

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞINA
MANYETİK ALAN ETKİLERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ**

**Hazırlayan
Ozan ÖZTÜRK**

**Danışman
Doç. Dr. Murat TAŞTAN**

**II. Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

Doktora Tezi

**Temmuz 2024
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞINA
MANYETİK ALAN ETKİLERİNİN DENEYSEL
İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)**

**Hazırlayan
Ozan ÖZTÜRK**

**Danışman
Doç. Dr. Murat TAŞTAN**

**II. Danışman
Prof. Dr. İlker YILMAZ**

**Temmuz 2024
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Ozan ÖZTÜRK

“Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığına Manyetik Alan Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Ozan ÖZTÜRK

Danışman

Doç. Dr. Murat TAŞTAN

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Doç. Dr. Veysel ERTURUN

İmza

TEŞEKKÜR

Bana çalışmalarım süresince her türlü yardımı ve fedakârlığı sağlayan, başta annem, babam ve kardeşlerim olmak üzere Tez Danışmanların sayın Doç. Dr. Murat TAŞTAN ve sayın Prof. Dr. İlker YILMAZ'a, teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Ozan ÖZTÜRK

Temmuz 2024, KAYSERİ

SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞINA MANYETİK ALAN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Ozan ÖZTÜRK

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Doktora Tezi, Haziran 2024

Danışmanlar: Doç. Dr. Murat TAŞTAN ve Prof. Dr. İlker YILMAZ

ÖZET

Son dönemde yapılan araştırmalarda, manyetik alanların alev oluşumu, alev davranışı ve emisyon gazları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu çalışma, özellikle metan (CH_4) ve metan/hidrojen (%70 CH_4 / %30 H_2) yakıtlarının düşük yanma koşullarında, yakıtın manyetik şartlandırılması ve harici akustik etkiler altındaki yanma kararsızlıkları ve emisyon özelliklerini değerlendirmektedir. Deneyler, ön karışım, manyetik alan, akustik zorlama ve swirl tekniklerinin kullanıldığı bir yanma odasında gerçekleştirilmiştir. Manyetik alanlar, yakıcı girişi, ön karıştırıcı ve yakıt besleme hatları gibi stratejik bölgelerde uygulanmıştır. Manyetik alan şiddeti 3500 gauss olarak sabit tutulmuş, termal çıkış 3 kW, swirl numarası 1 ve eşdeğerlik oranı 0,7 olarak belirlenmiştir. Akustik rezonans değerlendirmesi ise yanma odasında 95 Hz ve 175 Hz frekanslarında yapılmıştır. Araştırma sonuçları, manyetik alan uygulanmasının yanma sürecini olumlu etkilediğini göstermiştir. Özellikle CH_4 ve CH_4/H_2 gibi yakıtların kararsızlıkları, 95 Hz frekansında belirgin bir şekilde azalmıştır. Saf metan yanması sırasında CO emisyonları başlangıçta 4785 ppm olarak ölçülmüş, manyetik alan uygulamasıyla bu değer 4143 ppm'ye düşmüştür. Manyetik alanın ön karıştırıcıya uygulanması CO emisyonlarını 4233 ppm'ye çıkarırken, yakıt hattına uygulanması emisyonları 4104 ppm'ye düşürmüştür. CH_4/H_2 yakıt karışımı için CO emisyonları manyetik alan ile birlikte 2638 ppm'den 1961 ppm'ye düşmüştür. Bu durum, yanma verimliliğinin arttığını ve CO ve NO_x gibi kirletici gazların azaldığını göstermektedir. Bu çalışma, manyetik alanların yanma verimliliğini artırma ve çevresel endişeleri ele alma potansiyelini vurgulamaktadır. Manyetik alanların stratejik uygulamaları, yanma süreçlerinde kararsızlıkların azaltılmasına ve emisyonların düşürülmesine önemli bir katkı sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: Yanma Kararsızlığı, Manyetik Alan, Ön Kırışım ile Yakma, Akustik Zorlama, Emisyonlar.



EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MAGNETIC FIELD EFFECTS ON COMBUSTION INSTABILITY OF SYNTHETIC FUELS

Ozan ÖZTÜRK

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

PhD Thesis, June 2024

Supervisors: Assos. Prof. Murat TAŞTAN and Prof. Dr. İlker YILMAZ

ABSTRACT

Recent studies have investigated in detail the effects of magnetic fields on flame formation, flame behavior and emission gases. In particular, this study evaluates the combustion instabilities and emission characteristics of methane (CH_4) and methane/hydrogen (70% CH_4 / 30% H_2) fuels under low combustion conditions under magnetic conditioning of the fuel and external acoustic effects. Experiments were carried out in a combustion chamber using premixing, magnetic field, acoustic forcing, and swirl techniques. Magnetic fields were applied at strategic locations such as the combustor inlet, premixer and fuel feed lines. The magnetic field intensity was kept constant at 3500 gauss, the thermal output was 3 kW, the swirl number was 1 and the equivalence ratio was 0.7. Acoustic resonance evaluation was performed in the combustion chamber at frequencies of 95 Hz and 175 Hz. The results showed that the application of magnetic field has a positive effect on the combustion process. In particular, the instabilities of fuels such as CH_4 and CH_4/H_2 were significantly reduced at 95 Hz frequency. CO emissions during pure methane combustion were initially measured as 4785 ppm, which decreased to 4143 ppm with magnetic field application. Application of the magnetic field to the premixer increased CO emissions to 4233 ppm, while application to the fuel line reduced emissions to 4104 ppm. For the CH_4/H_2 fuel mixture, CO emissions decreased from 2638 ppm to 1961 ppm with the magnetic field. This indicates that combustion efficiency increased and pollutant gases such as CO and NO_x decreased. This study highlights the potential of magnetic fields to improve combustion efficiency and address environmental concerns. Strategic applications of magnetic fields can make a significant contribution to reducing instabilities in combustion processes and lowering emissions.

Key Words: Combustion Instability, Magnetic Field, Premixed Burner, Acoustic Forcing, Emissions.



