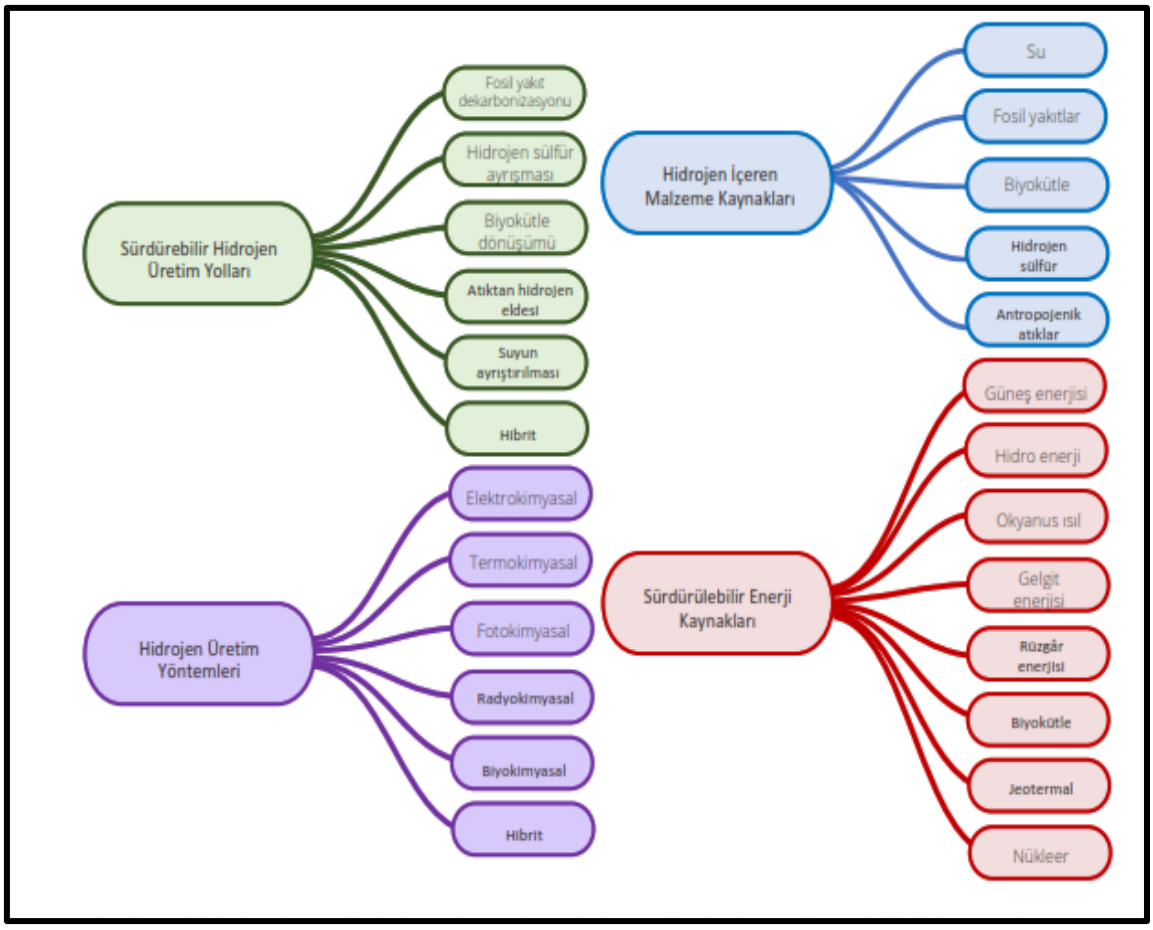
Yakıt	*EIF*	*GF*	*HCF*
Doğal gaz	2.7	0.25	0.3
Hidrojen	0	1	1
Kömür	3.6	0	0
Petrol	3.0	0.15	0.2

Hidrojen, elde edilen enerji kaynaklarına göre renk kategorilerine ayrılmaktadır [67]. Kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtlardan buharlı metan reformasyonu (BMR) ile elde edilen *'gri hidrojen'*, fosil yakıtlardan BMR ile üretimine karbon yakalama ve depolama (KYD) yöntemi uygulanmasıyla elde edilen *'mavi hidrojen'*, sıfır karbon açığa çıkaran yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen *'yeşil hidrojen'* olarak adlandırılmaktadır. *'Turkuaz hidrojen'* ise mavi ve yeşil hidrojen arasında yer alan metan pirolizi yöntemi ile elde edilen hidrojen verilen isimdir (Çizelge 3.4). Bu yöntemde gri ve mavi hidrojende olduğu gibi hammadde olarak metan kullanılır, ancak süreç, fosil yakıtların yanması yerine elektrikle üretilen ısıyla yürütülür. Metan pirolizinde çıktı olarak hidrojen ve karbon üretir, ancak BMR'den farklı olarak karbon, CO_2 yerine katı formdadır. Sonuç olarak, KYD için bir gereklilik yoktur. Pirolizi yönlendiren elektriğin yenilenebilir olduğu durumlarda, işlem sıfır karbonludur, hatta hammadde fosil metan (doğal gaz) yerine biyometan ise, karbon negatiftir [68].

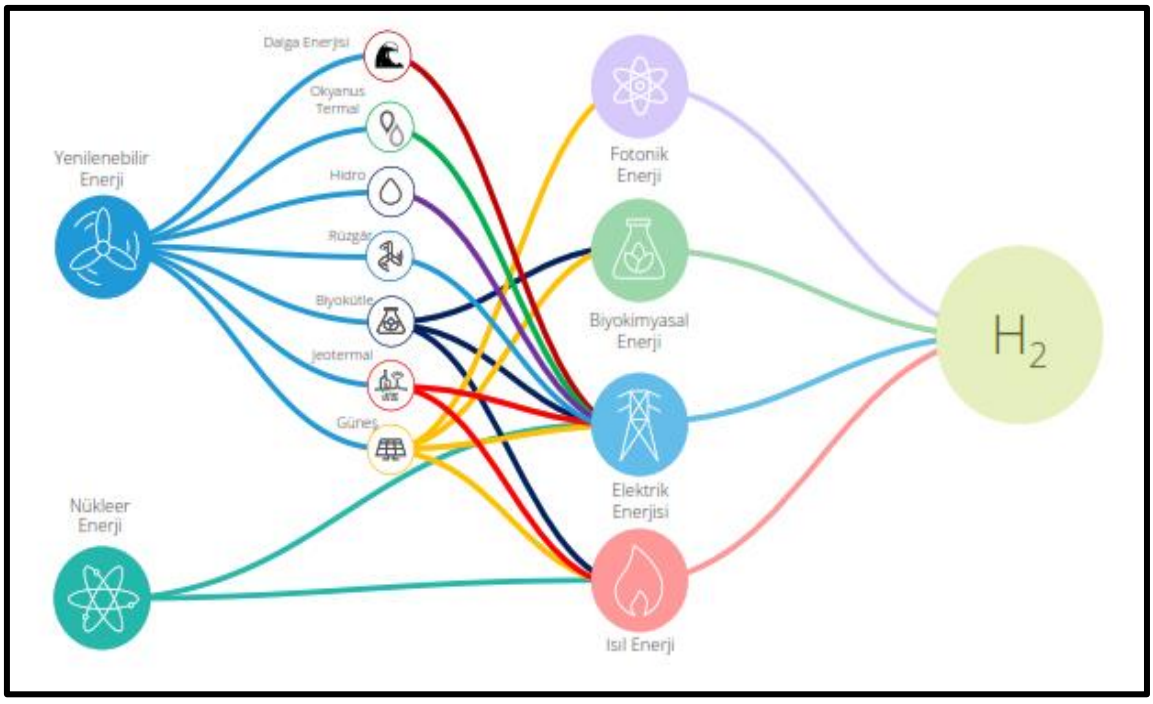
Çizelge 3.4. Hidrojenin adlandırılması [68]

Hidrojen rengi	*Ham madde bileşimi*	*Süreç enerjisi (kWh/kg H_2)*	*Üretim maliyeti ($/kg H_2)*
Renksiz	Doğal H_2	---	---
Beyaz	CHO - su / karbon yakalama kullanımı	15-30	1.50-3.00
Mor	Mineral + H_2O	5-30	0.50-3.00
Çivit mavisi	Mineral + H_2O (buhar)	5-30	0.50-3.00
Mavi	CH_4 + H_2O - su / karbon yakalama kullanımı ve depolama	18-27	1.80-3.50
Yeşil	Su - yenilenebilir enerji kaynakları	48-80	3.00-8.00
Sarı	$H_2S = H_2 + S$	8-12	0.80-1.70
Turuncu	$HC = C + H_2 + H'C'$	3-10	0.50-1.20
Kırmızı	$HC = C + H_2$	5-12	0.60-1.30
Turkuaz	$CH_4 = C + 2H_2$	12-20	1.50-2.00
Camgöbeği mavisi	$CH_4 = C + 2H_2$	15-24	1.70-2.20
Kahve	Kömür - biyokütle (odun vb.)	7-12	0.80-1.20
Gri	Kömür	7-12	0.80-1.20
Eflatun	Gazlaştırılmış kömür - su / karbon yakalama kullanımı ve depolama	9-14	1.10-1.80

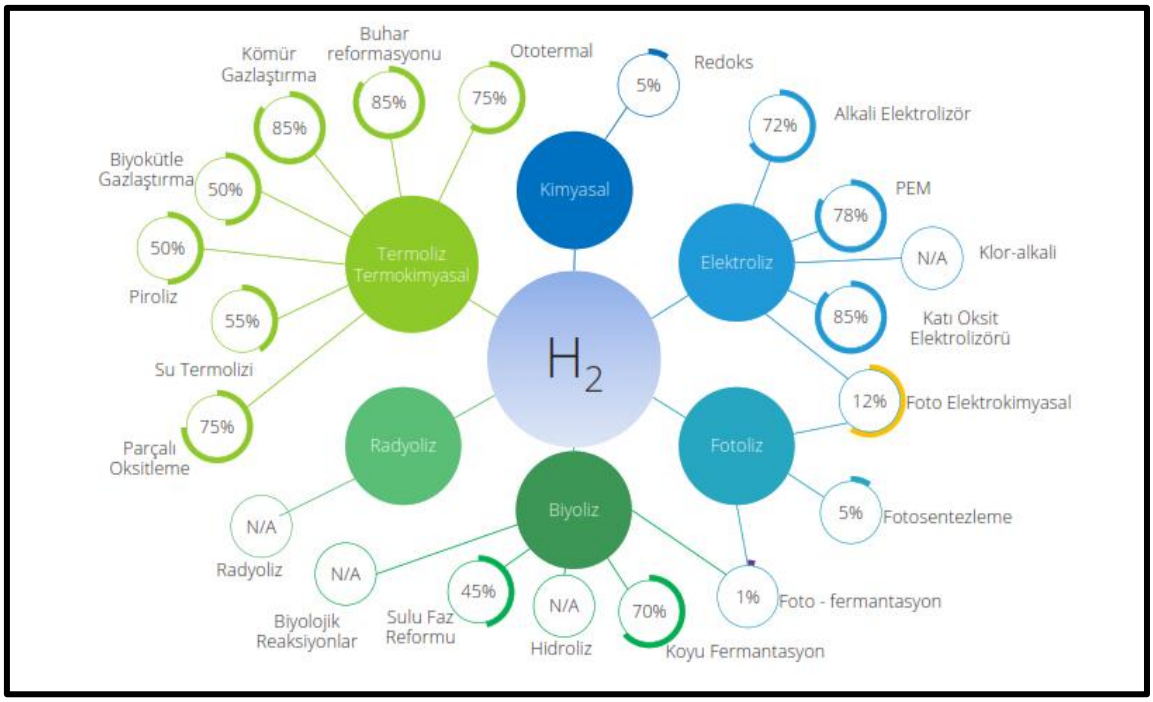
Şekil 3.1'de hidrojen üretimindeki kaynak ve yöntemlerin sınıflandırılması, Şekil 3.2'de yeşil hidrojen üretim yöntemleri, Şekil 3.3'te ise hidrojen üretim yöntemleri ve verimleri gösterilmiştir [69].



Şekil 3.1. Hidrojen üretim kaynak ve yöntemlerinin sınıflandırılması [69]



Şekil 3.2. Yeşil hidrojen üretim yöntemleri [69]



Şekil 3.3. Hidrojen üretim yöntemleri ve verimleri [69]

Üretilen hidrojen gelişen teknoloji ile farklı depolama yöntemleri depolanıp ihtiyaç halinde tekrar kullanılabilir. Hidrojen fiziksel olarak; sıkıştırılmış gaz, kriyo sıkıştırma, sıvı formda depolanabilirken malzeme bazlı olarak ise adsorban, sıvı organik, interstisyel hidrit, kompleks hidrit, kimyasal hidrojen yöntemleri ile depolanabilmektedir [1].

Hidrojen, enerji uygulamaları açısından ikincil bir enerji kaynağı ve kimyasal enerji deposudur. Hava ile yakılmasında hidrokarbonların yanmasının aksine CO_2 meydana gelmezken azot oksit (NO_x) oluşabilmektedir.

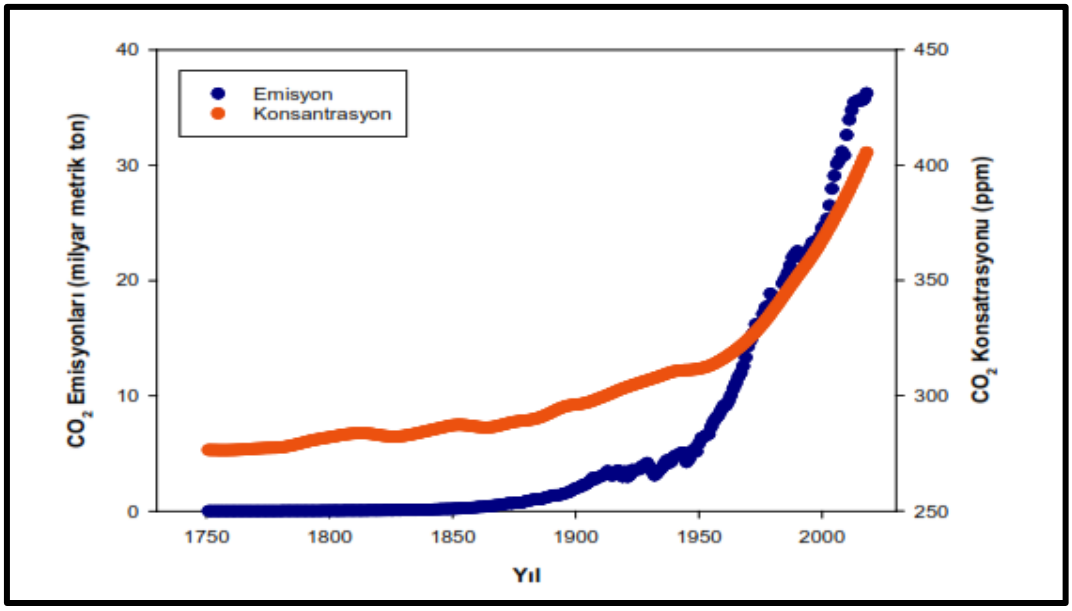
Hidrojen enerjisinin avantajları;

- İçeriğinde karbon bulunmamasından dolayı çevreye kirlilik oluşturmaz,
- Kullanımında son ürün olarak su oluşur, sera gazı açığa çıkarmaz,
- Depolanması ve taşınması esnasında enerji kaybı minimumdur,
- Sanayide, ulaşımda, evlerde yakıt olarak kullanılabilir,
- Konvansiyonel yakıtlara nazaran %39 daha verimlidir.

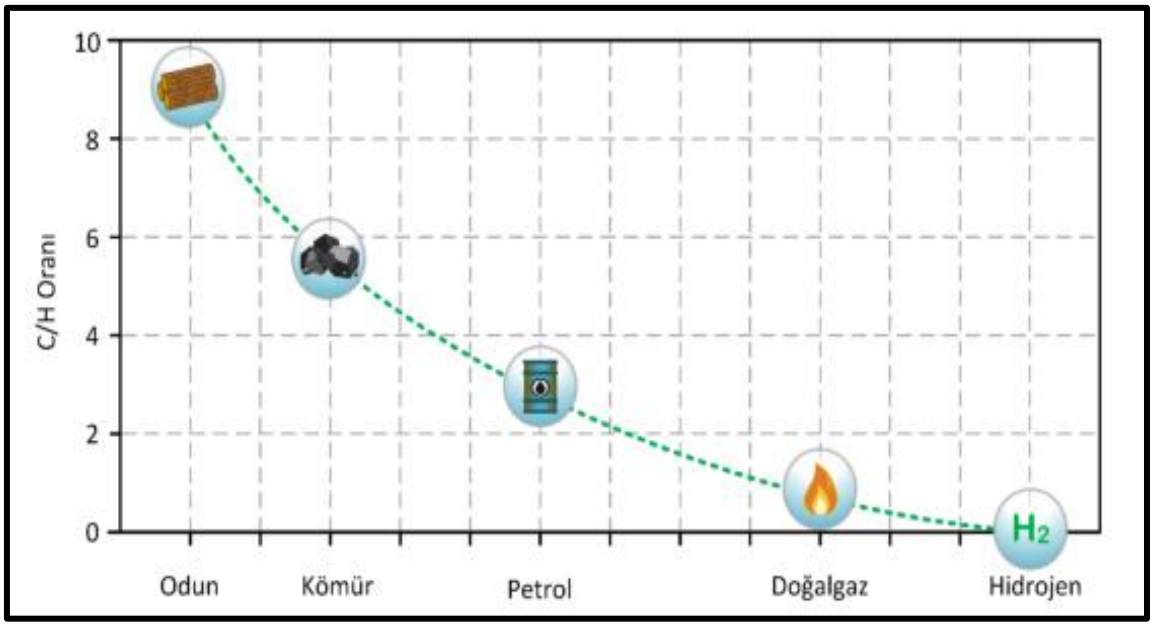
Hidrojen enerjisinin dezavantajları ise;

- Diğer yakıtlara göre pahalıdır,
- Temiz ve kokusuz olduğu için diğer yakıtlara göre daha az fark edilmesi ve yanma esnasında alevinin görülmemesi,
- Kaçak esnasında yoğunluğunun düşük olması nedeniyle yer seviyesinde kalmayıp atmosfere karışır, bunun fark edilmesi güç olduğundan ekonomik kayıplara sebebiyet verebilir.