İÇİNDEKİLER

SENTETİK YAKITLARIN YANMA KARARSIZLIĞINA MANYETİK ALAN ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK.....	ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
KABUL VE ONAY	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	viii
İÇİNDEKİLER	x
KISALTMALAR	xiv
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xvii
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Yanama Kararsızlıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar	5
1.1.1. Yanma Performansı ve Emisyon Karakteristikleri	6
1.1.2. Biyogaz Üzerine Yapılan Araştırmalar.....	8
1.1.3. Diğer Farklı Alanlarda Yapılan Araştırmalar	9
1.2. Akustik Zorlama Üzerine Yapılan Araştırmalar.....	11
1.3. Manyetik Alanların Yakıtın Yapısı ve Aleve Etkileri.....	13
1.3.1. Manyetik Alanın Yakıt Performansı Üzerine Etkileri	13
1.3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Manyetik Alanın Etkisi	20
1.3.2.1. Manyetik Alanda Motor Performansı ve Emisyonları.....	20
1.3.2.2. Manyetik Alanın Dizel ve Benzin Motorlar.....	22
1.3.2.3. Manyetik Alanın Yakıt Tüketimi ve Motor Performansı	23
1.3.2.4. Manyetik Yakıt Koşullandırmanın Çeşitli Motor Türleri	24

2. BÖLÜM

KAVRAMSAL TEMELLER

2.1. Yanma	26
2.1.1. Yanma ve Alev Tipleri	28
2.1.2. Alevin Yayılma Mekanizması	31
2.1.3. Yanma Termodinamiği.....	32
2.1.4. Reaksiyon Entalpisi.....	32
2.1.5. Kimyasal Denge	34
2.1.6. Reaksiyon Kinetiği	34
2.2. Yanma Kararsızlıkları.....	36
2.2.1. Tarihsel Süreç.....	37
2.2.2. Motor Teknolojileri Alanında Yapılan Çalışmalar	38
2.2.3. Yanma Kararsızlığı Çeşitleri	39
2.2.3.1. Statik Yanma Kararsızlıkları	40
2.2.3.2. Dinamik Yanma Kararsızlıkları.....	46
2.2.4. Ön Karışımli Sistemlerde Yanma Kararsızlığı Çeşitleri.....	48
2.2.4.1. Ön Karışımli Sistemlerdeki Kütle Kuvveti Kararsızlıkları	48
2.2.4.2. Ön Karışımli Sistemlerdeki Hidrodinamik Kararsızlıklar	49
2.2.4.3. Ön Karışımli Sistemlerdeki Difüziv-Termal Kararsızlıklar	49
2.2.4.3. Termo-Akustik Kararsızlıklar	50
2.2.4.4. Kararsızlıkların Oluşum Mekanizması	51
2.2.4.5. Kararsızlıkların Kontrol Yöntemleri	53
2.2.5. Pasif Kontrol Yöntemleri	54
2.2.5.1. Helmholtz Rezonatörü	54
2.2.5.1.1. Akış Bölme Elemanları	59
2.2.6. Aktif Kontrol Yöntemleri.....	60
2.2.7. Akustik Odada yanma ve Kullanılan CH ₄ ve H ₂ Özellikleri.....	62
2.2.7.1. Metan (CH ₄).....	66
2.2.7.2. Hidrojen (H ₂)	67
2.2.8. Baca Gazı Emisyonları	69
2.2.8.1. Karbondioksit (CO ₂).....	70
2.2.8.2. Karbonmonoksit (CO).....	71
2.2.8.3. Hidrokarbonlar (HC)	72

2.2.8.4. NO _x Emisyonları	72
2.3. Manyetik Alan	76
2.3.1. Mıknatıslar	78
2.3.1.1. Neodimyum mıknatıslar	78
2.3.2. Manyetizmanın Hidrokarbon Yakıtına Etkisi	79
2.3.2.1. Manyetik Alanda Yakıtın Performans, Manyetohidrodinamik (MHD).....	79
2.3.2.1.1. Manyetohidrodinamik (MHD) Mekanizması ve Maxwell Denklemleri.....	80

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

3.1. Deney Sistemi Tanıtımı.....	90
3.1.1. Hava Tedarik Sistemi	92
3.1.1.1. Hava Kompresörü.....	92
3.1.1.2. Harici Hava Tankı	93
3.1.1.3. Hava Filtresi ve Basınç Regülatörü	94
3.1.2. Yakıt Tedarik Sistemi.....	95
3.1.2.1. Kütle Akış Kontrolcülerini	97
3.1.2.2. Basınç Düzenlemesi ve Gaz Akışı	97
3.1.2.3. Kontrol Sistemi ve Ayarlanabilirlik	98
3.1.3. Deneylerde Kullanılan Gazların Yoğunluk ve Düzeltme Faktörleri.....	98
3.1.3.1. Teknik Detaylar ve Kalibrasyon.....	99
3.1.4. Yakıt ve Seyrelticilerin Akış ve Karışım Süreci.....	99
3.1.4.1. Yakıt Akışı ve Karışım Dinamikleri.....	99
3.1.5. Ön Karışıklı ve Ön Karışıklısız Yanma Sistemleri	100
3.1.5.1. Yanma Sistemlerinin Türleri ve Karşılaştırması	100
3.1.5.2. Ön Karışıklıcı Mekanizması.....	101
3.1.5.3. Görsel Karşılaştırmalar ve İşlevsellik	102
3.1.6. Girdap Destekli Yakıcı Tanımı ve Özellikleri	102
3.1.6.1. Girdap Üreteçleri ve İşlevleri.....	103
3.1.7. Yakıcı Ateşleme Sistemi.....	104
3.1.7.1. Kontrol Panosunun Yapısı ve İşlevi	104
3.1.7.2. Brülör Otomatığı ve Güvenlik Özellikleri	104

3.1.8. Yanma Odası Tasarımı ve Özellikleri	105
3.1.8.1. Dıştan Akustik Zorlama Ekipmanları	107
3.1.8.2. Osiloskop İşlevi ve Yapısı	109
3.1.8.3. Akustik Zorlama için Hoparlör Kullanımı	110
3.1.8.4. Akustik Zorlamanın Önemi	111
3.2. Ölçüm Ekipmanları	111
3.2.1. Alev Kararlılığı Ölçüm Ekipmanları	111
3.2.1.1. Veri Toplama ve İşleme	111
3.2.1.2. Kapasiteler ve Kalibrasyonlar	115
3.3. Deneysel Parametreler	116
3.4. Deney Hata Analizi	121

4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Dinamik Kararsızlıklar	126
4.2. Alev Sıcaklığı ve Işık Yoğunluğu	133
4.2.1. Saf Metan Yanma Kararsızlığına Manyetik Alanın Etkisi	133
4.3. Kirletici Emisyonları	143

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar	150
5.2. Öneriler	152
KAYNAKÇA	154
ÖZGEÇMİŞ	178

KISALTMALAR

%	: Percent.
°C	: Celsius degrees.
C₃H₈	: Propane.
CFD	: Computational Fluid Dynamics.
CH	: Hydrocarbons like methane.
CI	: Compression Ignition.
CO	: Carbon Monoxide.
CO₂	: Represents carbon dioxide gas.
DC	: Direct current.
DNA	: Deoxyribonucleic acid.
EGR	: Exhaust Gas Recirculation.
G	: Gauss (unit of magnetic field).
H₂	: Hydrogen.
HC	: Hydrocarbons.
IR	: Infrared.
Kmpl	: Kilometers per liter
LPG	: Liquified Petroleum Gas.
m	: Meter.
mT	: Millitesla
N	: Newton (unit of force).
NdFeB	: Neodymium Iron Boron
Ni-Cu-Ni	: Nickel-Copper-Nickel.
NO_x	: Nitrogen oxides.
O₂	: Oxygen gas.
PM	: Particulate Matter.
PMMA	: Polymethyl methacrylate (a polymer).
Ppm	: Parts per million (a part in a million).
SFC	: Specific Fuel Consumption.
SO₂	: Sulfur Dioxide.
SO_x	: Sulfur oxides.

T	: Tesla (unit of magnetic field).
UBHC	: Unburned Hydrocarbons.
UV	: Ultraviolet.
Γ	: Gamma



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Çeşitli Elementlerin Elektronegativiteleri	28
Tablo 2.2.	Yakıtlar ve içerdği hidrokarbonlar	62
Tablo 2.3.	Metan gaz yanma özellikleri	67
Tablo 2.4.	Metan/hidrojen gaz karışımlarının yanma limitleri	68
Tablo 2.5.	Hidrojen gazı yanma özellikleri	69
Tablo 3.1.	Deneylerde kullanılan gazların yoğunluk ve düzeltme faktörü değerleri.....	99
Tablo 3.2.	Emisyon Cihazı Ölçüm Hata Oranları.....	115
Tablo 3.3.	Deney Matriksi	120
Tablo 3.4.	Ölçüm Ekipmanlarının Doğruluğu	121

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Higgins (sol) ve Rijke'nin (sağ) deney düzeneği	38
Şekil 2.2.	Yanma Kararsızlıklarının Tarihsel Süreci	39
Şekil 2.3.	Alevin açık (sol) ve kapalı (sağ) ortamda yayılması.	47
Şekil 2.4..	Ses dalgalarının gelişerek doyunluğa ulaşması	48
Şekil 2.5.	Kapalı ve açık çevrim aktif kontrol yöntemleri.....	61
Şekil 2.6.	Tipik gaz türbin yakıtlarının sıcaklık-bağıl yoğunluk grafiği	64
Şekil 2.7.	Uçuculuk – tutuşma sıcaklığı değişim eğrisi.....	65
Şekil 2.8	Farklı yakıtların alt ısı değer/ bağıl yoğunluk oranı	66
Şekil 3.1.	Deney Sistemindeki Elemanlar Aşağıda Açıklanmıştır.	91
Şekil 3.2.	Deney sistemi ön görünüşü	92
Şekil 3.3.	Hava kompresörü ve tankı.....	92
Şekil 3.4.	Harici hava tankı.....	93
Şekil 3.5.	Kompresör ve harici tank kabini	93
Şekil 3.6.	Hava filtresi ve basınç regülatörü.....	94
Şekil 3.7.	Yakıt tankları ve basınç regülatörleri	95
Şekil 3.8.	Oksijen tankı.....	96
Şekil 3.9.	Gaz akış hatları	97
Şekil 3.10.	Kütle akış kontrolcüsü.....	97
Şekil 3.11.	Vakum sistem kontrolcüsü	98
Şekil 3.12.	Yakıt kollektörü.....	100
Şekil 3.13.	Ön karıştırıcı.....	101
Şekil 3.14.	Geleneksel yanma ve ön karışımli yanmanın karşılaştırması.....	102
Şekil 3.15.	Brülör.....	102
Şekil 3.16.	Girdap üretici ölçülendirme kriterleri	103
Şekil 3.17.	Kontrol paneli iç ve dış görünüşü.....	104
Şekil 3.18.	Brülör otomatiği	105
Şekil 3.19.	Yanma akustik oda	105
Şekil 3.20.	Yanma odası teknik resmi	106
Şekil 3.21.	Fonksiyon jeneratörü	107
Şekil 3.22.	Kuvvetlendirici	108

Şekil 3.23.	Osiloskop.....	109
Şekil 3.24.	Hoparlör.....	111
Şekil 3.25.	Giriş kanallı veri toplayıcı.....	112
Şekil 3.26.	ProfiSignal ekran görünümü.....	112
Şekil 3.27.	Piezorezistif basınç ölçerler a) Yakıcı, b) Alev	113
Şekil 3.28.	Dinamik Basınç Sensörü	113
Şekil 3.29.	Termal çiftler	114
Şekil 3.30.	Optik dedektör	114
Şekil 3.31.	Emisyon cihazı	115
Şekil 3.32.	N35 Neodim Mıknatıslar.....	117
Şekil 3.33.	a) N35 40x20x10 Manyetik Alanı b) N35 40x20x20 Manyetik Alanı ..	118
Şekil 3.34.	Manyetik Alan Bölgesi a) Yakıcı b) Premikser c) CH ₄ ve H ₂ MFC çıkışı	119
Şekil 3.35.	Mıknatısların yerleşimi a) Premikser b) CH ₄ ve H ₂ MFC çıkışı c) Yakıcı	119
Şekil 4.1.	Yanma akustik odanın rezonans bölgeleri.....	126
Şekil 4.2.	95Hz Frekans Altında Dinamik Basınç Dalgalanması.....	128
Şekil 4.3.	175 Hz Frekans Altında Dinamik Basınç Dalgalanması.....	130
Şekil 4.4.	Manyetik Alan Olmadan Saf Metan Yakma Deneyi.....	134
Şekil 4.5.	Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan Burnerda).....	134
Şekil 4.6.	Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan Ön karıştırıcıda).....	135
Şekil 4.7.	Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan CH ₄ MFC Çıkışında)	135
Şekil 4.8.	Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan H ₂ MFC Çıkışında)	136
Şekil 4.9.	Manyetik Alan Altında Saf Metan Statik Basınç Değişimleri	137
Şekil 4.10.	a) Alev Sıcaklığı ve b) Işık Yoğunluğu Değişimleri.....	139
Şekil 4.11.	CH ₄ çıkışına yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri	142
Şekil 4.12.	Ön karıştırıcıya yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri.....	142