Dünyadaki CO_2 emisyonlarının ve konsantrasyonunun artışının 1751 ve 2018 yılları arasındaki değişimi Şekil 3.4'te gösterilmektedir [70]. Sanayi devriminden sonra atmosferdeki CO_2 konsantrasyonlarının giderek arttığı gözlenmiştir. Karbon içermeyen ve enerji taşıyıcısı özelliğine sahip bir yakıt olan hidrojene doğru yönelen, karbon/hidrojen (C/H) oranının azaldığı ve hidrojen ile sıfırlandığı enerji yolculuğu Şekil 3.5'te gösterilmiştir [71].



Şekil 3.4. CO_2 emisyonları ve atmosferik konsantrasyonlarının yıllar boyunca değişimi [71]



Şekil 3.5. Yakıtların karbon ve hidrojen oranının değişimi [71]

Yanma

Yakıtların tutuşma sıcaklığında oksijenle tepkimeye girdiğinde ısı ile birlikte yan ürünlerin meydana gelmesi, yanma olayıdır. Kütlenin korunumu ilkesine göre gerçekleşen bu kimyasal tepkimelerde, giren yakıtın toplam kütlesi tepkime sonucu oluşan ürünlerin toplam kütlesine eşittir.

Bir yanma işleminde en önemli faktör hava-yakıt karışımıdır. Tam olarak yanma için gereksinim olan en az hava miktarına stokiyometrik hava denilmektedir. Hava fazlalık katsayısı (λ), yanma esnasında kullanılan hava-yakıt oranının stokiyometrik hava-yakıt oranına bölünmesiyle bulunur (Eşitlik 3.1). Stokiyometrik yanmada hava fazlalık katsayısı 1' dir.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{hava}}{\dot{m}_{hava,stokiometrik}} \times 100 \qquad (3.1)$$

$CxHy$ genel formülü ile gösterilen karbon ve hidrojen kökenli yakıt olan hidrokarbonların stokiyometrik yanması Eşitlik 3.2'de, saf hidrojenin yanması ise Eşitlik 3.3'te gösterildiği şekildedir [72].

$$C_xH_y + a(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + 3.76aN_2 \quad (3.2)$$

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O \quad (3.3)$$

Kuru hava molce yaklaşık %20.9 O_2 ve %79.1 N_2'den meydana gelmektedir. Bu durumda stokiyometrik hava - yakıt oranı Eşitlik 3.4'teki gibi bulunabilmektedir.

$$\left(\frac{m_{hava}}{m_{yakıt}}\right)_{stokiyometrik} = \frac{4{,}76a}{1}\frac{M_{hava}}{M_{yakıt}} \quad (3.4)$$

Eşdeğerlik oranı (φ) (Eşitlik 3.5) gerçek hava-yakıt oranının stokiyometrik hava-yakıt oranına bölümüdür ve karışımın yakıtça durumunu belirlemeye yardımcı olur. $\varphi > 1$ ise karışım yakıtça zengin, $\varphi < 1$ ise karışım yakıtça fakirdir. $\varphi = 1$ durumunda ise stokiyometrik karışımın meydana geldiği söylenebilmektedir.

$$\varphi = \frac{\dot{m}_{hava}/\dot{m}_{yakıt}}{\left(\dot{m}_{hava}/\dot{m}_{yakıt}\right)_{stokiyometrik}} \quad (3.5)$$

İlk ateşlemenin olabilmesi için hava-yakıt karışımındaki yakıt miktarının yanabilirlik limiti de denilen belirli bir değer aralığında olması gerekmektedir. Çizelge 3.5'te bazı yanıcı gazların 25 °C sıcaklık ve atmosfer basıncında % hacimsel olarak yanabilirlik limitleri listelenmiştir [73].

Çizelge 3.5. Bazı yanıcı gazların yanabilirlik limitleri [73]

Gazlar	*Asgari*	*Azami*
Bütan	1.8	8.4
Bütilen	1.7	9.7
Etan	3	12.4
Etilen	2.7	36
Hidrojen	4	75
Metan	5	15
Propan	2.1	9.5
Propilen	2.4	11

Damköhler sayısı (Eşitlik 3.6), türbülanslı yanmada kullanılır ve kimyasal zaman ölçeğinin (τ_c) türbülanslı zaman ölçeğine (τ_t) oranı olarak ifade edilir [51]. Da << 1 ise türbülans kimyadan çok daha hızlıdır. Bu rejim, ürünlerin ve reaktanların hızla karıştırıldığı "iyi karıştırılmış reaktör" olarak adlandırılır.

$$Da = \tau_t/\tau_c \tag{3.6}$$

Wobbe İndeksi (Eşitlik 3.7), yakıt gazlarının değiştirilebilirliğinin ana göstergesidir. Belirtilen referans koşullarındaki ısıtma değerinin hacimsel değerinin, aynı belirlenmiş referans ölçüm koşullarında bağıl yoğunluğun karekköüne bölümü olarak tanımlanır. Bu nedenle, farklı ısıtma değerlerine ve yoğunluklarına sahip iki gaz, benzer bir Wobbe İndeksi değerine sahipse benzer ısıtma yükleri üretebilir [17, 42]. Çizelge 3.6'da H_2 ve CO_2 için Wobbe İndeksi aralığı gösterilmektedir.

$$WI = \frac{AID}{\sqrt{\frac{\rho_{gaz}}{\rho_{hava}}}} \tag{3.7}$$

Burada, AID gazın hacimsel alt ısıl değerini (kJ/kg), ρ gazın yoğunluğunu (kg/m^3) ifade etmektedir.

Çizelge 3.6. Çalışma gazları için Wobbe İndeksi aralığı [42]

Gazlar	*Aralık*
H_2 kütle kesri	0-0.25
CO_2 kütle kesri	0.3-0.6
Hava/yakıt oranı	22-44

Çizelge 3.7'de doğal gaza farklı oranlarda hidrojen ilavesinin karışım gazındaki değişiminin termofiziksel özellikleri verilmiştir [42]. Karışım gazındaki hidrojen oranının artmasıyla alt ısıl değerinin arttığı buna karşın yoğunluğun ve Wobbe İndeks değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 3.7. Karışım gazının farklı hidrojen oranlarındaki termofiziksel özellikleri [42]

Hidrojen oranı (% mol)	*AID (kJ/kg)*	*WI (kJ/m^3)*	*ρ (kg/m^3)*
0	47.746	50.395	0.8201
5	48.181	49.717	0.7838
10	48.658	49.034	0.7476
15	49.184	48.346	0.7113
20	49.766	47.654	0.6750
25	50.415	46.960	0.6387

Geri tepme (Flashback) ve sönme (blow-off), yanma işlemlerinde karşılaşılan iki önemli problemdir.

Geri tepme, yanma işlemi sırasında alevin yanma bölgesinden geriye doğru ilerlemesiyle meydana gelir. Bu durum, yanma işleminin kontrolsüz bir şekilde ilerlemesine neden olabilir ve ciddi güvenlik riskleri oluşturabilir. Geri tepme genellikle yanma işleminin hızlı veya yanlış ayarlanması, yanlış hava-yakıt oranı veya alevin türbülanslı ortamlarda oluşması nedeniyle meydana gelir.

Sönme ise, yanma işlemi sırasında alevin tamamen söndürülmesi durumudur. Bu durum, yanma işleminin verimsiz olmasına ve istenmeyen gazların atmosfere salınmasına neden olabilir. Sönme genellikle, yakıtın yetersiz hava beslemesi nedeniyle yanma işleminin tamamlanamaması veya alevin türbülanslı ortamda söndürülmesi nedeniyle meydana gelir.

Hem geri tepme hem de sönme, yanma işlemlerindeki hava-yakıt oranı, alev hızı, türbülans düzeyi ve yanma odasının geometrisi gibi faktörlere bağlıdır. Bu nedenle, yanma işlemlerinde geri tepme ve sönme olaylarının önlenmesi için, doğru yakıt-hava oranı, uygun türbülans düzeyi, düzgün alev stabilizasyonu ve uygun yanma odası tasarımı gibi önlemler alınması gerekir.

4. MATERYAL VE METOT

Çalışma kapsamında temelde iki yol izlenmiştir. Öncelikle bir sayısal analiz programı kullanılarak, yakma sistemi (brülörler ve yanma odası) modellenmiştir. Daha sonra hidrojen destekli ve hidrojen ilaveli metan yakıt karışımı kondenzasyonlu hermetik tip kombide deneysel olarak yakılmıştır. Deneyler sonunda karşılaştırma yapabilmek için referans nokta belirlemek adına %100 CH_4 yakılarak ayrıca sonuçlar elde edilmiştir.

Sayısal çalışma

Akış alanının simülasyonunda geometri, sınır şartları, akışkanın fiziksel özellikleri, vb. gibi bütün önemli değişkenleri içerecek şekilde bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) modeli gereklidir. Bu doğrultuda; akışın özellikleri ile yanma odasının yanma ve emisyon performansının tahmini konularında sayısal analiz programı ile çalışmalar yapılmıştır.

Türbülanslı akışın modellenmesi ve türbülans özelliklerinin belirlenmesi için çözüm modellerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sayısal analizde türbülans modeli olarak diğer modellere göre daha iyi sonuç veren realizable κ-ε türbülans modeli, türbülans kimyasal reaksiyon yöntemi olarak ön karışımsız yanmada Eddy-Dissipation modeli seçilmiş olup yanma modelinin etkisi araştırılmıştır.

Simülasyon kısmında kararlı durum şartlarında çalışma yapılmıştır. Eşitlik 4.1'de kütlenin korunumu (süreklilik), Eşitlik 4.2'de momentumun korunumu ve Eşitlik 4.3'te enerjinin korunumu denklemleri verilmiştir. Ayrıca yanma esnasında türlerin korunumu denklemi Eşitlik 4.4'te, ısı transferi denklemi ise Eşitlik 4.5'te gösterilmiştir [74].

Kütlenin korunumu (Süreklilik),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \qquad (4.1)$$

Momentumun korunumu,

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j - \tau_{ij}\right) = \frac{\partial p}{\partial x_j} \tag{4.2}$$

Enerjinin korunumu,

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial(\lambda_f \rho T_f)}{\rho x_i} - \sum_j \frac{\partial(h_j J_j)}{\partial x_i} + \sum_j h_j R_j \qquad \frac{\partial \rho}{\partial t}(\rho_s C_s T_s) + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{4.3}$$

Tür denklemi,

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial J_j}{\partial x_i} + R_i \tag{4.4}$$

Kombinin duvarlarında meydana gelen ısı transferi,

$$q = h_f\left(T_w - T_f\right) + \epsilon\sigma(T_\infty^4 - T_w^4) \tag{4.5}$$

Realizable κ-ε türbülans modeli, "Gerçekleştirilebilir" terimi, modelin türbülanslı akışların fiziği ile tutarlı olarak Reynolds gerilmeleri üzerindeki belirli matematiksel kısıtlamaları karşıladığı anlamına gelir (Eş. 4.6 ve Eş. 4.7). Ne standart κ-ε modeli ne de RNG κ-ε modeli gerçekleştirilebilir değildir. Realizable κ-ε türbülans modelinin ilk faydası, hem düzlemsel hem de yuvarlak jetlerin yayılma oranını daha doğru bir şekilde tahmin etmesidir. Ayrıca dönme, güçlü ters basınç gradyanları altındaki sınır tabakaları, ayrılma ve devridaim içeren akışlar için üstün performans sağlaması muhtemeldir. Orijinal olarak Reynolds tarafından önerilen C_μ değişkenini içeren yeni bir girdap-viskozite formülü ve ortalama kare vortisite dalgalanmasının dinamik denklemine dayanan dağılma (ε) için yeni bir model denklemi geliştirilmiştir [75].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\kappa) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\kappa u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa})\frac{\partial \kappa}{\partial x_j}\right) + G_\kappa + G_b - \rho\epsilon - Y_M + S_\kappa \tag{4.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\epsilon u_j\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon})\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right) + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon}\frac{\epsilon^2}{\kappa + \sqrt{\upsilon\epsilon}} + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{\kappa} C_{3\epsilon} G_b + S_\epsilon \tag{4.7}$$

Türbülanslı viskozite, Eşitlik 4.8'de verildiği şekilde hesaplanır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \tag{4.8}$$

Yakıtların çoğu hızlı yanar ve genel reaksiyon hızı türbülanslı karıştırma ile kontrol edilir. Ön karışımsız alevlerde türbülans, yakıt ve oksitleyici hızla yandıkları reaksiyon bölgelerine yavaşça taşır ve karıştırır. Önceden karıştırılmış alevlerde ise türbülans, soğuk reaktantları ve sıcak ürünleri reaksiyonun hızla gerçekleştiği reaksiyon bölgelerine yavaşça taşır ve karıştırır. Bu gibi durumlarda, Eddy-dissipation modelinde yanmanın karışım sınırlı olduğu kabul edilir ve karmaşık, genellikle bilinmeyen kimyasal kinetik hızlar güvenli bir şekilde ihmal edilebilir [75].

Arrhenius denklemi, kimyasal reaksiyonlarda aktivasyon enerjisini sıcaklık ve hız sabitiyle olan ilişkisini açıklayan (Eş. 4.9) eşitliktir [75].

$$k_{f,r} = A_r T^{\beta_r} e^{-Ea/RT} \tag{4.9}$$

P1 radyasyon modeli, enerji denklemine radyasyonun etkisini eklemek için kullanılır (Eş. 4.10). Radyasyonun yayılımını bir difüzyon yaklaşımıyla ele alır. Hızlıdır ve geniş kullanım alanına sahiptir. Çok keskin gölgelenmelerin olduğu alanlarda doğruluğu düşüktür [75].

$$\nabla * (-D_r \nabla G) + \xi G = \xi n^2 \sigma T^4 \tag{4.10}$$

Net radyasyon akısı ($q_r = -D_r \nabla G$), Eşitlik 4.11'de verildiği gibi hesaplanır [75].

$$q_r = \frac{4}{3}\, \sigma \frac{\xi}{\xi + \sigma_s} (T_g^4 - T_\infty^4) = \frac{4}{3}\, \sigma \xi_{eff} (T_g^4 - T_\infty^4) \tag{4.11}$$

$$\xi_{eff} = \frac{\xi}{1 + \frac{\xi L}{2}} \tag{4.12}$$

Çizelge 4.1'de CH_4 yanma reaksiyonları [76], Çizelge 4.2'de H_2 yanma reaksiyonları [77] ve Çizelge 4.1'de NO_x oluşum reaksiyonları [78] verilmiştir.

Çizelge 4.1. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre CH_4 yanma reaksiyonları [76]

No	*Reaksiyon*	*Arrhenius faktörü*	β_r	*Ea [kJ/mol]*
1	$CH_4 + 0.5O_2 \leftrightarrow CO + 2H_2$	$7.82e^{13}$	0	$30.0e^3$
2	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$	$0.30e^{12}$	0	$30.0e^3$
3	$H_2 + 0.5O_2 \leftrightarrow H_2O$	$1.21e^{18}$	-1	$40.0e^3$
4	$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	$2.75e^{12}$	0	$20.0e^3$

Çizelge 4.2. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre H_2 yanma reaksiyonları [77]

No	*Reaksiyon*	*Arrhenius faktörü*	β_r	*Ea [kJ/mol]*
1	$O_2 + H \leftrightarrow OH + O$	$5.10e^{13}$	-0.82	69.1
2	$H_2 + O \leftrightarrow OH + H$	$1.80e^{7}$	1.00	37.0
3	$H_2 + OH \leftrightarrow H_2O + H$	$1.20e^{6}$	1.30	15.2
4	$OH + OH \leftrightarrow H_2O + O$	$6.00e^{6}$	1.30	0.0
5	$H_2 + O_2 \leftrightarrow OH + OH$	$1.70e^{10}$	0.00	200.0
6	$H + OH + M \leftrightarrow H_2O + M$	$7.50e^{17}$	-2.60	0.0
7	$O_2 + M \leftrightarrow O + O + M$	$1.90e^{8}$	0.50	400.1
8	$H_2 + M \leftrightarrow H + H + M$	$2.20e^{9}$	0.50	387.7
9	$H + O_2 + M \leftrightarrow HO_2 + M$	$2.10e^{12}$	-1.00	0.0

Çizelge 4.3. Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğine göre NO_x oluşum reaksiyonları [78]