Şekil 4.13.	Yakıcıya yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri	142
Şekil 4.14.	CO Emisyonu	144
Şekil 4.15.	NO _x Emisyonu.....	147



GİRİŞ

Enerji, modern toplum ve ekonomi için vazgeçilmez bir öneme sahiptir. Günlük yaşamın ayrılmaz bir parçası olan enerji, toplumsal yapıları ve beklentileri şekillendirir [1]. Enerji sistemlerinin gelişimi, sosyal seçimlerin bir yansıması olup, bu süreç politik-ekonomik ilişkiler ve kültürel normlar tarafından etkilenir [2]. Enerji, sadece yaşamın devamlılığı için değil, aynı zamanda toplumsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği için de kritik bir öneme sahiptir. Küresel ekonomi, büyük ölçüde ekonomik ve teknolojik ilerlemeyi mümkün kılan fosil yakıtlar olan ham petrol, doğal gaz ve kömüre dayanmaktadır. Ancak, artan enerji talebi, bu fosil yakıt kaynaklarının tükenmesiyle ilgili önemli bir sorun ortaya çıkarmaktadır [3]. İklim, sosyal, sağlık ve politik krizlerle başa çıkarken, enerji kaynaklarının, paylaşımının ve kullanımının yeniden düşünülmesi, sorumlu ve etik enerji geleceklerini şekillendirmek için kaçınılmaz hale gelmektedir.

1960 ile 2020 yılları arasında dünya nüfusu 3,03 milyardan 7,75 milyara çıkarak %254 oranında artış göstermiştir [4]. Bu nüfus artışı, enerji arzı ve talebi üzerinde önemli değişikliklere neden olmuştur. Özellikle 2020 yılında, petrol ve doğal gaz üretimi toplamda 4.296 milyon ton iken, toplam talep 4.070 milyon ton olarak kaydedilmiştir. Bu durum, arz ve talep arasında 226 milyon tonluk bir dengesizliği ortaya koymaktadır [5].

Yanma süreci, termal ve mekanik enerji üretiminde kritik bir öneme sahiptir, ancak bu süreç sonucunda ortaya çıkan emisyon gazları çevresel kirliliğe yol açmaktadır. Yanma sırasında, azot oksitleri, hidrokarbonlar, karbon dioksit, su buharı, kükürt oksitleri ve partiküller gibi çeşitli emisyonlar atmosfere salınır. Eksik yanma, karbon monoksit (CO) gazının oluşumuna neden olurken, tam yanma su buharı üretir. Bu reaksiyonlar esas olarak, yakıttaki hidrojen ile havadaki oksijen arasındaki etkileşimlerden kaynaklanır. Yanma sürecinin olumsuz etkileri hem yerel hem de küresel ölçekte gözlemlenmektedir [6].

Son yıllarda, hidrojen ve diğer çeşitli hidrokarbonlar alternatif enerji kaynakları olarak dikkat çekmektedir. Bu bağlamda, gaz yakıtlarının sentezi üzerine yapılan çalışmalar büyük ilgi görmüştür [7]. Aynı zamanda, güçlü manyetik alanların moleküler yapılar üzerindeki etkileri ve bu alanların moleküler özellikleri nasıl değiştirebileceği keşfedilmiştir. Bu keşif, araştırmacıları manyetik alanlar altında yakıtların özellikleri, yanma verimliliği, alev sıcaklıkları ve emisyon salımları üzerine çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir [8].

Manyetik alanlar, enerji ve yanma süreçleri dahil olmak üzere çeşitli alanlarda uygulama bulmuştur. Kimyasal reaksiyon hızlarını etkileyebildikleri [9, 10] ve yanma reaksiyonlarına ile patlamalara neden olabildikleri bilinmektedir [11]. Son yıllarda, küresel karbon emisyonlarını azaltmaya yönelik teknolojilerde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Manyetik alanların yakıt motorlarında kullanılması, patlama emisyonlarını azaltma ve yanma verimliliğini artırma potansiyeline sahiptir. Yakıtların yanma sırasındaki davranışları, moleküler düzeydeki manyetik etkileşimlerden etkilenebilir. Örneğin, hidrojenin spin yönelimi moleküler davranışı etkileyebilir ve manyetik alanlar bu spin yönelimini değiştirebilir. Manyetik alanlar, bağ enerjisi ve entalpi gibi termodinamik faktörleri de etkileyebilir, bu da yakıt tüketimini etkileyebilir [12-16].

Bu tezde, sentetik yakıtlar olan metan (CH_4) ve CH_4/H_2 (%30 H_2) karışımlarının yanma alevleri üzerindeki manyetik alan ve akustik zorlamanın etkileri sonucu yanma kararsızlıkları ve emisyon değerlerindeki değişimler incelenmektedir. Diğer çalışmalardan ayırt edici bir özellik olarak, bu araştırma yanma reaksiyonlarını kontrol altına almak için yanma kararsızlıklarına yönelik müdahaleleri ele almaktadır. Yanma kararsızlıklarını kontrol altına alırken hem manyetik alan hem de akustik zorlama kullanılarak yanma reaksiyonu gerçekleştirilmekte ve bu süreçte her iki yöntemin birleşik etkisi ile yanma reaksiyonu daha stabil bir hale getirilmektedir. Bu metodoloji, yanma sürecini daha etkin kontrol altına almanın yanı sıra açığa çıkan emisyonların azaltılmasını da hedeflemektedir. Deney düzeneği, bu iki farklı kontrol yöntemini entegre edecek şekilde özel olarak tasarlanmıştır ve bu sayede yanma sürecindeki kararsızlıkların üstesinden gelinmesi amaçlanmaktadır. Bu yaklaşım, yanma teknolojilerinde verimliliği artırırken çevresel etkileri minimize etmeye yönelik önemli bir adım olarak değerlendirilebilir.