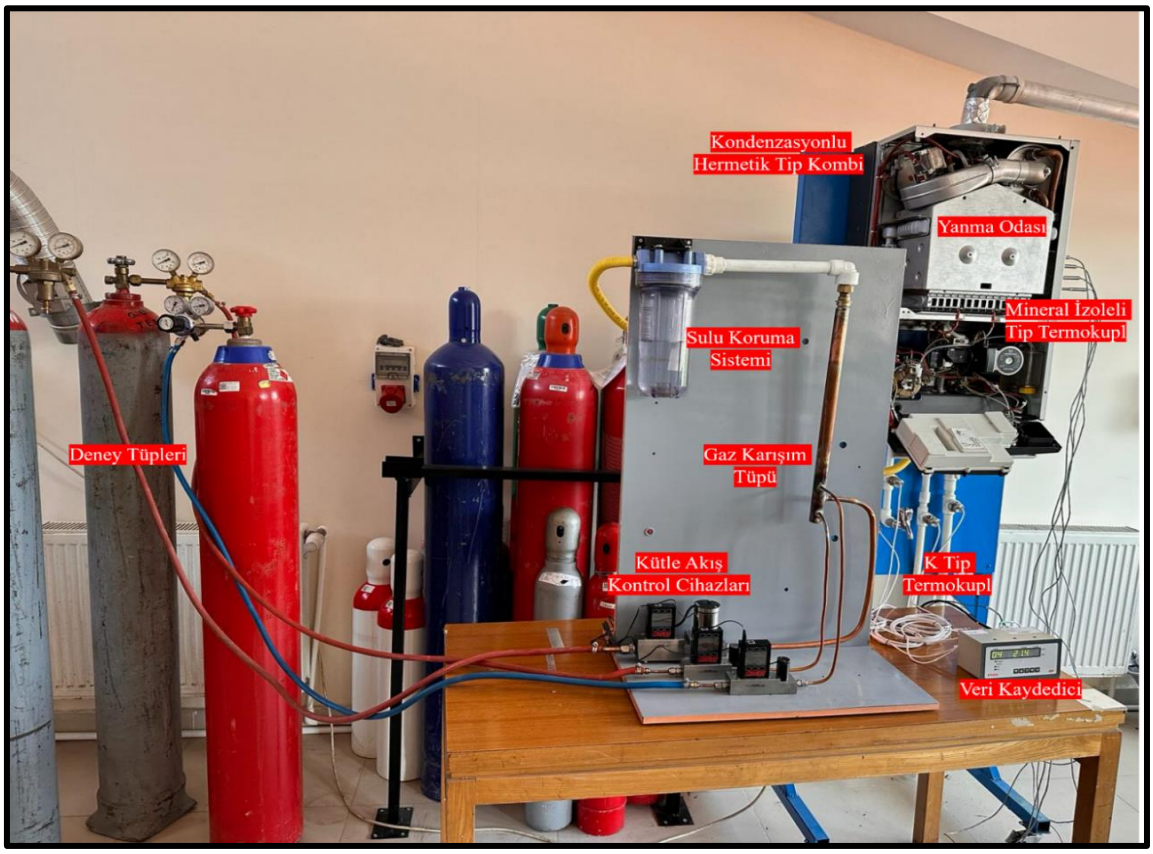
No	*Reaksiyon*	*Arrhenius faktörü*	β_r	*Ea [kJ/mol]*
1	$N + NO \leftrightarrow N_2 + O$	$2.70e^{13}$	0.00	1.49
2	$N + O_2 \leftrightarrow NO + O$	$9.00e^{9}$	1.00	27.21
3	$N + OH \leftrightarrow NO + H$	$3.36e^{13}$	0.00	1.61
4	$CH + N_2 \leftrightarrow HCN + N$	$3.12e^{9}$	0.90	84.28
5	$CN + H_2O \leftrightarrow HCN + OH$	$8.00e^{12}$	0.00	31.23
6	$C + NO \leftrightarrow CN + O$	$1.90e^{13}$	0.00	0.0

Deneysel çalışma

Deneyler, Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan yakıtlar ve yanma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.1'de gösterilen deney sistemi, yakıt tüpleri, kütle akış kontrol cihazları, kombi, baca gazı analizörü, K tipi termokupllar ve veri kaydediciden oluşmaktadır. Sistemde kullanılan kondenzasyonlu hermetik tip kombi 31 kW gücündedir. Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından desteklenen FDK-2022-7756 numaralı proje

kapsamında temin edilen CH_4 ve H_2 gazları, kütle akış kontrol cihazlarından debileri ayarlanarak gaz karışım tüpünde karıştırılmıştır. Oluşan karışım sulu bir ön koruma sisteminden geçirilerek karışımın homojen karışması sağlanmıştır. Yanma odası üzerindeki ölçüm noktaları ile deneylerde yanma odası boyunca farklı eksenel ve radyal mesafelerde sıcaklık dağılımlarının ve baca kısmında atık egzoz gazlarının NO_X, CO, ve CO_2 ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.1. Deney sistemi görüntüsü

Bir hidrojen-doğal gaz karışımının yanma reaksiyonu, havanın %20.9 oksijen ve %79.1 azottan oluştuğu kabul edilerek Eşitlik 4.14'te gösterildiği gibi yazılabilir [42]:

$$f_{H_2}H_2 + f_{DG}DG + (f_{hava})(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow f_{CO_2,p}CO_2 + f_{H_2O}H_2O + f_{N_2,p}N_2 \qquad (4.14)$$

Burada; f gazların hacimsel oranlarını, p ise ürünleri temsil etmektedir. Doğal gazın (DG) bileşimi Eşitlik 4.15'te verilmiştir [42].

$$f_{DG}DG = f_{CH_4}CH_4 + f_{C_2H_6}C_2H_6 + f_{C_3H_8}C_3H_8 + f_{C_4H_{10}}C_4H_{10} + f_{C_5H_{12}}C_5H_{12} + f_{C_6H_{14}}C_6H_{14} + f_{CO_2,r}CO_2 + f_{N_2,r}N_2 \quad (4.15)$$

Burada, r reaksiyona girenleri temsil etmektedir. Doğal gaz; %92.3 CH_4, %3.42 C_2H_6, %1.12 C_3H_8, %0.54 C_4H_{10}, %0.16 C_5H_{12}, %0.04 C_6H_{14}, %0.27 CO_2 ve %2.16 N_2 içermektedir.

Eşitlik 4.14'ün düzeltilmiş hali Eşitlik 4.16'da gösterilmiştir.

$$\left(1 - f_{H_2}\right) \times CH_4 + f_{H_2} \times H_2 + \left[2 \times \left(1 - f_{H_2}\right) + \frac{f_{H_2}}{2}\right] \times (O_2 + 3.76 \times N_2) \rightarrow \left(1 - f_{H_2}\right) \times CO_2 + \left(2 - f_{H_2}\right) \times H_2O + [2 \times \left(1 - f_{H_2}\right) + \frac{f_{H_2}}{2}] \times 3.76 \times N_2 \quad (4.16)$$

Deney sisteminde kullanılan malzemeler ve özellikleri Çizelge 4.4'te, kullanılan gazların termofiziksel özellikleri ise Çizelge 4.5'te [52] gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Malzemeler ve özellikleri

Malzeme	*Özelliği*
Bakır boru	Çap: 6, 13 ve 30 mm, Et kalınlığı: 1 mm
Gaz tüpleri (H_2 ve CH_4)	Tüp hacmi: 50 L, Saflık: %99.9

Çizelge 4.5. Kullanılan gazlar ve termofiziksel özellikleri [52]

Özellik	Metan (CH_4)	Hidrojen (H_2)
Yoğunluk (kg/m^3)	0.648	0.0813
Viskozite (10^{-5} Pa.s)	1.11	0.89
Laminer yanma hızı (m/s)	0.4	2.1
Düşük yanabilirlik (%)	5	4
Yüksek yanabilirlik (%)	15	75
Ateşlenme enerjisi (10^{-5} J)	33	2
Alt ısıl değeri (MJ/m^3)	34.0	10.2
Üst ısıl değeri (MJ/m^3)	37.8	12.5
Adyabatik alev sıcaklığı (K)	2226	2318
Wobbe indeksi (MJ/m^3)	51.9	48.5

Belirsizlik analizi, bir deneyin sonuçlarının ve ölçümlerin ne kadar güvenilir olduğunu değerlendiren süreçtir. Bu analiz, ölçüm hataları, ekipman hassasiyetleri, çevresel koşullar

ve diğer faktörleri içerir. Hedef, elde edilen verilerin güven aralıklarının ifade edilmesi ve olası belirsizlikleri dikkate alarak sonuçların doğruluğunu artırmaktır. Eşitlik 4.17'de bağımsız değişken $x_1, \dots, x_n$ büyüklerinin etkilediği değerin (R) toplam belirsizliği W_R olarak ifade edilmiştir. $w_1, \dots, w_n$ ise bağımsız değişkenlerin hata oranlarını göstermektedir [79].

$$W_R = [\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2]^{1/2} \tag{4.17}$$

Deney sisteminde kullanılan ölçüm cihazlarının belirsizlik değerleri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

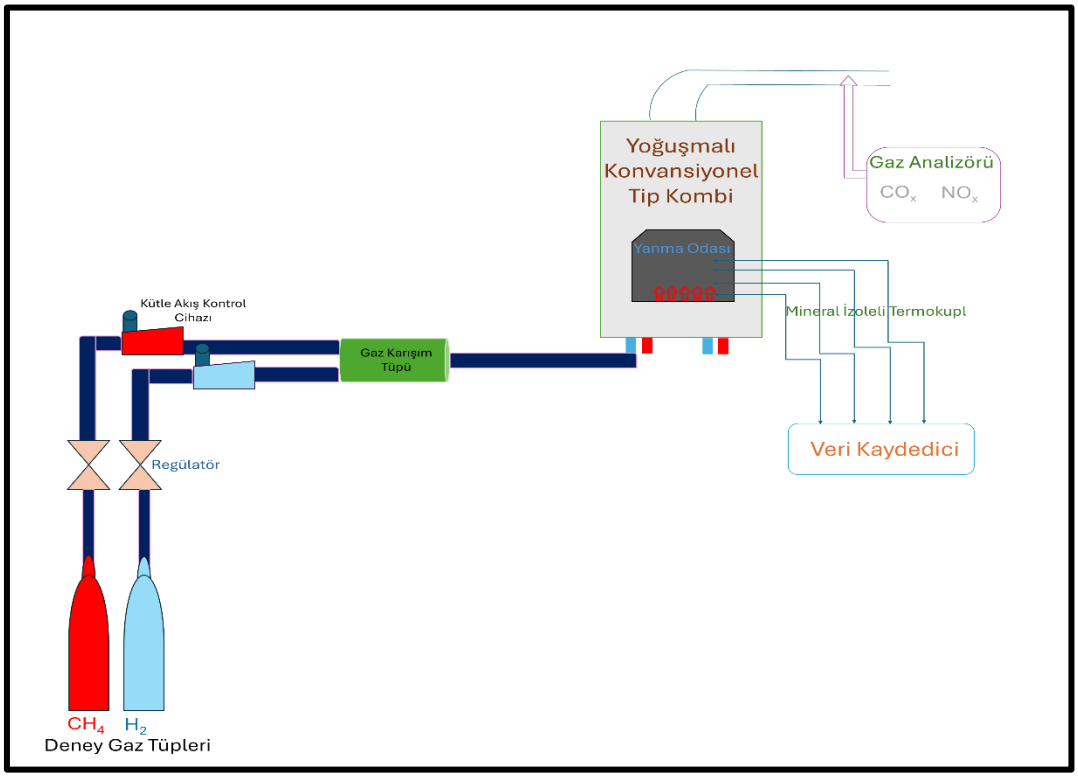
Çizelge 4.6. Ölçüm cihazları ve hassasiyetleri

Ölçüm	*Ölçüm Cihazı*	*Ölçüm Aralığı ve Hassasiyeti*
Sıcaklık	Elimko K Tipi Termokupl (Düz ve Mineral İzoleli)	- 200 ºC – +1300 ºC ± 4 ºC
Akış	Alicat MassFlow Controller	50 SL/dk ve 250 SL/dk ± (0,8% Okuma + 0,2% Tam Ölçek)
Veri	Elimko Datalogger E-680	± 0,5
Baca gazı	Novaplus Gaz Analizörü	O_2 (%) 0-21, ±0,2 (%) CO (ppm) 0-10000 ppm, ±10 ppm NO ve NO_2 (ppm), 0-1000 ve 0-200 ppm, ±5 ppm SO_2 (ppm) 0-2000 ppm, ±10 ppm CO_2 (%) 0-40, ±0,3 (%) Yanma Ürünlerinin Sıcaklığı (°C) 0-1100 °C, ±2 °C

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

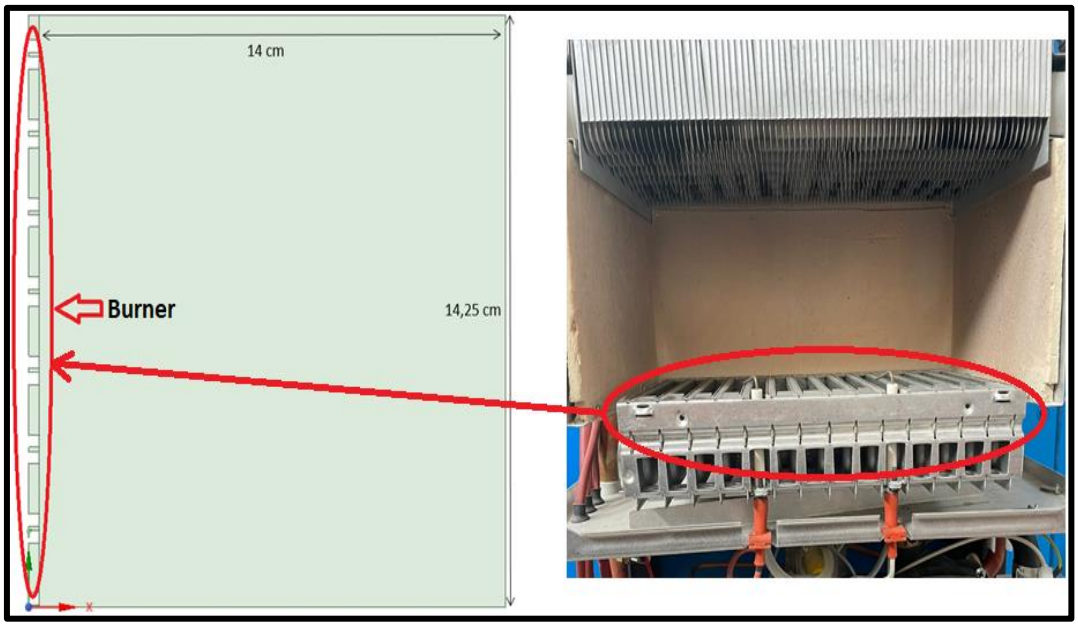
Bu bölümde, hermetik tip birleşik gaz yakıcı cihazlarda hidrojen yakıtının kullanılabilirliği deneysel ve sayısal çalışma başlıkları altında incelenmiş, elde edilen bulgular paylaşılarak yorumlanmıştır.

Deneyler, Gazi Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümü bünyesinde bulunan yakıtlar ve yanma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 31 kW gücündeki kondenzasyonlu hermetik tip kombide hidrojen destekli doğal gaz yakılmıştır (Şekil 5.1). Gazların giriş basıncı 0.5 bara ayarlanmış, yanma yaklaşık olarak atmosferik şartlarda gerçekleşmiştir.

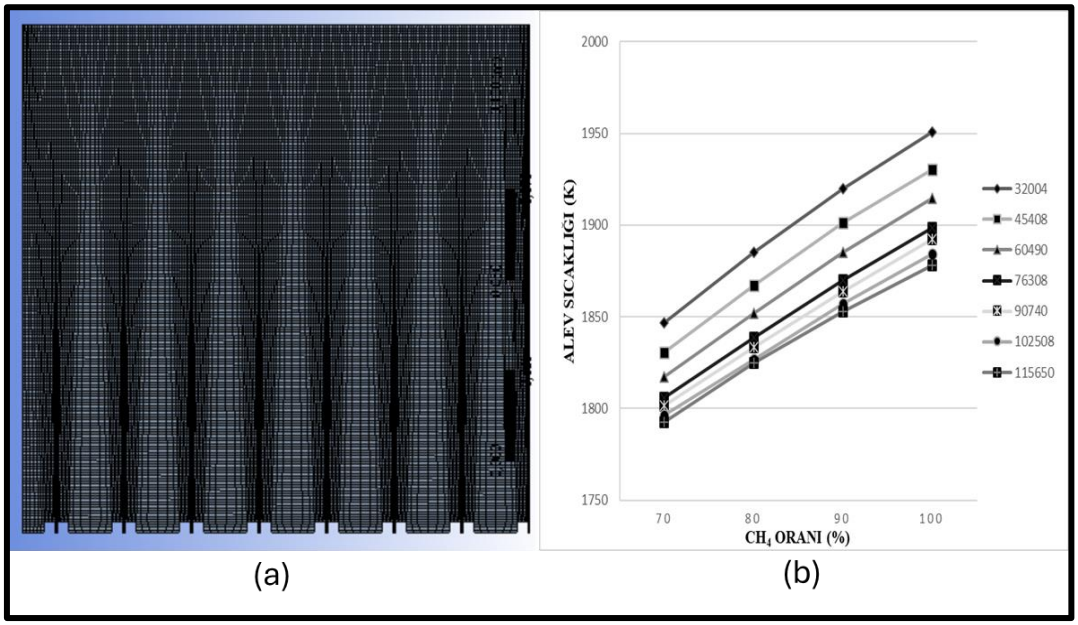


Şekil 5.1. Deney sistemi şeması

Deneysel çalışmada kullanılan kombinin Şekil 5.2'de yer alan 14 cm x 28.5 cm boyutlarındaki yanma odası ANSYS Fluent üzerinden modellenmiştir. Yakıt enjektör çapı 1 mm'dir



Şekil 5.2. Hermetik tip kombi yanma odası



Şekil 5.3. Ağ yapısı (a) genel görüntüsü ve (b) eleman sayısı

Şekil 5.3'te yanma odasının ağ yapısı (mesh) görüntüsü ve eleman sayısı verilmiştir. 76308 eleman sayısından itibaren tahmin edilen alev sıcaklığı sonuçlarının tüm CH_4 konsantrasyonları için birbirine yaklaştığı görülmektedir. Modelleme süresi ve bilgisayar zorlukları nedeniyle ihtiyaç duyulandan daha fazla eleman kullanılması gerektiğinden, 76308 eleman sayısına sahip ağ yapısı en uygun ağ yapısı olarak belirlenmiş ve sonraki tüm modellemeler için kullanılmıştır.

5.1. Hidrojen Yakıt Destekli Yanma

Karışımdaki CH_4 değeri 20 Sl/dk sabit debide tutulmuştur. Oluşturulan yakıt karışımında hidrojen, hacimce %0 ile %75 arasında %5'erlik artışlarla eklenmiştir.

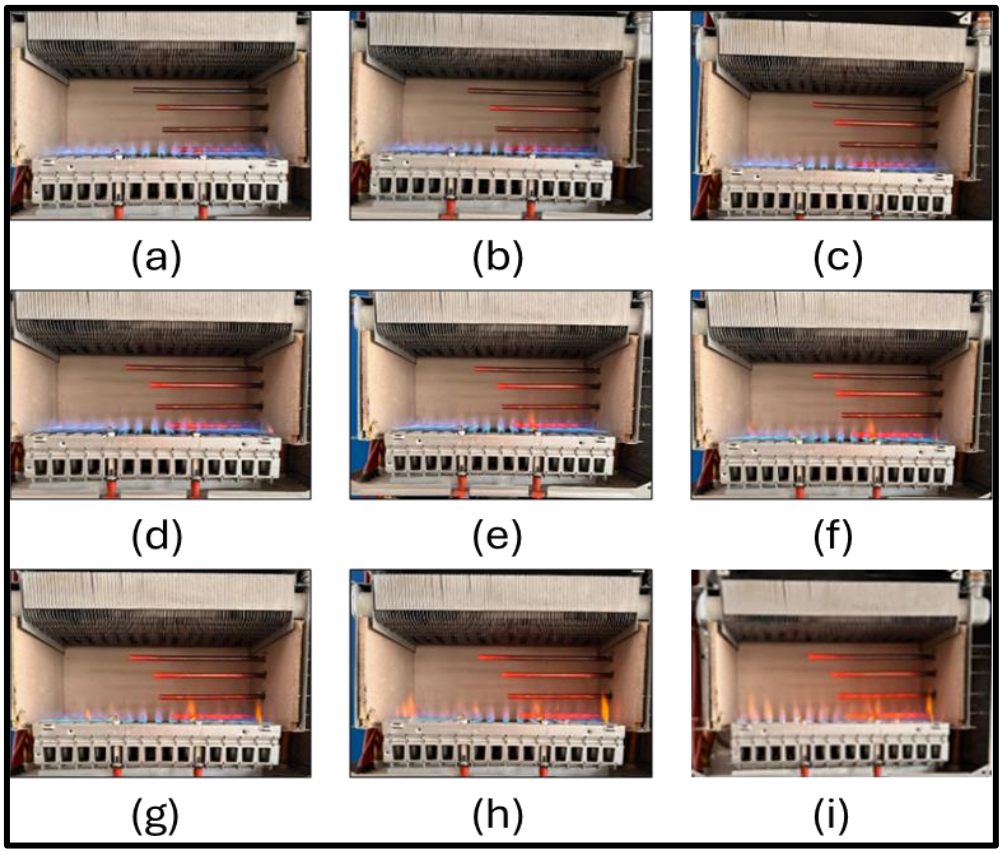
Çizelge 5.1'de deneyde kullanılan CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve yakıt karışımındaki H_2 gazının yüzdesel değeri verilmiştir.

Çizelge 5.1. CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve H_2 gazının yüzdesel değeri

Deney No	*Isıl Güç (kW)*	*CH_4 (Sl/dk)*	*H_2 (Sl/dk)*	*H_2 (%)*
1	13.00	20	0.00	0
2	13.21	20	1.05	5
3	13.44	20	2.22	10
4	13.69	20	3.52	15
5	13.98	20	5.00	20
6	14.31	20	6.66	25
7	14.68	20	8.50	30
8	15.11	20	10.76	35
9	15.61	20	13.33	40
10	16.20	20	16.36	45
11	16.92	20	20.00	50
12	17.79	20	24.44	55
13	18.87	20	30.00	60
14	20.27	20	37.14	65
15	22.14	20	46.66	70
16	24.75	20	60.00	75

Şekil 5.4'te karışım yakıtı içerisindeki hidrojen yüzdesine göre yanma esnasında oluşan alevin görünümü verilmiştir. %100 CH_4 - %0 H_2 yanması sırasında alev boyunun kısa ve alev renginin mavi olduğu görülmektedir. Yakıt karışımındaki H_2 oranı arttıkça alev rengi maviden turuncuya doğru geçiş yapmakta, aynı zamanda alev boyunun uzadığı gözlemlenmektedir. Alevdeki bu değişim, yanma sıcaklığının artışını ve hidrojence zenginleştirilmiş karışımların daha hızlı yanma sağladığını görselleştirmektedir.

Mineral izoleli, yüksek sıcaklığa dayanaklı dört adet termokupl 3'er cm aralıklarla yerleştirilmiş ve sıcaklık değerleri alınmıştır. Çizelge 5.2'de bu değerler verilmiştir.

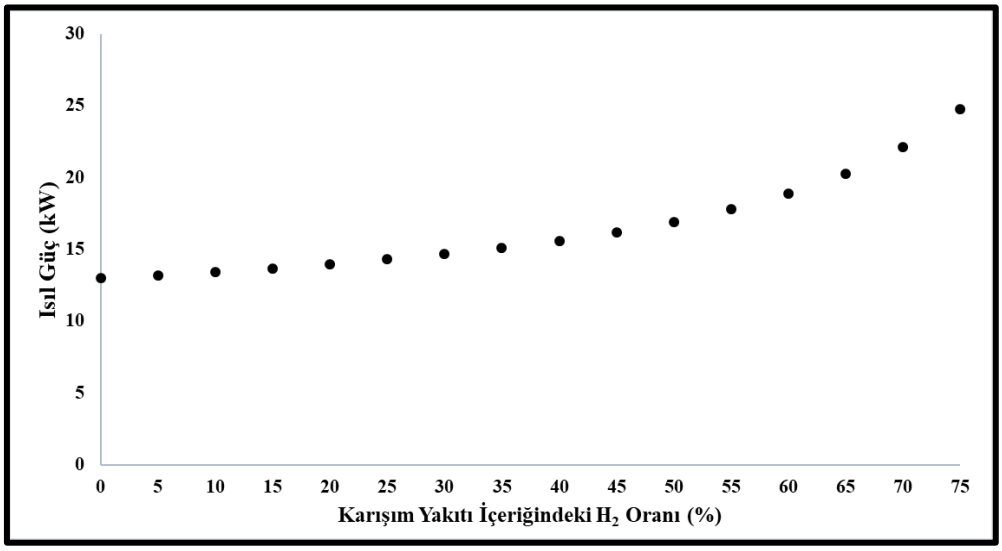


Şekil 5.4. Yakıt içerisindeki hidrojen değerine göre alev görünümü ((a): %0, (b): %5, (c): %15, (d): %25, (e): %35, (f): %45, (g): %55, (h): %65, (i): %75)

Çizelge 5.2. Yanma odası sıcaklık ölçüm değerleri

Deney No	*Ölçüm Noktası 1(K)*	*Ölçüm Noktası 2(K)*	*Ölçüm Noktası 3(K)*	*Ölçüm Noktası 4(K)*
1	922.1	656.3	606.9	571.1
2	937.9	657.4	612.4	598.7
3	948.9	659.2	614.0	603.0
4	956.3	660.3	616.2	605.9
5	970.8	663.0	624.1	615.8
6	981.3	671.5	631.5	623.4
7	994.5	703.1	651.1	636.2
8	1010.5	720.1	655.3	641.5
9	1028.2	739.5	671.2	667.5
10	1042.2	756.3	697.6	689.9
11	1051.4	778.2	711.9	706.2
12	1069.3	810.4	744.6	735.4
13	1080.4	832.7	780.7	760.9
14	1097.1	866.3	828.2	797.3
15	1120.4	905.3	861.7	838.9
16	1160.4	973.9	929.9	908.1

Şekil 5.5'te hidrojen oranına göre ısıl güçteki değişim gösterilmiştir. Kombinin ısıl gücü %0 H_2 oranında ısıl güç 13 kW iken, %75 H_2 oranında bu değer 24.75 kW'a çıkmaktadır.



Şekil 5.5. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre ısıl güç değişimi

Yanma deneyleri sırasında baca gazı sıcaklık ve emisyon değerleri, baca gazı analizör cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 5.6). Baca gazı sıcaklık ve emisyon değerleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

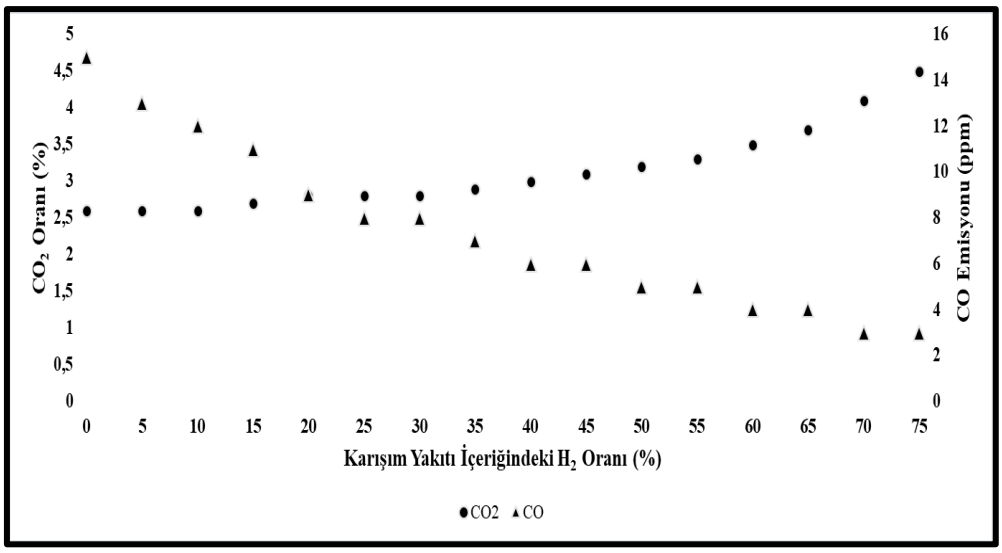


Şekil 5.6. Baca gazı ölçümü görüntüsü

Çizelge 5.3. Baca gazı ölçüm değerleri

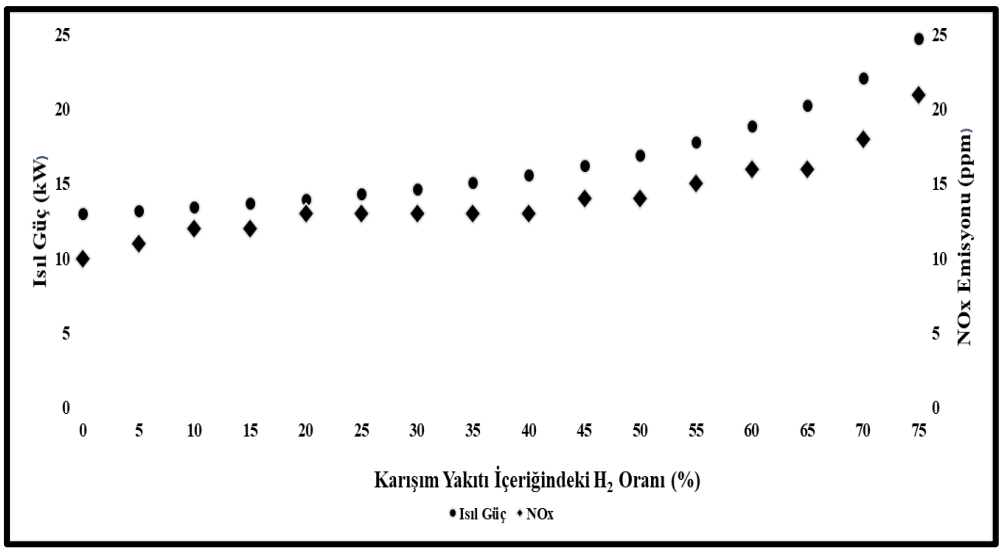
Deney No	*CO_2 (%)*	*CO (ppm)*	*NO_x (ppm)*	*Tbaca (K)*
1	2.6	15	10	308.8
2	2.6	13	11	311.0
3	2.6	12	12	312.3
4	2.7	11	12	312.8
5	2.8	9	13	313.2
6	2.8	8	13	313.9
7	2.8	8	13	314.3
8	2.9	7	13	314.9
9	3.0	6	13	315.5
10	3.1	6	14	316.2
11	3.2	5	14	316.8
12	3.3	5	15	317.8
13	3.5	4	16	319.2
14	3.7	4	16	320.2
15	4.1	3	18	322.8
16	4.5	3	21	325.2

Şekil 5.7'de yakıt içindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonunun değişimi gösterilmiştir. Karışım içerisinde H_2 oranı arttıkça yanma odasının sıcaklık değeri yükselmektedir. Sıcaklığın yükselmesiyle de yanmamış CH_4 miktarı azalmaktadır. Bu durum CO oranında düşüşe (15 ppm'den 3 ppm'e), CO_2 değerinde ise artışa (%2.6'dan %4.5'e) sebebiyet vermektedir. CO emisyonunda %80 azalma görülmüştür.



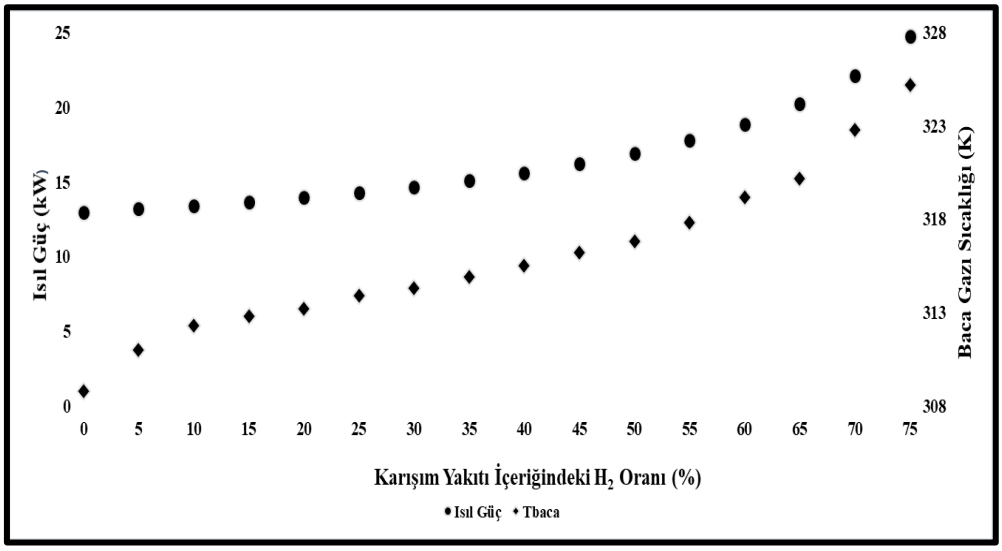
Şekil 5.7. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonu değişimi

Şekil 5.8'de azot oksit (NO_x) emisyon değerlerindeki değişim gösterilmiştir. Yakıt karışımındaki H_2 oranının artması ile yanma odası sıcaklığındaki artış, hava içerisindeki azot moleküllerinin oksijenle reaksiyona girme miktarını artırarak çevresel açıdan sorun yaratabilecek NO_x oluşumuna neden olduğu görülmektedir. Bu nedenle H_2 kullanımında NOx kontrolü önem kazanmaktadır.



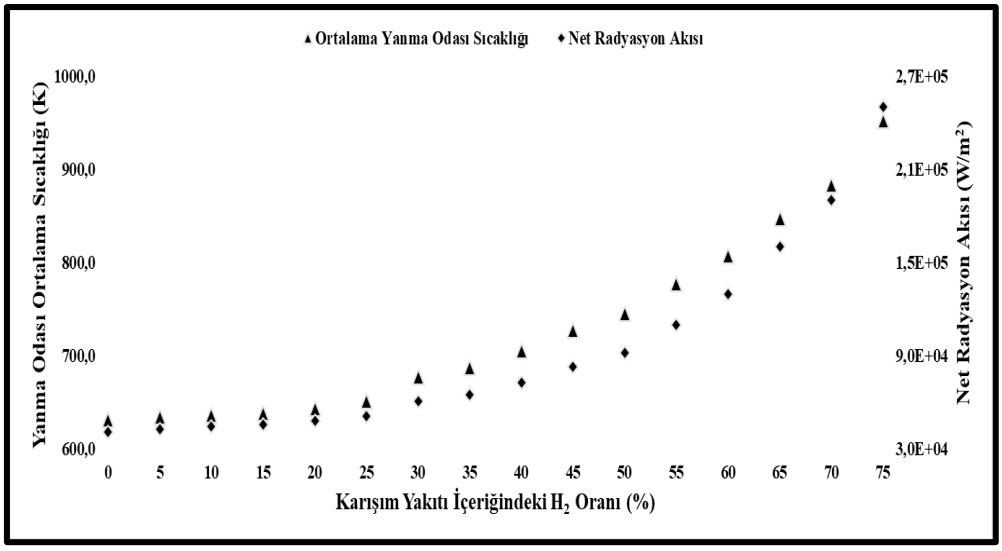
Şekil 5.8. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyonu değişimi

Şekil 5.9'da baca gazı sıcaklığı değişimi gösterilmiştir. Hidrojen oranındaki artma, yanma odası sıcaklığındaki artışa neden olmakta ve bu durum atık gaz sıcaklığını artırmaktadır.



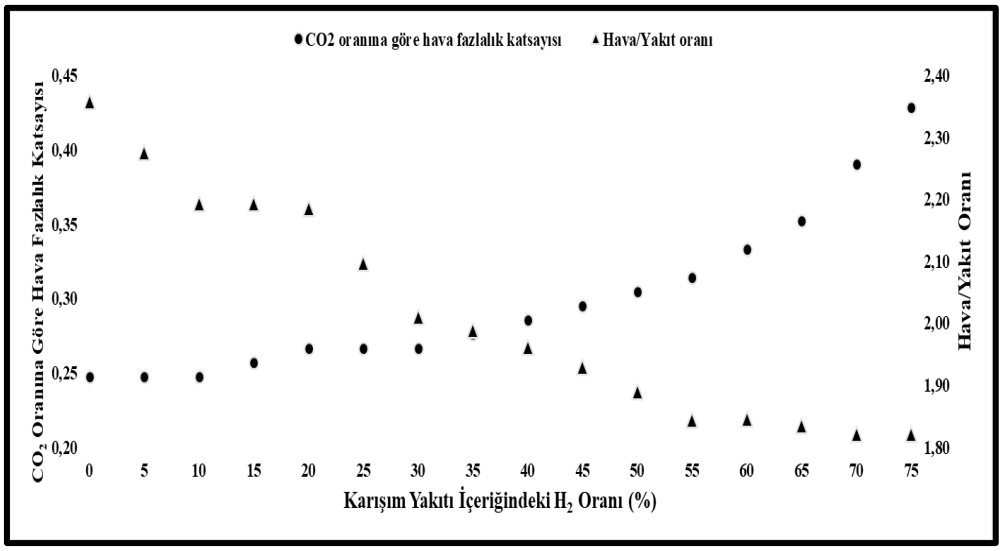
Şekil 5.9. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre baca gazı sıcaklığı değişimi

Şekil 5.10'da P1 radyasyon modeli kullanılarak hesaplanan net radyasyon akıları, H_2-CH_4 karışımının yanması sırasında yanma odasında oluşan ortalama gaz sıcaklıklarına bağlı olarak analiz edilmiştir. Gaz sıcaklığı arttıkça radyasyon akısı önemli ölçüde yükselmektedir. Bu artış Stefan-Boltzmann yasasına uygun bir şekilde gerçekleşmektedir. Düşük sıcaklıklarda radyasyon akısı nispeten düşük değerdedir. Bu, düşük sıcaklık aralığında konveksiyon ve iletimin radyasyon taşınımına kıyasla daha baskın olabileceğini göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda radyasyon akısı çok daha yüksektir. Bu durum, radyasyon taşınımının yanma odasında enerji taşınımı için belirgin bir rol oynadığını ve sıcaklık arttıkça daha da baskın hale geldiğini göstermektedir. Hidrojen, metana kıyasla daha yüksek bir ısıl değere sahiptir ve yanma sırasında daha yüksek alev sıcaklıklarına ulaşır. Bu, karışımın yanması sırasında radyasyon akısının artmasını açıklar. Metan daha kararlı bir yanma sağladığı için, yanma odasındaki sıcaklık dalgalanmalarını azaltarak radyasyon akısında nispeten düzgün bir artışa katkıda bulunur.