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın temel amacı, sentetik yakıtların (CH_4 ve CH_4/H_2) akustik zorlama altında manyetik alanların yanma alevleri üzerindeki etkilerini ve emisyon değerlerini detaylı bir şekilde incelemektir. Bu amaç doğrultusunda, manyetik alanların yanma sürecine olan etkileri ve akustik zorlamanın bu etkiler üzerindeki etkisi titizlikle araştırılmıştır. Sentetik yakıtların farklı bileşimlerinin, yanma alevlerinin karakteristik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiş ve emisyon profilleri detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, manyetik alanların yanma verimliliği, alev karakteristikleri ve emisyon gazları üzerindeki potansiyel etkileri derinlemesine analiz edilmiştir. Bu çalışma, gelecekteki araştırmalara yol göstermek ve enerji sektöründeki sürdürülebilirlik çabalarına katkıda bulunmak amacıyla önemli bir temel oluşturmaktadır.

Araştırmanın Spesifik Hedefleri

Çalışmanın özel amaçları şunlardır:

- Sentetik yakıtların (CH_4 ve CH_4/H_2) manyetik alanlar altında yanma alevlerinin karakteristik özelliklerini belirlemek.
- Akustik zorlama altında manyetik alanların yanma süreci üzerindeki etkilerini analiz etmek.
- Manyetik alanların yanma verimliliği üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmak.
- Farklı yakıt bileşenlerinin yanma alevlerindeki davranışlarını ve emisyon profillerini karşılaştırmak.
- Alternatif yakıtların kullanımını iyileştirmek ve çevresel etkilerini azaltmak için yeni stratejiler geliştirmek için veri sağlamak.

Araştırma Boşluğu

Bu çalışma, manyetik alan ve akustik zorlamanın yanma üzerindeki eş zamanlı etkilerini incelemekte ve bu iki yöntemin yanma davranışları ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Mevcut literatürde, manyetik alan ve akustik zorlama çoğunlukla bağımsız olarak incelenmişken, bu çalışma her iki yöntemi birleştirerek

uygulamıştır. Bu yaklaşım, yanma verimsizliklerinin azaltılması ve emisyonların iyileştirilmesi konusunda potansiyel faydalar sunmaktadır. Bu yönüyle, araştırma literatürdeki benzer çalışmalardan ayrılarak öne çıkmaktadır.

Araştırmanın Kapsamı

Araştırmanın kapsamı, sentetik yakıtların (CH_4 ve CH_4/H_2) akustik zorlama altında manyetik alanların yanma alevleri üzerindeki etkilerini ve bu etkilerin emisyon değerleri üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemeyi içermektedir. Bu kapsam altında, manyetik alanların yanma sürecine olan etkileri, akustik zorlamanın bu etkiler üzerindeki etkisi, farklı yakıt bileşenlerinin yanma davranışları ve emisyon profilleri değerlendirilmektedir. Ayrıca, çalışmanın amacı, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanımını iyileştirmek ve çevresel etkilerini azaltmak için yeni stratejiler geliştirmek için veri sağlamaktır.

Araştırmanın Önemi

Bu araştırmanın temel hedefi, önceden karıştırılmış bir yakıcıda saf metan (CH_4) ve %30 H_2 oranında katkılı metanın manyetik alanda yanma sürecinin, akustik zorlama altındaki yanma kararlılığına, alevin karakteristik özelliklerine ve çeşitli emisyon gazlarının oluşumuna olan etkilerini deneysel olarak incelemektir. Çalışmada kullanılan karışım (%70 CH_4 ve %30 H_2) Yılmaz ve Ilbaş [7] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmanın önemi, ön karışımli bir yanma odasında kullanılan sentetik yakıtların yanma performansını ve egzoz emisyonlarını optimize etmeye yönelik yenilikçi yaklaşımların geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Deneyler, yakıtın manyetik alanda yanmasıyla ortaya çıkan yanma karakteristiklerinin, akustik zorlamanın etkisi altında nasıl değiştiğini ve bu değişikliklerin emisyon profiline olan etkilerini detaylı bir şekilde araştırmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar, yanma verimliliğini artırmak ve çevresel etkilerini azaltmak için alternatif bir yaklaşımın potansiyelini vurgulamaktadır. Bu da çalışmanın önemini ortaya koyar.

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Yanma süreçlerinin optimizasyonu, enerji verimliliği ve emisyonların azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, manyetik alan ve akustik zorlama gibi fiziksel yöntemlerin yanma üzerindeki etkileri, son yıllarda bilimsel araştırmaların merkezinde yer almıştır. Literatür incelemeleri, bu iki yöntemin genellikle bağımsız olarak ele alındığını ve yanma parametreleri üzerindeki etkilerinin belirlendiğini göstermektedir. Bu çalışmanın literatür taraması kısmı, özellikle üç ana başlık altında organize edilmiştir:

1. Yanma Kararsızlıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar
2. Akustik Zorlama Üzerine Yapılan Araştırmalar
3. Manyetik Alanların Yakıtın Yapısı ve Alev Dinamikleri Üzerine Etkileri

Bu araştırmanın benzersizliği, seçilen sentetik yakıtlara manyetik alan ve akustik zorlamanın eş zamanlı olarak uygulanmasıyla ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşım, literatürde daha önce benzeri görülmemiş bir metottur ve bu yüzden literatürde bu üç ana başlık altında yapılan taramaların asıl sebebi çalışmanın özgünlüğüdür. Çoğu araştırmacı, yanma kararsızlıklarını sadece tek bir parametrenin etkisi altında incelemektedir; bu çalışma ise bu etkileri kapsamlı bir şekilde birleştirerek literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