Şekil 5.10. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre radyasyon akısı değişimi

Şekil 5.11'de baca gazı içerisinde bulunan CO_2 oranına göre hava/yakıt oranındaki değişim gösterilmiştir. Hava fazlalık katsayısının artmasına rağmen karışım yakıtının toplam debisinin de artması ile hava/yakıt oranı düşmektedir.



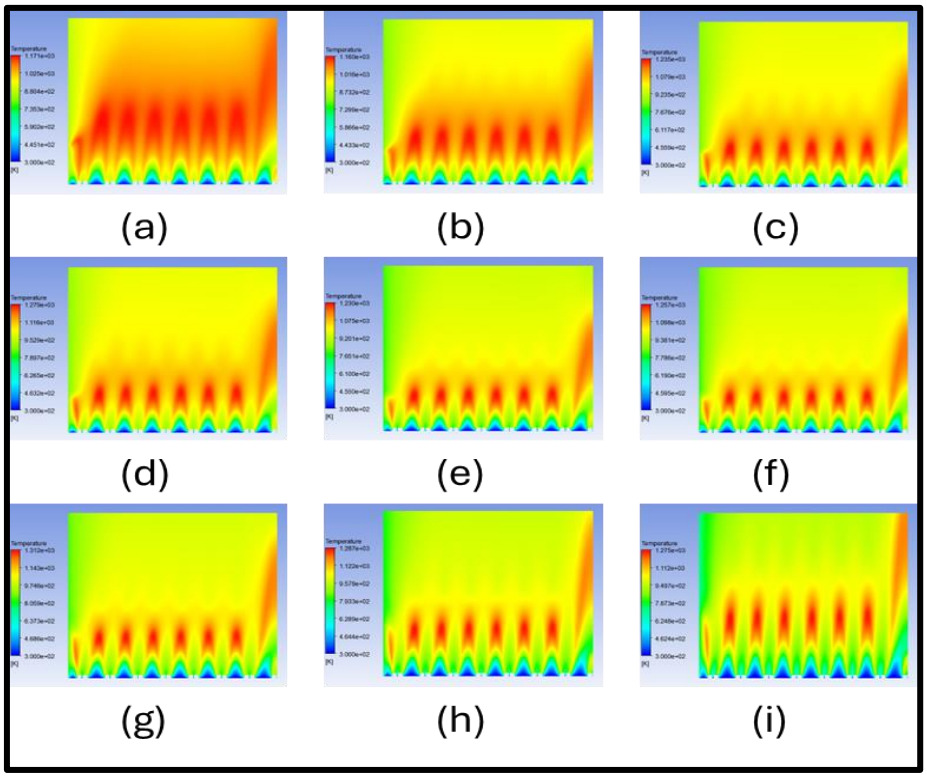
Şekil 5.11. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre hava/yakıt oranı değişimi

Çizelge 5.4'te ölçümde kullanılan cihazların %95 güven aralığında belirsizlikleri verilmiştir.

Çizelge 5.4. Ölçüm cihazları ve belirsizlikleri

Ölçüm cihazı	*Ortalama değer*	*Toplam standart belirsizlik*	*Genişletilmiş belirsizlik*	*Sonuç*
Termokupl	727.9	25.07	50.14	727.9 ± 50.14 (K)
Kütle akış kontrol cihazı	17.9	4.42	8.83	17.9 ± 8.83 (Sl/dk)
Baca gazı analizörü (CO)	3.14	0.22	0.45	3.14 ± 0.45 (%)
Baca gazı analizörü (CO2)	7.44	5.85	11.69	7.44 ± 11.69 (ppm)
Baca gazı analizörü (NOx)	14.0	2.97	5.93	14.0 ± 5.93 (ppm)
Baca gazı analizörü (sıcaklık)	315.9	1.58	3.16	315.9 ± 3.16 (K)

Sistemin bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) programı olan ANSYS Fluent ile modellenmesinin görüntüsü Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Analizde realizable κ-ε türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli, P1 radyasyon modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH_4 ile 9 basamaklı H_2 yanma reaksiyonları kullanılmıştır [76, 77]. Bu modellemenin sayısal analiz sonuçları da Çizelge 5.5'te verilmiştir.

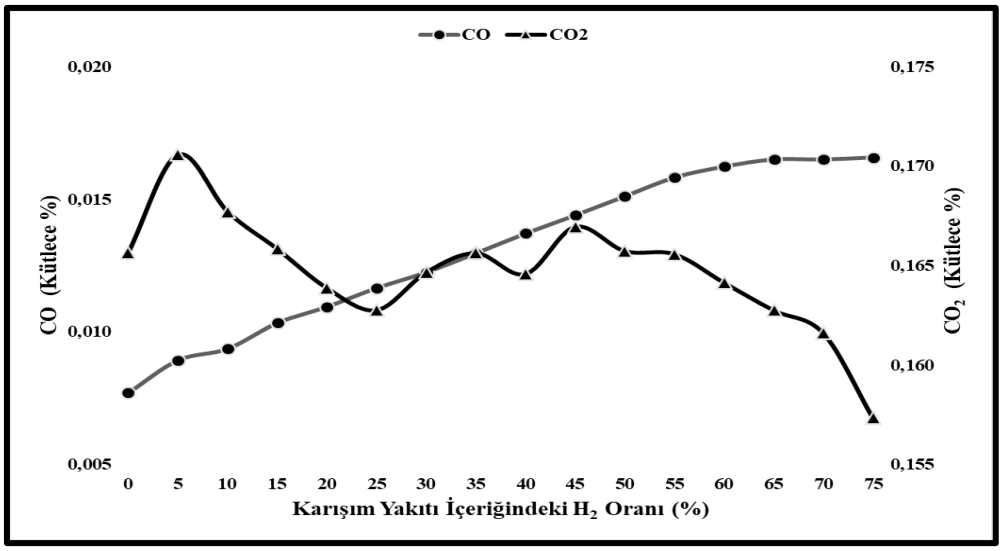


Şekil 5.12. Yanma HAD görüntüsü ((a): %0, (b): %5, (c): %15, (d): %25, (e): %35, (f): %45, (g): %55, (h): %65, (i): %75)

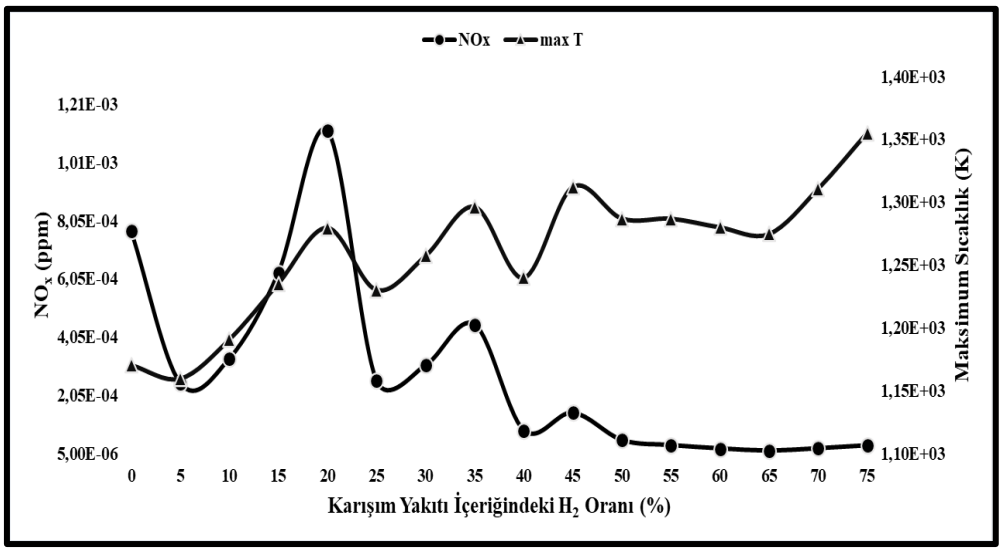
Çizelge 5.5. Yanma odası sıcaklık HAD tahmin değerleri

Deney No	*Ölçüm Noktası 1(K)*	*Ölçüm Noktası 2(K)*	*Ölçüm Noktası 3(K)*	*Ölçüm Noktası 4(K)*
1	968.4	691.0	642.7	609.1
2	985.0	692.2	648.5	638.6
3	996.5	694.1	650.2	643.1
4	1004.3	695.3	652.5	646.2
5	1019.5	698.1	660.9	656.8
6	1030.6	707.0	668.7	664.9
7	1044.4	740.3	689.5	678.5
8	1061.2	758.2	693.9	684.2
9	1079.8	778.6	710.8	711.9
10	1094.5	796.3	738.7	735.8
11	1104.2	819.4	753.9	753.2
12	1123.0	853.3	788.5	784.4
13	1134.7	876.8	826.7	811.5
14	1152.2	912.2	877.0	850.4
15	1176.7	953.2	912.5	894.7
16	1218.7	1025.5	984.7	968.5

Yanma odası içerisindeki karbon emisyonları Şekil 5.13'te, azot oksit emisyonları ise Şekil 5.14'te de gösterilmiştir. Yakıt içerisindeki H_2 oranındaki artış yanma odası sıcaklığını artırarak hem karbon emisyonlarında hem de azot oksit emisyonunda azalma eğilimi göstermiştir.



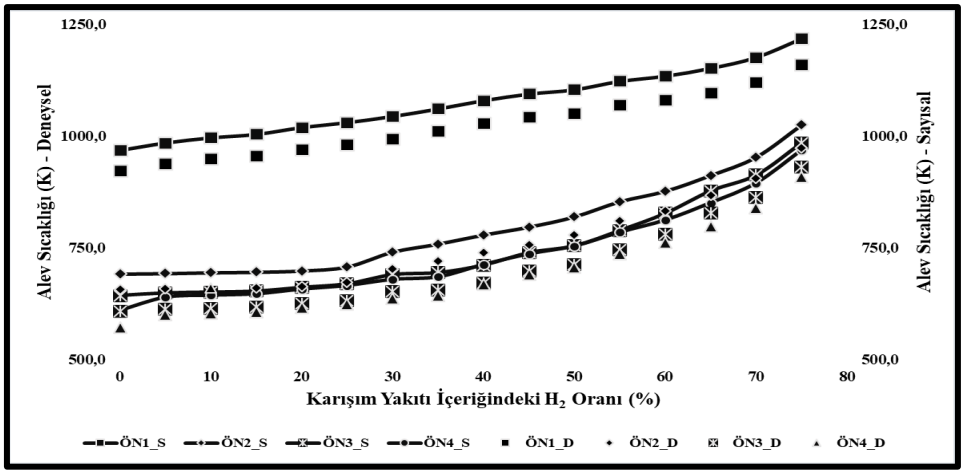
Şekil 5.13. Yanma odası içerisindeki karbon emisyonu değişimi



Şekil 5.14. Yanma odası içerisindeki azot oksit emisyonu değişimi

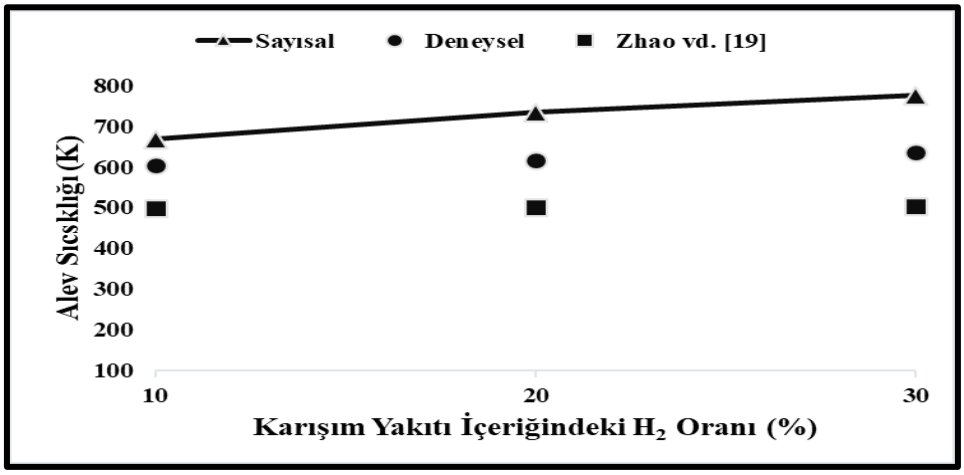
Şekil 5.15'te yakıt içerisindeki H_2 oranına göre sıcaklık değişimi gösterilmiştir. Sayısal modellemede deneysel ölçüm değerlerine en yakın olan eşdeğerlik oranı 0.7'de çalışma yapılmıştır. Deneysel verilerde %100 CH_4 içeren yakıtın yakılmasında 571.1 K alev sıcaklığı değeri ölçülürken bu değer %25 CH_4 - %75 H_2 içeren yakıtta

908.1 K olarak ölçülmüştür. Sayısal modellemede ise alev sıcaklık tahmin değerleri sırasıyla 609.1 K ve 968.5 K'dir. Bu sıcaklık değerleri, hidrojence zengin karışımların daha yüksek yanma sıcaklıkları sağladığını doğrulamaktadır. Bu durum, yanma sürecinde enerjinin daha yoğun bir şekilde açığa çıkmasına olanak tanıyarak yüksek enerji verimliliği sunmaktadır.



Şekil 5.15. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre sıcaklık değişimi

Yapılan deney ve sayısal modelleme sonucunda elde edilen veriler literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.16). Deneysel verilerin diğer çalışmalarla uyumlu olması, çalışmanın güvenilirliğini artırmakta ve bulguların doğruluğunu desteklemektedir. Bu karşılaştırma, çalışmanın uluslararası literatürdeki benzer araştırmalarla örtüştüğünü ve sonuçlarının geçerliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 5.16. Deneysel ve sayısal verilerin literatürde doğrulanması

5.2. Hidrojen Yakıt İlaveli Yanma

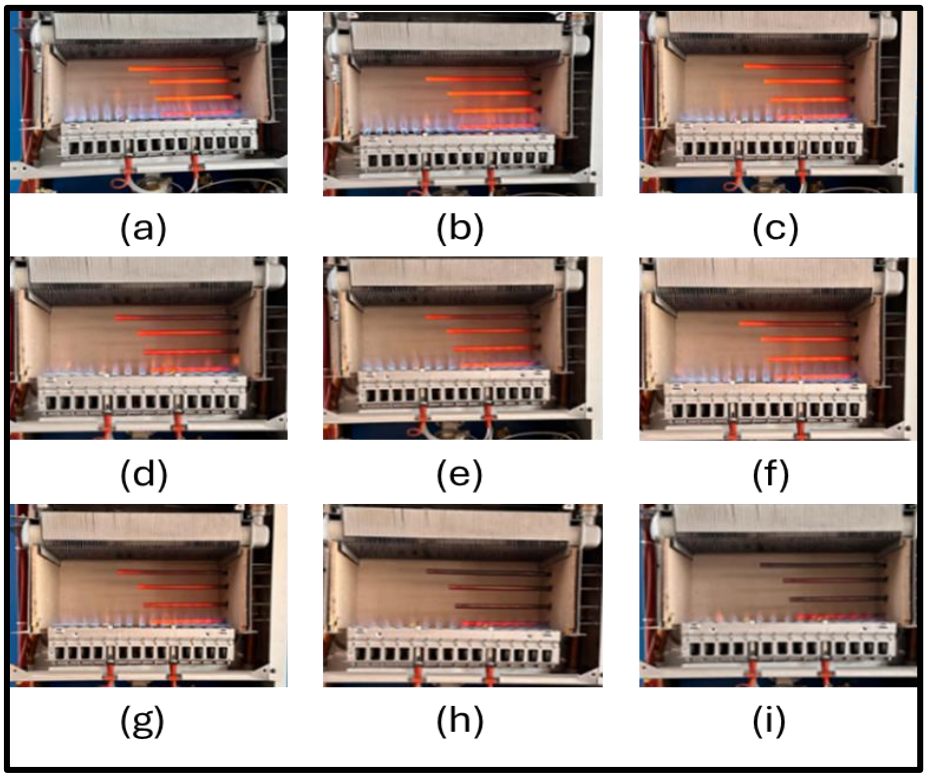
Çalışmada kombi ısıl gücü 20 kW'ta sabit tutulmuştur. Karışımdaki CH_4 hacimce %5 değerinde azaltılarak aynı oranda hidrojen ilave edilmiştir. Deney, yakıt karışımı %60 CH_4 - %40 H_2 olana kadar devam etmiştir. Hava debisi ayarlanamadığı için hava/yakıt oranı değişim göstermiştir.

Çizelge 5.6'da deneyde kullanılan CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve yakıt karışımındaki H_2 gazının yüzdesel değeri verilmiştir.