1.1. Yanma Kararsızlıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Bugünün bilim dünyasında enerji sistemleri ve çevresel sürdürülebilirlik üzerine yürütülen çalışmalar özellikle dikkat çekici bir öneme sahiptir. Enerji sistemlerinin optimizasyonu ve çevre sağlığının korunmasında kritik roller oynamaktadır, böylece

gelecek nesiller için daha sürdürülebilir bir dünya inşa etmeye yönelik katkı sağlamaktadır [17]. Bu bölüm, başta çeşitli yakıt karışımlarının yanma performansı ve emisyon karakteristikleri üzerine yapılan araştırmalar olmak üzere, biyogaz kullanımı ve diğer farklı alanlarda gerçekleştirilen çalışmaları kapsayan geniş çaplı bir literatür taramasını içermektedir. Her bir ana başlık altında, ilgili konuyla alakalı güncel bilimsel gelişmeler detaylı bir şekilde ele alınmış ve var olan bilgi birikimine katkıda bulunacak şekilde değerlendirilmiştir. Bu bölüm, söz konusu alanlarda yürütülen en son çalışmaların kapsamlı bir özetini sunarak, mevcut araştırma boşluklarını belirlemekte ve gelecek çalışmalar için potansiyel yönler önermektedir. Aşağıda yapılan bazı önemli araştırma örnekleri bulunmaktadır;

1.1.1. Yanma Performansı ve Emisyon Karakteristikleri

Taştan [18] tarafından yapılan çalışmada, metanol-benzin karışımlarına hidrojen eklemenin buji ateşlemeli içten yanmalı motorların performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, benzine %5'ten %20'ye kadar oranlarda metanol eklenmiş ve bu karışımlara %3 ile %15 hacimsel oranda hidrojen ilave edilmiştir. Bulgulara göre, metanol ilavesi özgül yakıt tüketimini ve emisyonları artırırken, ısı verimi düşürmüştür. Ancak, hidrojen eklenmesiyle özgül yakıt tüketimi düşmüş ve ısı verim artmıştır. Emisyonlar açısından metanol, CO, HC ve CO₂ emisyonlarını azaltmış, hidrojen ilavesi bu azalmayı daha da iyileştirerek NO_x emisyonlarını artırmıştır.

Yılmaz [19] tarafından yürütülen araştırmada, çeşitli oranlarda CNG, H₂, CO ve CO₂ içeren sentetik gaz karışımlarının yanma ve emisyon karakteristikleri incelenmiştir. Araştırma geniş bir operasyonel koşul yelpazesinde gerçekleştirilmiş ve alev kararsızlığı olmadan yanabilen bir yakıcı sistem tasarlanıp üretilmiştir. Deneylerde yakıt kompozisyonu, swirl sayısı ve eşdeğerlik oranının yanma ve emisyon üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, gaz kompozisyonunun ve swirl sayısının sentetik gazların yanma stabilitesi üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu, akustik şartların ise alev davranışları üzerindeki etkilerini göstermiştir.

Mameri ve arkadaşları [20] Laminer difüzyon alevleri ve alev sönme/geri tepme limitlerine odaklanarak, biyogaz ve sentez gaz karışımlarının yanma özelliklerini analiz etmişlerdir. Hidrojen miktarı arttıkça alev sönme sıcaklığı sabit kalırken, metan miktarı

arttıkça sıcaklık düşmektedir. Ayrıca, yüksek gerilim oranları ve basınç altında NO_x emisyonlarının arttığı belirlenmiştir.

Lee ve arkadaşları [21] Kömür türevi sentetik gaz (syngas) kullanılan gaz türbini yanma özelliklerini incelerken, yüksek sıcaklık ve atmosferik basınç altındaki yanma testleri sonucunda, alev stabilitesi ve dinamik basınç özelliklerini gözlemlemişlerdir. Seyreltici kullanılmayan durumlar ve azot seyreltmesi etkileri üzerinde durulmuştur.

Wu ve arkadaşları [22] Metana hidrojen eklemenin difüzyon alevlerinin emisyon ve ısı transferi özellikleri üzerindeki etkilerini analiz etmişlerdir. Hidrojen eklenmesi, alev uzunluğunu kısaltmış ve emisyonları düşürmüştür.

Yılmaz ve Yılmaz [23] H₂/CO/CO₂/CNG gaz karışımlarının yanma ve emisyon davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çeşitli H₂/CO oranlarında yanma davranışları ve emisyon seviyeleri ölçülmüştür.

Lee [24] Farklı H₂/CO/CH₄ oranlarına sahip sentetik gaz karışımlarının yanma ve emisyon özelliklerini kapsamlı olarak sunmuştur.

Kuznetsov ve arkadaşları [25] Sub-atmosferik basınçlarda hidrojen-hava karışımlarının yanabilirlik sınırları ve laminar yanma hızları ölçülmüştür. Bu çalışma, özellikle düşük basınçlı ortamlarda hidrojen güvenliği konusunda önemli veriler sunmaktadır.

Dong ve arkadaşları [26] ve Greco ve arkadaşları [27] Bu iki çalışma, hidrojen ve karbon monoksit karışımlarının laminar yanma hızlarını ölçmüş, hidrojen içeriğinin artmasıyla yanma hızının nasıl etkilendiğini analiz etmişlerdir. Hidrojen zenginleştirilmiş atmosferlerde yanma dinamikleri üzerine yoğunlaşmıştır.

Alabaş [28] tarafından yürütülen çalışmada, metan bazlı yakıt karışımlarının oksijence zenginleştirilmesinin yanma kararsızlıkları ve emisyon performansları üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma, metan içerisine farklı oranlarda H₂, CO ve CO₂ gazları eklenerek gerçekleştirilmiş ve bu karışımlar yanma akustik odasında zorlayıcı frekanslar altında yakılmıştır. Deneysel sonuçlar, oksijence zenginleştirilmiş yanmanın CO emisyonlarını önemli ölçüde azalttığını ancak NO_x emisyonlarını artırdığını göstermiştir. Özellikle CH₄/CO₂ karışımında alev kararlılığı artarken, CH₄/H₂ ve CH₄/H₂/CO karışımlarında alev kararsızlıkları gözlemlenmiştir.

İlbaş [29] çalışmasında, yüksek iç resirkülasyonlu yanma odasında renksiz dağıtılmış yanma şartlarında metan ve kok fırını gazı kullanılarak yanma karakteristiği incelenmiştir. Çalışma, oksitleyici havadaki oksijen oranının düşürülmesiyle yanma odasındaki maksimum sıcaklığın azaldığını ve azot oksit oluşumunun %99 oranında azaldığını belirlemiştir. Ayrıca, farklı girdap sayıları ile yapılan analizler, hava ve yakıt karışımının hızlanmasını ve sıcaklık dağılımının homojenleşmesini sağlamış, bu da NO_x emisyonlarını %50 azaltmıştır.