Çizelge 5.6. CH_4 ve H_2 gazlarının hacimsel debileri ve H_2 gazının yüzdesel değeri

Deney No	*CH_4 (%)*	*CH_4 (Sl/dk)*	*H_2 (Sl/dk)*	*H_2 (%)*
1	100	39.78	0.00	0
2	95	37.78	1.99	5
3	90	35.80	3.98	10
4	85	33.82	5.97	15
5	80	31.82	7.96	20
6	75	29.83	9.95	25
7	70	27.85	11.93	30
8	65	25.85	13.92	35
9	60	23.87	15.91	40

Şekil 5.17'de karışım yakıtı içerisindeki hidrojen yüzdesine göre yanma esnasında oluşan alevin görünümü verilmiştir. Hidrojen oranı arttıkça, karışımın alt ısıl değeri ve hava/yakıt oranı düşmektedir. Bu da ihtiyaç duyulan hava miktarında azalmaya neden olmaktadır. Ancak kombinin fan hızı sabit olduğu için hava debisi değiştirilememektedir. Bu durumda gerekli hava debisi ihtiyacın üzerinde kalması sonucunda hava fazlalık katsayısı artmış ve alev sıcaklığı azalmıştır. Yakıt içerisindeki H_2 %0'da alev rengi turuncuyken %40'ta alev renksizleşmekte ve bu noktadan sonra yanma odası sıcaklığı düşmektedir.



Şekil 5.17. Yakıt içerisindeki hidrojen değerine göre alev görünümü ((a): %0, (b): %5, (c): %10, (d): %15, (e): %20, (f): %25, (g): %30, (h): %35, (i): %40)

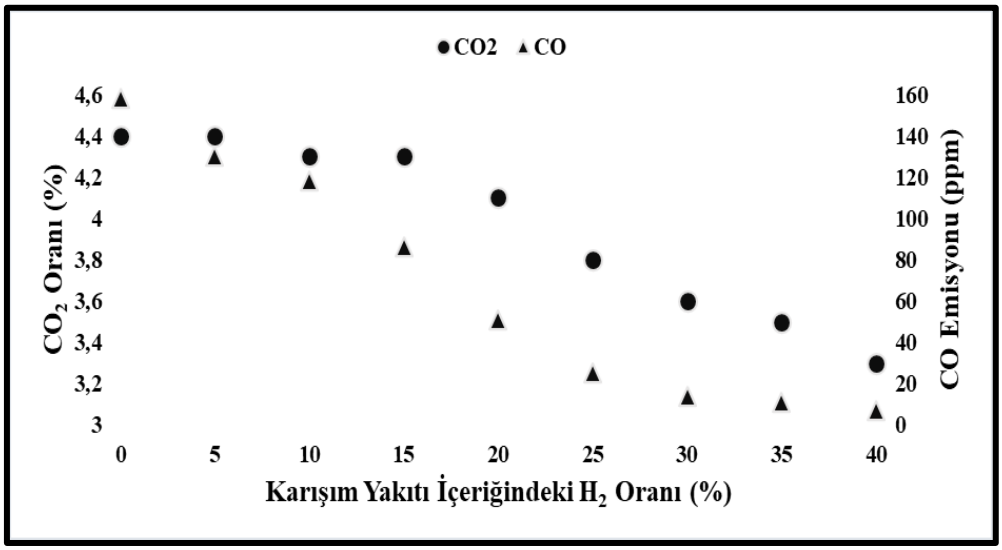
Yanma odası sıcaklık ölçüm değerleri Çizelge 5.7'de, baca gazı sıcaklık ve emisyon değerleri de Çizelge 5.8'te verilmiştir.

Çizelge 5.7. Yanma odası sıcaklık ölçüm değerleri

Deney No	*Ölçüm Noktası 1(K)*	*Ölçüm Noktası 2(K)*	*Ölçüm Noktası 3(K)*	*Ölçüm Noktası 4(K)*
1	1136.4	1080.0	1066.0	1057.3
2	1138.4	1092.2	1075.6	1065.4
3	1143.3	1098.3	1089.0	1078.6
4	1145.9	1107.5	1097.9	1086.2
5	1151.8	1113.0	1107.0	1102.9
6	1160.1	1116.4	1109.3	1103.1
7	1163.6	1117.9	1111.4	1104.3
8	1166.2	1119.5	1116.5	1110.9
9	1167.7	1124.4	1121.9	1119.2

Çizelge 5.8. Baca gazı ölçüm değerleri

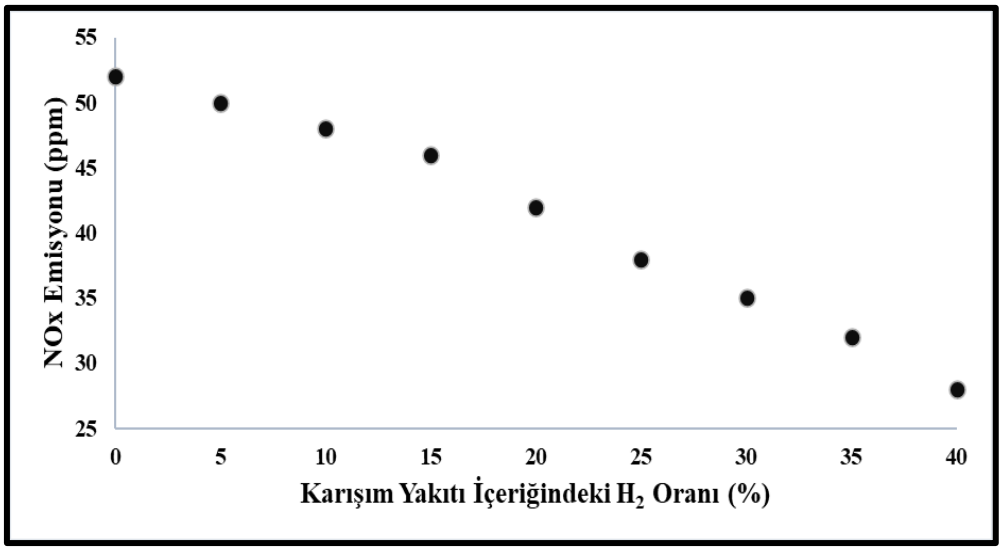
Deney No	*CO_2 (%)*	*CO (ppm)*	*NO_x (ppm)*	*Tbaca (K)*
1	4.4	158	52	325.0
2	4.4	130	50	326.8
3	4.3	118	48	327.0
4	4.3	86	46	327.2
5	4.1	51	42	327.6
6	3.8	25	38	328.0
7	3.6	14	35	325.5
8	3.5	11	32	323.2
9	3.3	7	28	322.3



Şekil 5.18. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonu değişimi

Şekil 5.18'te yakıt içindeki hidrojen oranına göre karbon emisyonunun değişimi gösterilmiştir. Karışım içerisinde H_2 oranının artması ve CH_4 oranının azalmasıyla yani karışımda karbon temelli yakıtın azalması sonucunda, CO miktarının 158 ppm seviyelerinden 7 seviyesine indiği ve CO_2 oranının da %4.4'ten %3.3 değerine düştüğü görülmüştür. Böylelikle CO emisyonunda %96, CO_2 emisyonunda ise %25 azalma ölçülmüştür. Hidrojen oranının artması, karbon içerikli yakıt oranını düşürdüğü için karbon emisyonları belirgin şekilde azalmıştır. Bu, hidrojen ilaveli yakıtların çevresel avantajlarını göstermektedir.

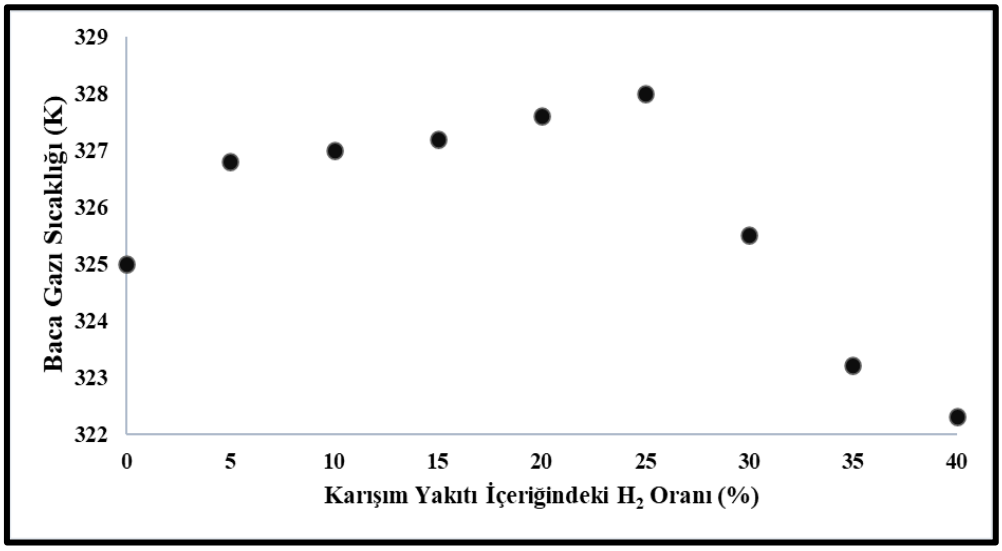
Şekil 5.19'da azot oksit (NO_x) emisyon değerlerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre azotoksit emisyonu değişimi

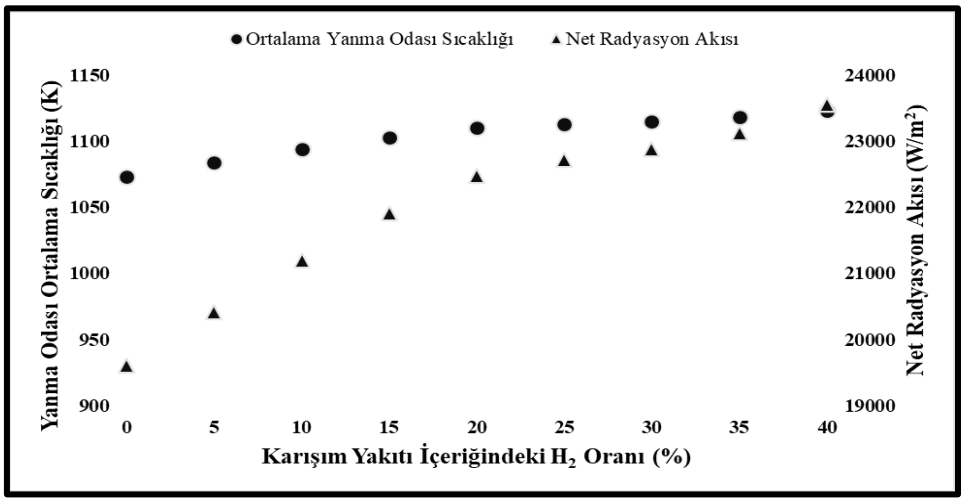
Yakıt içerisindeki CH_4 oranı azalması ve yanma reaksiyonu için gerekli olan stokiyometrik hava miktarının üzerine çıkılması ile yanma odasında alev sıcaklığında düşüş meydana gelmektedir. Bu durum hava içerisindeki azot moleküllerini herhangi bir reaksiyona girdirmeyerek NO_x oluşumunu %46 oranında azaltmıştır.

Yakıt içerisindeki H_2 oranında %25 seviyelerine kadar olan artış yanma odası sıcaklığında artışa neden olarak atık gaz sıcaklığını (Şekil 5.20) artırmaktayken bu orandan sonra CH_4 oranındaki azalışın ve reaksiyona giren hava/yakıt orananındaki artışın yanma odası sıcaklığını düşürmesi sonucu atık gaz sıcaklık değeri azalmaktadır.



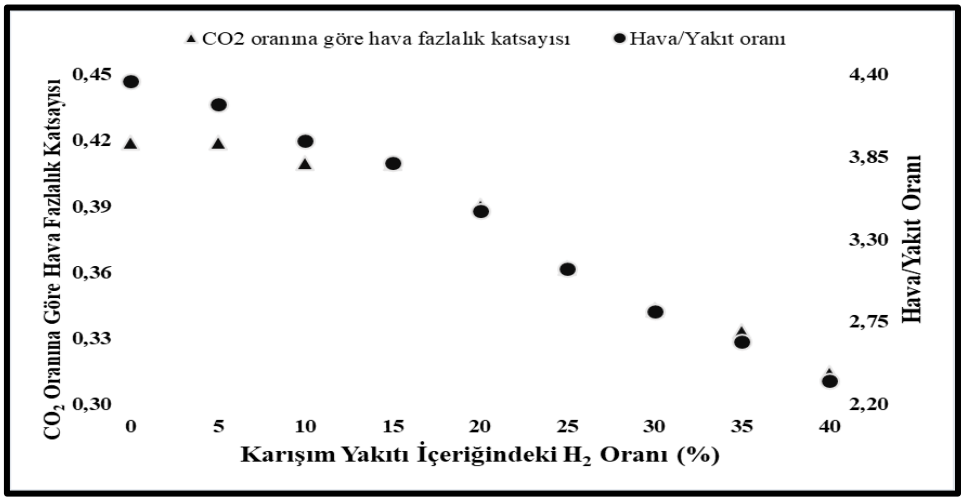
Şekil 5.20. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre baca gazı sıcaklığı değişimi

Şekil 5.21'da P1 radyasyon modeli kullanılarak hesaplanan net radyasyon akıları, H_2-CH_4 karışımının yanması sırasında yanma odasında oluşan ortalama gaz sıcaklıklarına bağlı olarak analiz edilmiştir. Gaz sıcaklığı arttıkça radyasyon akısı önemli ölçüde yükselmektedir. Hidrojen, metana kıyasla daha yüksek bir ısıl değere sahiptir ve yanma sırasında daha yüksek alev sıcaklıklarına ulaşır. Bu, karışımın yanması sırasında radyasyon akısının artmasını açıklar.



Şekil 5.21. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre radyasyon akısı değişimi

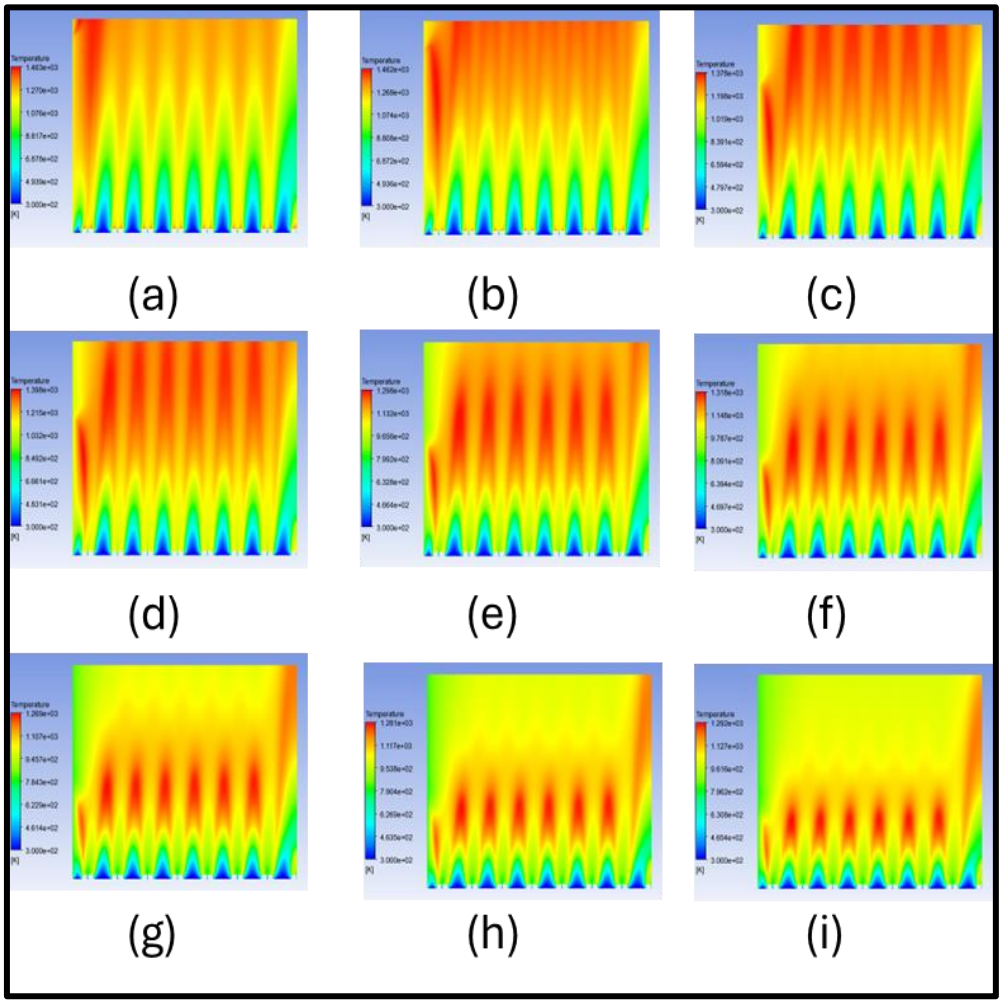
Şekil 5.22'de baca gazı içerisinde bulunan CO_2 oranına göre hava/yakıt oranındaki değişim gösterilmiştir. Karışım yakıtının toplam debisinin sabit tutulması ve hava oranının artması ile hava/yakıt oranında düşme görülmektedir.



Şekil 5.22. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre hava/yakıt oranı değişimi

Sistemin bir hesaplamalı akışkanlar mekaniği (HAD) programı olan ANSYS Fluent ile modellenmesinin görüntüsü Şekil 5.23'te gösterilmiştir. Analizde realizable κ-ε türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli, P1 radyasyon modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH_4 ile 9 basamaklı H_2 yanma reaksiyonları kullanılmıştır [76, 77].

Hidrojen oranı arttıkça yanma reaksiyonu için ihtiyaç duyulan hava miktarı azalmaktadır. Deneysel çalışma sırasında hava debisinin ihtiyacının üzerinde kalması nedeniyle modellemede eşdeğerlik oranı sabit olmamış, 0.23'ten 0.42 değerine kadar arttırılmıştır. Bu modellemenin sayısal analiz sonuçları da Çizelge 5.10'da verilmiştir.