1.1.2. Biyogaz Üzerine Yapılan Araştırmalar

Zhang ve Jiang [30] Biyogaz-hidrojen karışımlarının yanma kararsızlıkları ve CH_4/CO_2 oranlarının etkilerini incelemişlerdir. Hidrojen ve metan oranlarının küçük değişikliklerinin yanma karakteristiklerine minimal etkisi olduğunu göstermişlerdir.

Kurji ve arkadaşları [31] Biyodizel ve dizel yakıtların farklı CH_4/CO_2 oranlarına sahip karışımlarının alev kararlılığı ve emisyonlarını değerlendirmişlerdir. Yenilenebilir biyokütleden elde edilen yakıtların sanayi ve havacılık uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymuştur.

Sivri [32] çalışmasında, biyogazın yanma karakteristiklerini incelemiştir. Bu çalışma, biyogaz karışımlarının temel yanma parametrelerini bir laboratuvar ölçekli ön karışımli-girdap üreteçli yakıcıda deneysel olarak araştırmıştır. Araştırma, yakıt kompozisyonu, girdap sayısı ve hidrojen ilavesi gibi değişkenlerin biyogaz karışımlarının sıcaklık ve gaz emisyonları üzerindeki etkilerini detaylıca incelemiştir. Bulgular, biyogazın alev yapısını detaylandırmış ve biyogazın yenilenebilir ve zararsız bir enerji kaynağı olarak kullanım potansiyelini vurgulamıştır.

Şahin [33] çalışmasında, farklı bileşimlerdeki biyogazların bir doğal gaz brülöründe yanma performansları ve emisyon karakteristiklerini CFD modellemesi kullanarak incelemiştir. Bulgular, biyogaz içeriğindeki metan miktarının yanma sıcaklığına etkili olduğunu ve metanla karşılaştırıldığında biyogazların daha düşük NO_x seviyeleri ve CO_2 miktarına bağlı olarak yüksek CO_2 emisyonları gösterdiğini belirlemiştir.

Hu ve Zhang [34] Biyogaz ve hidrojen karışımlarının alev istikrarsızlıkları üzerine yapılan deneysel çalışma, biyogazın hidrojen ile zenginleştirilmesinin alev şekli ve stabilitesi üzerindeki etkilerini incelenmiştir.

Wei ve arkadaşları [35] Biyogaz-hidrojen-hava karışımının laminar yanma hızları, farklı yakıt kompozisyonları ve eşdeğer oranlar altında ölçülmüştür, H₂ eklemesinin yanma kinetiği üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Kalsi ve Subramanian [36] Tek silindirli bir dizel motor üzerinde biyodizel ve benzetilmiş biyogaz karışımlarıyla yapılan deneysel çalışmalar, motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir.

İlbaş ve arkadaşları [37] Farklı biyogaz kompozisyonlarının yanma özelliklerinin 3D sayısal modellemesi yapılmış, biyogazdaki H₂S miktarının SO₂ emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Devi ve arkadaşları [38] Ham biyogazın, Yan Yüzeyle Gözenekli Radyant Yakıcıda yanma olasılığını test etmiş, bu teknolojinin biyogaz yanması için uygunluğunu değerlendirmiştir.

1.1.3. Diğer Farklı Alanlarda Yapılan Araştırmalar

Özdemir [39] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, türbülanslı jet alevlerin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile modellemesi yapılmıştır. Hidrojenin ön karışımı ve difüzyon yanma süreçleri, stokiyometrik koşullarda hem açık hem de kapalı geometriye sahip yanma odalarında incelenmiştir. Modelleme sonuçları, sıcaklık ve hız dağılımları ile H₂O dahil gaz konsantrasyonlarını detaylı bir şekilde ortaya koymuştur. Bulgular, farklı hava fazlalık katsayıları ve güç seviyeleri altında, ön karışımı hidrojen ile yapılan yanmaların difüzyon yanmasına kıyasla daha erken reaksiyona başladığını göstermiştir.

Cellek ve Pınarbaşı [40] Endüstriyel uygulamalarda kullanılan düşük girdaplı bir brülörde doğal gaz ve hidrojenle zenginleştirilmiş doğal gazın yanma karakteristiklerini ve emisyon profillerini karşılaştırmıştır.

Samiran ve arkadaşları [41] H₂/CO sentez gaz karışımının yanma özelliklerini inceleyerek, H₂ oranındaki artışın NO_x oluşumunu azalttığına dikkat çekmiştir.

Joo ve arkadaşları [42] Model bir gaz türbini yanıcısında, H₂ zenginleştirilmiş CH₄ yakıtlarının alevlerinin dinamik tepkisi üzerinde yapılan çalışma, yakıt hızı dalgalanmalarının alev transfer fonksiyonları üzerindeki etkisini ortaya koymuştur.

Zhang ve arkadaşları [43] Nemlendirilmiş gaz türbini teknolojisi kullanılarak, ıslak biyo-sentetik gazın yanma istikrarsızlıklarını değerlendirmiş, küçük gaz kompozisyonu değişikliklerinin alev özelliklerine etkilerini incelemiştir.

Çam [44] çalışmasında, türbülanslı ve fakir ön karışımli yakıcıların yanma kararsızlıkları ve bu kararsızlıkların alev sönmesi ve geri tepme olayları ile ilişkileri araştırılmıştır. Araştırma, sentetik gaz yakıtlar kullanılarak bir laboratuvar ölçekli yakıcıda gerçekleştirilmiş ve yakıcı akustik yoluyla zorlanarak alev, 0-300 Hz frekans aralığında sinüzoidal ses dalgalarıyla uyarılmıştır. Deney sonuçları, yakıt kompozisyonu ve eşdeğerlik oranının alev kararlılığı üzerinde önemli etkileri olduğunu, girdap sayısı ve girdap üretici çap oranının ise değişken etkiler gösterdiğini ortaya koymuştur.