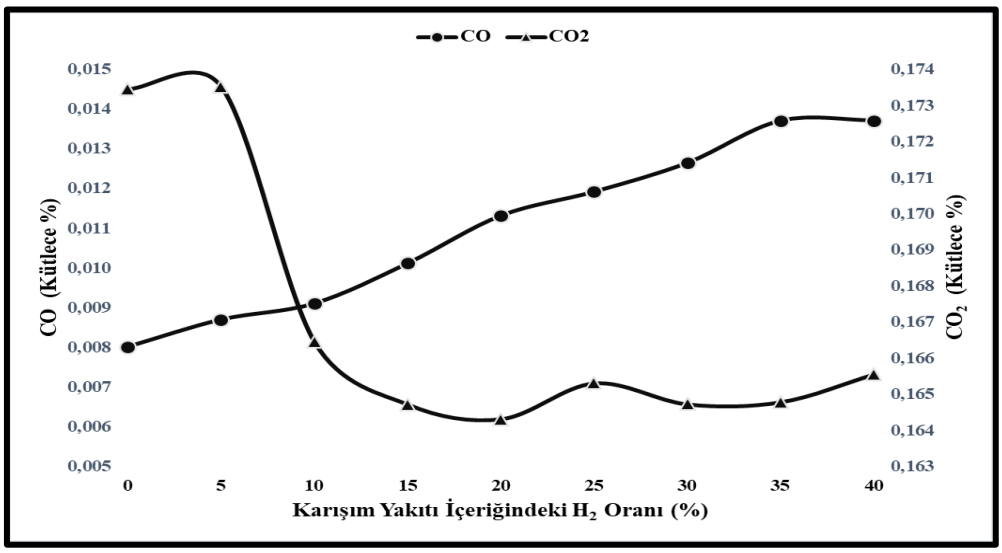


Şekil 5.23. Yanma HAD görüntüsü ((a): %0, (b): %5, (c): %10, (d): %15, (e): %20, (f): %25, (g): %30, (h): %35, (i): %40)

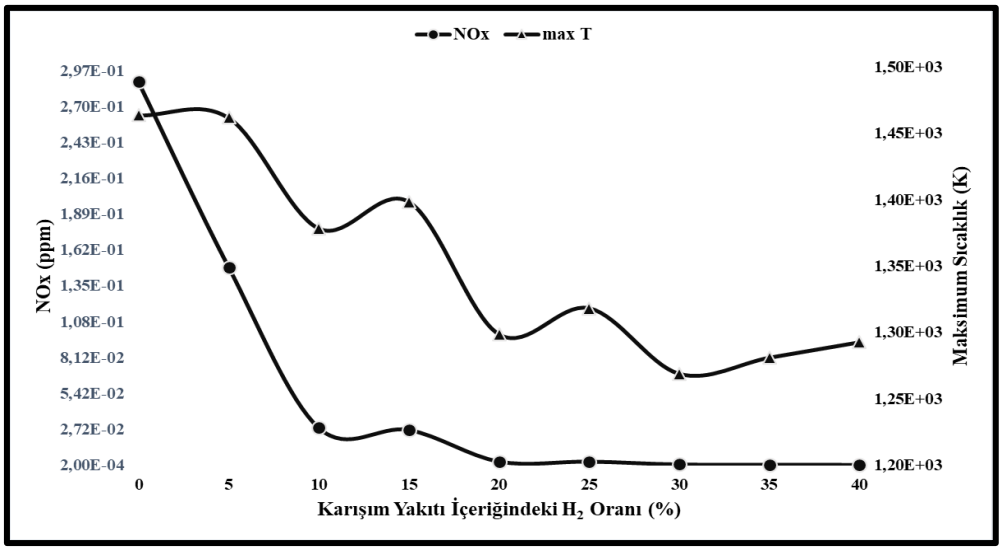
Çizelge 5.10. Yanma odası sıcaklık HAD tahmin değerleri

Deney No	*γ*	*Ölçüm Noktası 1(K)*	*Ölçüm Noktası 2(K)*	*Ölçüm Noktası 3(K)*	*Ölçüm Noktası 4(K)*
1	0.23	1152.8	1104.2	1097.2	1095.0
2	0.24	1154.8	1116.6	1107.1	1103.3
3	0.25	1159.8	1122.9	1120.9	1117.0
4	0.26	1162.4	1132.3	1130.0	1124.9
5	0.29	1168.4	1137.9	1139.4	1142.2
6	0.32	1176.8	1141.4	1141.8	1142.4
7	0.36	1180.4	1142.9	1143.9	1143.6
8	0.38	1183.0	1144.5	1149.2	1150.5
9	0.42	1184.5	1149.6	1154.7	1159.1

Yanma odası içerisindeki karbon emisyonları Şekil 5.24'te, azot oksit emisyonları ise Şekil 5.25'te de gösterilmiştir. Yakıt içerisindeki H_2 oranındaki artış yanma odası sıcaklığını artırarak hem karbon emisyonlarında hem de azot oksit emisyonunda azalma eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.24. Yanma odası içerisindeki karbon emisyonu değişimi

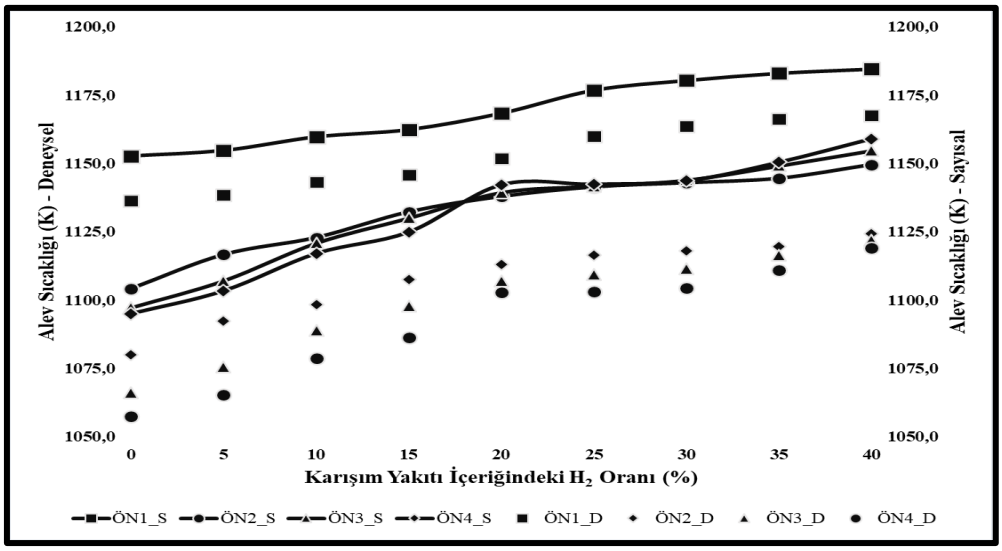


Şekil 5.25. Yanma odası içerisindeki azot oksit emisyonu değişimi

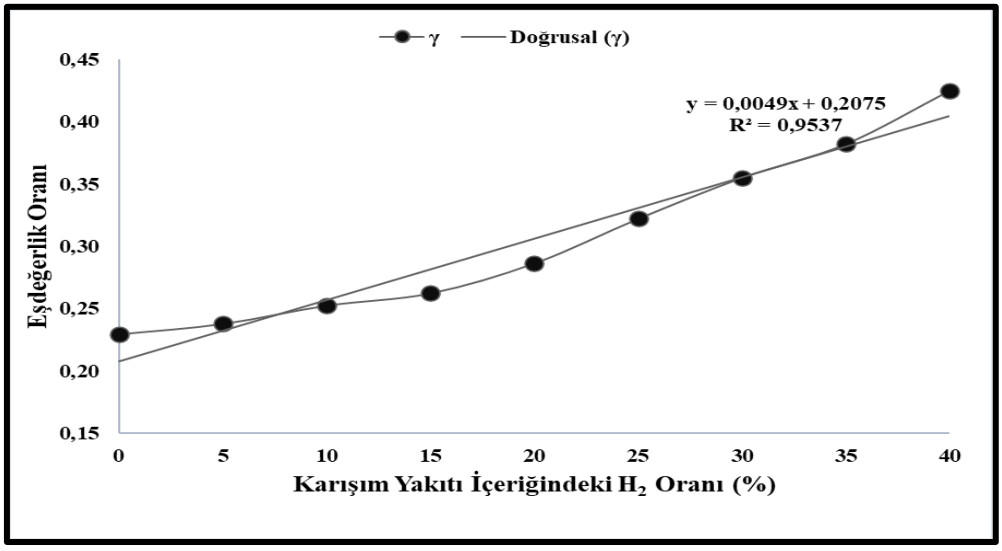
Şekil 5.26'da yakıt içerisindeki H_2 oranına göre sıcaklık değişimi gösterilmiştir. %60 CH_4 - % 40 H_2 yakıt karışımına kadar alev sıcaklığında lineer bir artış meydana gelerek 1160 K (en üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktası (ÖN_4)) seviyelerine çıkmaktadır. H_2 oranı %40'ı aştıktan sonra ise alev sıcaklığı, reaksiyona giren hava miktarındaki artışa bağlı olarak azalarak sönme meydana gelmiştir. Bu durum, yakıt karışımındaki hidrojeni artırmanın belli bir noktaya kadar sıcaklık artışı sağladığını, ancak hava fazlalık katsayısının artışıyla sıcaklığın tekrar azaldığını ortaya koymaktadır. Bu eğilim, fazla hava ile yanmanın sıcaklık kontrolü için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Şekil 5.27'de yakıt içerisindeki H_2 oranına göre eşdeğerlik oranı değişimi verilmiştir. Eşdeğerlik oranı, hidrojen oranı arttıkça azalma eğilimindedir. Bu durum, yanma sürecinde ihtiyaç duyulan hava miktarının hidrojen ilavesi ile azaldığını ve daha düşük eşdeğerlik oranlarıyla daha verimli yanma sağlanabildiğini göstermektedir. Hidrojenin stokiyometrik olarak daha az hava gerektirmesi, yakıt karışımının yanma verimliliğini artıran bir diğer etkendir. Buna göre elde edilen eğri formülü Eşitlik 5.1'deki gibidir.

$$y = 0.4923x + 0.2075 \quad (5.1)$$

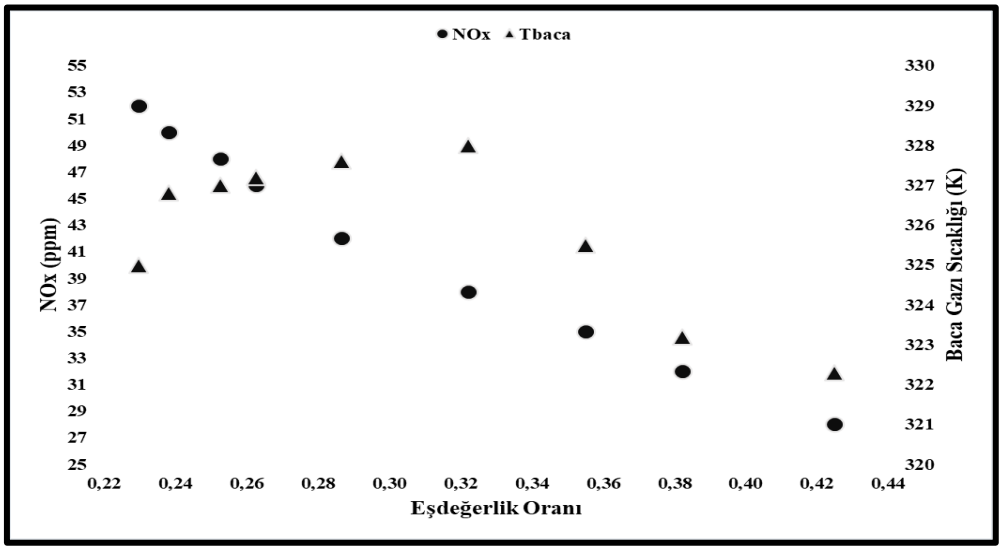


Şekil 5.26. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre sıcaklık değişimi



Şekil 5.27. Yakıt içerisindeki hidrojen oranına göre eşdeğerlik oranı değişimi

Şekil 5.28'te eşdeğerlik oranına göre baca gazı sıcaklığının ve azot oksit emisyonunun değişimi gösterilmiştir. Sabit debili karışım yakıtındaki H_2 içeriğinin artışı ihtiyaç duyulan hava miktarını azaltmaktadır. Bu durumda hava/yakıt oranı düşmekte eşdeğerlik oranı da artmaktadır. Çalışmada kullanılan kombi sabit fan debili olduğu için ihtiyaç duyulan hava miktarı ayarlanamamaktadır. Eşdeğerlik oranındaki artış yanma odası sıcaklığını azaltırken bu durum hem baca gazı sıcaklığında hem de azot oksit emisyonuna yansımaktadır.



Şekil 5.28. Eşdeğerlik oranına göre baca gazı sıcaklığı - azot oksit emisyonu değişimi

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hidrojenin yenilenebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak kullanımı, özellikle karbon emisyonlarını azaltma hedefleri doğrultusunda oldukça önemlidir. Bu çalışma, konutlarda yaygın olarak kullanılan kombilerde hidrojenin doğal gazla karıştırılarak kullanılabilirliğini test ederek enerji ve çevre alanlarında değerli bilgiler sağlamaktadır.

Çalışmada sayısal modelleme için ANSYS Fluent yazılımının kullanılması ve deneysel sonuçlarla doğrulanması, modelin güvenilirliğini ve elde edilen sonuçların geçerliliğini artırmaktadır. Çalışmada kullanılan türbülans ve yanma modelleri (realizable κ-ε türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli, P1 radyasyon modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiği), hidrojen ve metan gazlarının yanma davranışlarının detaylı bir şekilde simüle edilmesini sağlamaktadır. Çeşitli hidrojen-metan karışımlarının analiz edilmesi, değişik oranların emisyon ve sıcaklık değerleri üzerindeki etkilerini açıkça göstermiştir.

Bulgular, hidrojen oranının artırılmasıyla yanma sıcaklıklarının düştüğünü ve karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2) ve azot oksit (NO_x) emisyon değerlerinin değiştiğini göstermektedir. Özellikle CO emisyonlarındaki ciddi düşüş, hidrojenin yanma verimliliğini ve temizliğini desteklemektedir. NO_x emisyonlarındaki artış, yanma sıcaklığının düşük olmasına rağmen önemli bir bulgudur ve bu durum daha fazla analiz gerektirebilir.

Bu çalışma, hidrojenin doğal gaz ile birlikte güvenli ve verimli bir şekilde kullanılabileceğine dair literatürde mevcut bilgileri genişletmektedir. Çalışmanın, hem enerji güvenliği hem de karbon emisyonlarının azaltılması için stratejik bir yaklaşımla ele alınmış olması literatüre önemli bir katkı sağlar.

Bu çalışmanın bulguları, enerji sektöründe çevre dostu bir alternatif olarak hidrojenin yaygınlaştırılmasına yönelik fizibilite analizlerinde referans niteliği taşımaktadır. Özellikle düşük karbonlu ve yeşil enerji politikalarının benimsenmesi doğrultusunda, hidrojenin enerji maliyetleri üzerindeki etkilerinin ve karbon ayak izini azaltma potansiyelinin değerlendirilmesi önerilmektedir.

Bu tez çalışmasında, hermetik tip gaz yakıcı cihazlarda hidrojenin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Tez kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- Hidrojen yakıt destekli çalışmada, CH_4 miktarı 20 Sl/dk değerinde sabit tutulmuş, oluşturulan yakıt karışımında hidrojen, hacimce %0 ile %75 arasında %5'erlik artışlarla eklenmiştir. Sayısal analizde realizable κ-ε türbülans modeli, Eddy-dissipation yanma modeli ve Gri-Mech 3.0 kimyasal kinetiğinde 4 basamaklı CH_4 ile 9 basamaklı H_2 yanma reaksiyonları kullanılmıştır. Kombinin ısıl güç değeri 13 kW'tan 24.75 kW'a değişim göstermiştir. En üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktasında alev sıcaklık değerleri deneysel çalışmada %100 CH_4 içeren yakıt karışımında 571.1 K'den %25 CH_4 - %75 H_2 yakıt karışımında 908.1 K'e yükselmiştir. Sayısal modellemesinde ise bu değerler sırasıyla 609.1 K ve 968.5 K'dir. Deney sırasında yapılan emisyon değerleri ölçümünde karbon monoksit oranı 15 ppm'den 3 ppm seviyesine inmiş, karbon dioksit oranı %2.6 'dan %4.5 değerlerine, azot oksit oranı ise 10 ppm seviyesinden 21 ppm seviyesine yükselmiştir.
- Hidrojen yakıt ilaveli çalışmada, kombi ısıl gücü 20 kW'ta sabit tutulmuştur. Karışımdaki CH_4 hacimce %5 değerinde azaltılarak aynı oranda hidrojen ilave edilmiştir. Deney, yakıt karışımı %60 CH_4 - %40 H_2 olana kadar devam etmiştir. Bu orandan sonra alev sıcaklığı azalarak sönmeye başlamıştır. Hidrojen oranı arttıkça yanma reaksiyonu için ihtiyaç duyulan hava miktarı azalmaktadır. Sabit fan hızlı kombide hava debisi tüm yakıt karışımlarında aynı oranda kalması nedeniyle hava fazlalık katsayısındaki artış alev sıcaklığını azalmıştır. Çalışmanın modellenmesi ANSYS Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizde eşdeğerlik oranı 0.23'ten 0.42'ye doğru değişim göstermiştir. En üst seviyedeki (12 cm) ölçüm noktasında alev sıcaklık değerleri deneysel çalışmada %100 CH_4 içeren yakıt karışımında 1136.4 K'den %60 CH_4 - %40 H_2 yakıt karışımında 1167.7 K'e, sayısal modellemede ise bu değerler sırasıyla 1152,8 K'den 1184.5 K'e artmıştır. Deney sırasında yapılan emisyon değerleri ölçümünde karbon monoksit oranı 158 ppm'den 7 ppm seviyesine, karbon dioksit oranı %4.4'ten %3.3 değerine, düştüğü görülmüştür. Böylelikle CO emisyonunda %96, CO_2 emisyonunda ise %25 azalma ölçülmüştür. NO_x oluşumunu %46 oranında azaltmıştır.
- Bu çalışma evsel tip ısınma ve sıcak su ihtiyacını karşılanmasında kullanılan kombilerde hidrojenin doğal gaz ile beraber kullanılabilirliğini göstermektedir. Hidrojen, doğal gaza göre daha düşük hacimsel ısıtma değerine sahip olsa da, benzer

Wobbe İndeksi değerine [42] sahiptir. Bu durum yanma sisteminde kullanılan atmosferik tip brülörlerin ısıtma yükü üzerindeki etkisini minimuma indirmektedir. Böylece hidrojenin doğal gaz boru hatları ile taşınmasıyla patlama riskini ortadan kaldıracaktır. Doğalgaz-Hidrojen karışımındaki hidrojen oranının artışı doğal gaz miktarında tasarruf sağlayacaktır. Doğal gazda dışa bağımlı ülkelerde temiz yakıt olarak kullanılabilecek hidrojenin sera gazı emisyonlarının yanı sıra ekonomiye de katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Hidrojenin kombilerde ve diğer sistemlerde kullanılabilirliğinin geliştirilmesine katkı sağlayarak, daha sürdürülebilir bir enerji geçişi için rehberlik etmesi için birkaç öneride bulunulmuştur. Öneriler şöyle özetlenebilir:

- Türkiye'nin gelecek 10 yıllık hedeflerinde doğal gaza hidrojenin kademeli olarak karıştırılması bulunmaktadır. Bunun gerçekleştirilmesi için temiz hidrojenin üretilmesi gerekmektedir. Karadeniz tabanında yer alan hidrojen sülfür ve diğer hidrokarbon rezervleri (petrol, doğal gaz, gaz hidrat) ekonomik açıdan değerlendirilebilecek önemli bir potansiyeldir. Burada kurulacak deniz üstü tesislerde rüzgâr ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak hidrojen sülfürden temiz hidrojen eldesi mümkün olabilir [80].
- Türkiye'de hidrojenin doğal gaz boru hatları üzerinden iletilmesi, doğal gazda dışa bağımlılığı azaltabilir. Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş enerjisi potansiyeli, hidrojen üretiminde kullanılabilir. Dünya genelinde ise, hidrojenin küresel ölçekte üretim ve taşınma maliyetleri, temiz hidrojen teknolojilerinin gelişimini hızlandırabilir.
- Bu çalışma, NO_x emisyonlarının hidrojen oranıyla arttığını göstermektedir. Gelecek çalışmalar, NO_x emisyonlarını azaltmayı hedefleyen farklı brülör tasarımları veya emisyon kontrol teknolojileri üzerine odaklanabilir. Ayrıca, farklı yanma modelleri ile hidrojenin yanma karakteristikleri ve NO_x üretimi arasındaki ilişkiler araştırılabilir.
- Hidrojen üretim maliyetleri düşürülmeden geniş ölçekli bir uygulama yapılması zordur. Bu sebeple, hidrojen-doğal gaz karışımlarının ekonomik analizleri yapılmalı ve maliyet-etkin modeller geliştirilmelidir. Türkiye gibi doğal gaz ithalatı yüksek olan ülkelerde hidrojen kullanımıyla elde edilebilecek tasarruf miktarları hesaplanarak ekonomik fizibilite çalışmaları yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Kanoğlu, M., Çengel, Y.A., and Cimbala, J.M. (2020). *Fundamentals and applications of renewable energy*. First Edition, McGraw-Hill.

2. Omar, M,A., Altınışık, K., Sertkaya, A,A., ve Adıgüzel, N. (2016). Bir konutun ısı enerjisi ihtiyacının yoğuşmalı ve konvansiyonel kombi kullanılarak karşılanmasının ekonomik analizi. *Muğla Journal of Science and Technology,* 2(1), 38-42.

3. Koca, T., ve Aksungur, S. (2018). Hermetik ve yoğuşmalı kombi cihazlarının performanslarının deneysel olarak karşılaştırılması. *Mesleki Bilimler Dergisi*, 7(2), 181-186.

4. Variyenli, H., Afshari, F., and Khanlari, A. (2019). Investigating environmental effects of different combi boilers using LPG. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 6(3), 681-690.

5. Variyenli, H., and Khanlari, A. (2020). Analyzing the environmental effects of conventional and condensing combi boilers using natural gas. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1277-1284.

6. Manimaran, R. (2021). Numerical investigations of hydrogen and air mixture with vortex tube and duct combinations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (36), 19140-19157.

7. Salem, E. (2018). *Numerical simulations of premixed flames of multi component fuels/air mixtures and their applications*. Theses and Dissertations--Mechanical Engineering 132, University of Kentucky, USA.

8. Araoye, A.A., Abdelhafez, A., Nemitallah, M.A., Habib, M.A., and Ben-Mansour, R. (2021). Experimental and numerical investigation of stability and emissions of hydrogen-assisted oxymethane flames in a multi-hole model gas-turbine burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (38), 20093-20106.

9. Ortiz-Imedio, R., Ortiz, A, Urroz, J.C., Dieguez, P.M., Gorri, D., Gandia, L.M., and Ortiz, I. (2021). Comparative performance of coke oven gas, hydrogen and methane in a spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 17572-17586.

10. Bai, N.J., Fan, W.J., Zhang, R.C., Zou, Z.P., Zhang, C.X., and Yan, P.L. (2021). Numerical investigation into the structural characteristics of a hydrogen dual-swirl combustor with slight temperature rise combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (43), 22646-22658.

11. Zhao, Y., McDonnell, V., and Samuelsen, S. (2020). Assessment of the combustion performance of a room furnace operating on pipeline natural gas mixed with simulated biogas or hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy,* 45(19), 11368-11379.

12. Mayrhofer, M., Hochenauer, C., Koller, M., Seemann, P., and Prieler, R. (2021). Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (41), 21672-21686.

13. Boulahlib, M.S., Medaerts, F., and Boukhalfa, M.A. (2021). Experimental study of a domestic boiler using hydrogen methane blend and fuel-rich staged combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 37628-37640.

14. Çeper, B.A. (2012). Use of hydrogen-methane blends in internal combustion engines. In (Ed.), *Hydrogen Energy-Challenges and Perspectives, IntechOpen*. https://doi.org/10.5772/50597.

15. Sandalcı T., Işın, Ö., Galata, S., Karagöz, Y., and Güler, İ. (2019). Effect of hythane enrichment on performance, emission and combustion characteristics of an ci engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 3208-3220.

16. Riahi, Z., Hraiech, I., Sautet, J.C., and Nasrallah, S.B. (2022). Experimental and numerical study of oxidant effect on hythane combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 8105-8117.

17. Amez, I., Castells, B., Llamas, B., Bolonio, D., GarcíaMartínez, M.J., Lorenzo, J.L., García-Torrent, J., and F. Ortega, M. (2021). Experimental study of biogas–hydrogen mixtures combustion in conventional natural gas systems. *Applied Science*, 11, 6513.

18. Yılmaz, İ., Taştan, M., İlbaş, M., and Tarhan, C. (2012). Investigation of hydrogen usage in aviation industry. *Energy Conversion and Management*, 63, 63-69.

19. Yılmaz, İ., Taştan, M., İlbaş, M., and Tarhan, C. (2013). Effect of turbulence and radiation models on combustion characteristics in propane–hydrogen diffusion flames. *Energy Conversion and Management*, 72, 179-186.

20. İlbaş, M., and Karyeyen, S. (2015). A numerical study on combustion behaviors of hydrogen-enriched low calorific value coal gases. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 15218-15226.

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

22. İlbaş, M., and Karyeyen, S. (2017). An experimental and numerical study on turbulent combustion of hydrogen-rich coal gases in a generated non-premixed burner. *Fuel*, 194, 274-290.

23. İlbaş, M., Şahin, M., and Karyeyen, S. (2018). 3D numerical modelling of turbulent biogas combustion in a newly generated 10 KW burner. *Journal of the Energy Institute*, 91, 87-99.

24. Karyeyen, S., and İlbaş, M. (2020). Application of distributed combustion technique to hydrogen-rich coal gases: A numerical investigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 3641-3650.

25. İlbaş, M., Kekul, O., Bektaş, A., and Karyeyen, S. (2022). Oxidizer effects on ammonia combustion using a generated non-premixed burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 12317-12337.

26. İlbaş, M., and Şahin, M. (2017). Effects of turbulator angle and hydrogen addition on a biogas turbulent diffusion flame. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 25735-25743.

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

28. Karyeyen, S., and İlbaş, M. (2018). Experimental and numerical analysis of turbulent premixed combustion of low calorific value coal gases in a generated premixed burner. *Fuel*, 220, 586-598.

29. Yılmaz, İ., Yılmaz, H., Cam, Ö., and İlbaş, M. (2018). Combustion characteristics of premixed hydrogen/air flames in a geometrically modified micro combustor. *Fuel*, 217, 536-543.

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

31. İlbaş, M., Yılmaz, İ., and Kaplan, Y. (2005). Investigations of hydrogen and hydrogen–hydrocarbon composite fuel combustion and NO_x emission characteristics in a model combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 30, 1139-1147.

32. Yılmaz, İ., and İlbaş, M. (2008). An experimental study on hydrogen–methane mixtured fuels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, 178-187.

33. Yılmaz, İ., Ratner, A., İlbaş, M., and Huang, Y. (2010). Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen–methane fuels in a low swirl burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 329-336.

34. İlbaş, M., Karyeyen, S., and Özdemir, İ. (2015). Investigation of premixed hydrogen flames in confined/unconfined combustors: A numerical study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, 11189-11194.

35. İlbaş, M., Karyeyen, S., and Yılmaz, İ. (2016). Effect of swirl number on combustion characteristics of hydrogen-containing fuels in a combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 7185-7191.

36. İlbaş, M., Crayford, A.P., Yılmaz, İ., Bowen, P.J., and Syred, N. (2006). Laminar-burning velocities of hydrogen–air and hydrogen–methane–air mixtures: An experimental study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1768-1779.

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

38. Howarth, R.W. and Jacobson, M.Z. (2022). Reply to comment on "How Green is Blue Hydrogen?". *Energy Science & Engineering*, 10, 1955-1960.

39. İnternet: Howarth, R.W. (2022). Methane emissions from the production and use of natural gas. *The Magazine for Environmental Managers*. https://www.research.howarthlab.org/documents/Howarth2022_EM_Magazine_methane.pdf (Son Erişim: 09 Kasım 2023)

40. Ozturk, M. and Dinçer, İ. (2020). Development of renewable energy system integrated with hydrogen and natural gas subsystems for cleaner combustion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 83**,** 103583.

41. Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R. and Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A Technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371-1390.

42. Dinçer, İ., Javani, N., Sorgulu F. ve Öztürk M. (2021). Türkiye'de yeşil hidrojenin üretilip doğal gaza karıştırılması çalışmaları. *Hidrojen Teknolojileri Derneği*. https://www.hidrojenteknolojileri.org/HTD/Yesil_Hidrojenin_Uretilip_Dogal_Gaza_Karistirilmasi_Calismalari.pdf (Son Erişim: 10 Kasım 2023)

43. Leroy, R.L. (1981). Hydrogen injection into gas pipelines and other pressurized containers. US4294274A.

44. Doland, G.J. (2008). System and Method for Energy and Hydrogen Production. US20080127646A1.

45. Egan, G.J., Fulton, J., Marmaro, R.W. and Lynch F.E. (2010). System for blending and compressing gases. US7740031B2.

46. Cargnelli, J. and Joos, N.I. (2015). Electrolyser and Energy System. US2015167182A1.

47. Chen, H., Le, Y., Liu, J., Ma, F. and Pan, X. (2015). Multi-functional natural gas and hydrogen mixing gas station and filling method. CN105090738A.

48. Jackson, T.L. and Pandey, R.N. (2015). Sustainable and Safe Tube for Supplying Gaseous Fuel Such as Lpg, Ng or Hythane. CA2552167C.

49. Hua, C., Yusen ,Y., Bo, X., Zhi, T., Hui, C. and Wang, Z. (2018). A kind of system that gas ductwork is injected using clean energy resource generating electrolytic hydrogen production. CN207166137U.

50. Chen, G., Chen, J., Chen, J., Guo, C., Guo, Y. and Li, K. (2020). Hydrogen-mixed natural gas pipeline valve chamber safe emptying system and method. CN110671605A.

51. Birkitt, K., Loo-Morrey, M., Sanchez, C. and O'Sullivan, L. (2021). Materials aspects associated with the addition of up to 20 mol% hydrogen into an existing natural gas distribution network. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (23), 12290-12299.

52. Zhao, Y., McDonell, S., and Samuelsen, S. (2019). Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cook top burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (23), 12239-12253.

53. Ma, X., Huang, X., and Chang, W. (2018). Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker. *Renewable Energy Resource*, 36 (12), 1746-1751.

54. Ozturk, M., Sorgulu, F., Javani, N., and Dincer, I. (2023). An experimental study on the environmental impact of hydrogen and natural gas blend burning. *Chemosphere*, 329, 138671.

55. Sorgulu, F., Ozturk, M., Javani, N., and Dincer, I. (2023). Experimental investigation for combustion performance of hydrogen and natural gas fuel blends. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 34476-34485.

56. Luo, Z., Xu, H., and Yuan, M. (2019). Safety and emission performance test and evaluation of natural gas mixed with hydrogen combustion on domestic gas appliances. *Chemical Engineering Oil Gas*, 48 (2), 50-56.

57. Choudhury, V.G., McDonell, S., and Samuelsen, S. (2020). Combustion performance of low-NOx and conventional storage water heaters operated on hydrogen enriched natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (3), 2405-2417.

58. Zhan, X., Chen, Z., and Qin, C. (2022). Effect of hydrogen-blended natural gas on combustion stability and emission of water heater burner. *Case Studies in Thermal Engineering*, 37, 102246.

59. Yan, R., Gao, W., Zhang, Y., and Zhang, J. (2018). Combustion performance tests of hydrogen-natural gas mixtures as fuels in domestic gas appliances. *Natural Gas Industry*, 38 (2), 119-124.

60. Appraisal of Domestic Hydrogen Appliances, Frazer-Nash Consultancy, Prepared for the Department of Business (2018). *Energy & Industrial Strategy*, FNC 55089/46433R1.

61. İnternet: On Birinci Kalkınma Planı (2019-2023), *Türkiye Cumhuriyeti Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı*. https://www.sbb.gov.tr/wp-content/uploads/2022/07/On_Birinci_Kalkinma_Plani-2019-2023.pdf (Son Erişim 30 Ağustos 2022)

62. İnternet: Kombi çeşitleri ve kombi çalışma prensibi (2016). https://www.tesisat.org/kombi-cesitleri-kombi-calisma-prensibi.html (Son Erişim: 21 Mayıs 2021)

63. İlbaş, M. (2021). *İleri Hidrojen Teknolojileri Yayımlanmamış Yüksek Lisans - Doktora Ders Notları*. Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

64. Dinçer, İ., Eroğlu İ., ve Öztürk, M. (2021). Türkiye için hidrojen teknolojileri yol haritası. *Hidrojen Teknolojileri Derneği,* İstanbul.

65. Pant, K.K., and Gupta R.B. (2009). Fundamentals and use of hydrogen as a fuel. *Hydrogen Fuel: Production. Transport, and Storage,* 3-32.

66. Dincer, I., ve Acar, C. (2015). Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (34), 11094–11111.

67. İlbaş, M. and Syred, N. *Computer modelling of combustion and nitrogen oxides in a small scale two-inlet cyclone combustor*. First European Conference on Small Burner Technology and Heating Equipment, Switzerland, 269-278.

68. Neale R. Neelameggham, N.R., Subramanıan, G., and Kalamegham, P. (2022). Thermoeconomic dynamics of energy-efficient orange hydrogen production: An energy matter. *Energy Efficiency and Low Carbon Footprint in Metals Processing*, 74 (5), 1923-1931.

69. Dincer, İ. (2020). Covid-19 coronavirus: Closing carbon age, but opening hydrogen age. *International Journal Energy Research*, 44 (8), 6093-6097.

70. İnternet: Greenhouse gases' effect on climate - U.S. *Energy Information Administration (EIA).* https://www.eia.gov/energyexplained/energy-and-the-environment/greenhouse-gases-and-the-climate.php (Son Erişim: 10 Ocak 2021)

71. İnternet: Sierra, C. (2021). Green hydrogen, *Simple Renewables.* https://img1.wsimg.com/blobby/go/98b6ed04-1953-4660-88c0-12a00c34761c/03%20Green%20Hydrogen.pdf (Son Erişim: 16 Temmuz 2022)

72. El-Mahallawy, F., and El-Din Habik, S. (2002). *Fundamentals and Technology of Combustion*. (First Edition). Elsevier.

73. İnternet: Damköhler sayısı. https://www.cfd-online.com/Wiki/Damkohler_number (Son Erişim: 29 Ekim 2022)

74. Yılmaz, H., Karyeyen, S., Tepe, A.Ü., and Brüggemann, D. (2023). Colourless distributed combustion characteristics of hydrogen/air mixtures in a micro combustor. *Fuel*, 332, 126163.

75. ANSYS Inc. (2009). ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide.

76. İlbaş, M., Akyıldız, S., Karyeyen, S., and Aktaş, A. (2023). Conventional and distributed combustion regime on a model thermoelectir generator (TEG) performance using a swirl burner/furnace. *Fuel*, 347, 128487.

77. Cam, O., Yilmaz, H., Tangoz, S., and Yilmaz, I. (2017). A numerical study on combustion and emission characteristics of premixed hydrogen air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 25801-25811.

78. Taşdemir, S., and Karyeyen, S. (2024). Colourless distributed combustion effects on a pre-mixed coke oven gas flame. *Canadian Society for Chemical Engineering*, 102, 1726-1742.

79. Holman, J.P. (2001). *Experimental Methods for Engineers*. (7th edition). New York: McGraw-Hill.

80. Dinçer, İ., ve Ezan, M.A. (2023). Alternatif Enerji Kaynakları ve Doğal Gaz Lojistiği Raporu. Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, *TÜBA Raporları* No: 52, Ankara. https://www.tuba.gov.tr/files/yayinlar/raporlar/TUBA-978-625-8352-60-3.pdf (Son Erişim: 23Temmuz 2024)



Gazili olmak ayrıcalıktır