Şaşmaz [45] araştırmasında, gaz türbinlerinin yanma odalarında meydana gelen yanma kararsızlıklarını ve bu kararsızlıkların kontrol yöntemlerini incelemiştir. Çalışma, yakıt türü, hava sıcaklığı ve yakıt-hava karışım oranının yanma rejimine olan etkilerini değerlendirerek, yanma odası geometrisi ve yakıcı tipi tasarımlarının iyileştirilmesiyle daha istikrarlı yanmaların sağlanabileceğini göstermiştir. Ayrıca, endüstriyel yakıcılardan elde edilen verilerle yapılan sayısal simülasyonlar, yanma odasının dinamiklerini detaylı bir şekilde ortaya koymuştur.

Kömük [46] tarafından yürütülen araştırmada, amonyak gazının yenilenebilir bir gaz türbini yakıtı olarak kullanım potansiyeli değerlendirilmiştir. Çalışma, amonyak ve amonyak karışımli yakıtların yanma performansı ve emisyonlarını değerlendirerek, amonyak ilavesinin alev dağılımını ve teğetsel hızları artırırken, NO_x emisyonlarını önemli ölçüde artırmadığını göstermiştir. Bu sonuçlar, amonyakın gaz türbinlerinde yanma performansını düşürmeden kullanımının mümkün olduğunu ortaya koymuştur.

Hosseini ve Wahid [47] Biyogazın çeşitli yanma rejimleri altındaki özellikleri araştırılmış, geleneksel yanma ile hidrojen zenginleştirilmiş yanma modları karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, biyogazın alevsiz yanması ve hidrojen zenginleştirme stratejileri üzerine yoğunlaşmıştır.

Candan [48] çalışmasında, endüstriyel uygulamalarda kullanılan girdaplı yakıcıların yanma tepkimelerini ve alev stabilizasyonunu ele almıştır. Araştırmada, metan ve hidrojenin hava ile yanması sonucu oluşan alev stabilizasyonu ve NO_x emisyonları

üzerine etkileri incelenmiştir. Bulgular, metan-hava karışımının CO_2 ile seyreltilmesinin yanma odasındaki sıcaklık ve NO_x emisyonlarını azalttığını göstermiştir.

Er [49] çalışmasında, küresel enerji ihtiyaçlarına yanıt olarak propanın metan ile zenginleştirilmesinin yanma üzerine etkilerini araştırmıştır. Çalışma, metan oranlarının farklı seviyelerde ayarlandığı Tubitak destekli bir yakıcıda gerçekleştirilmiş ve metan zenginleştirilmiş propanın çevresel etkileri azaltma ve enerji verimliliğini artırma potansiyelini ortaya koymuştur. Ayrıca, akustik zorlama uygulanan deneyler, yanma davranışlarının bu zorlamalarla nasıl değiştiğini göstermiştir.

Sıpçık [50] çalışmasında, propan gazının yanma performansı üzerinde swirl sayısı değişiklikleri ve akustik zorlamaların etkilerini incelenmiştir. Bulgular, swirl sayısının artmasıyla CO ve CO_2 emisyonlarının azaldığını, NO_x emisyonlarının da düşüş gösterdiğini belirlemiştir. Ayrıca, akustik frekansların artmasıyla baca gazı sıcaklıkları ve dinamik basınç dalgalanmalarında artışlar gözlenmiştir, bu da yanma performansının bu parametrelerle nasıl etkilendiğini göstermektedir.

1.2. Akustik Zorlama Üzerine Yapılan Araştırmalar

Bu kısımda, yanma kararlılığı, hidrojen zenginleştirme, termo-akustik davranışlar ve akustik zorlama etkileri üzerine odaklanarak gerçekleştirilen araştırmaları kapsayan detaylı bir literatür taramasını sunmaktadır. Analiz edilen çalışmalar, akustik zorlama altındaki yanma kararsızlıkları ve hidrojen ilavesinin bu süreçler üzerindeki etkilerini incelerken, bu fenomenlerin anlaşılmasına yönelik önemli bilgiler sağlamıştır. Sunulan literatür, bu konular üzerine yapılan son bilimsel çalışmaların bir özetini içermekte olup, bu alandaki mevcut bilimsel anlayışı genişletmeyi ve gelecekteki araştırmalar için yeni perspektifler ortaya koymayı hedeflemektedir. Bu sayede, termo-akustik olayların daha iyi anlaşılması ve akustik zorlama altındaki yanma sistemlerinin optimizasyonu konusunda ilerlemeler sağlanabilir.

Yanma Kararlılığı ve Akustik Zorlama Etkisi ile alakalı yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir;

Yılmaz et al. [51] $\text{H}_2/\text{CO}/\text{CH}_4/\text{CO}_2$ bileşenlerinden oluşan sentetik bir gaz karışımının, özellikle yüksek H_2/CO oranına sahip olanın, bir girdap destekli sistemde yanma kararlılığı ve emisyon performansı incelenmiştir. CH_4 ilavesinin yanıcılık sınırlarını

genişlettiği ve akustik zorlama altında alev davranışları ve dinamik basınç dalgalanmalarında değişiklikler olduğu belirlenmiştir.

Emadi et al. [52] Girdap destekli bir yakıcıda dıştan akustik zorlama altındaki alevin termo-akustik kararsızlıklarını incelemiştir. Yakıta hidrojen ilavesi sonucunda alev hızının artması ve ateşleme sınırının azalması sonucunda kararlılığın düştüğu gözlemlenmiştir.

Yılmaz ve arkadaşları [53] Ön karışımli bir yakıcıda alev kararsızlıklarını deneysel olarak incelemişlerdir. Girdap sayısı ve eşdeğerlik oranı ayarlanarak, dinamik ve statik basınç dalgalanmaları ile alevin kararsızlıkları değerlendirilmiştir.

Sankaran ve Im [54.] ve Huang ve Ratner [55] Bu iki çalışma, hidrojenin metan/hava alevlerinin Markstein uzunluğuna ve yanma limitlerine etkisini incelemiştir. Akustik zorlama ile belirli frekanslarda kararsızlıkların nasıl etkilendiğini göstermişlerdir.

Yılmaz ve ekibi [56] Düşük girdap sayılı bir brülörde hidrojen-metan karışımı yakıtın termo-akustik kararsızlığını deneysel olarak incelemiştir. Artan hidrojen oranının yanma özellikleri üzerinde belirgin bir etki yarattığını, özellikle alev sıkıştırma oranlarında önemli artışlar sağladığını ortaya koymuştur.

Akustik Zorlama Altındaki Yanma Kararsızlıkları ile alakalı yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir;

Wang ve arkadaşları [57] Metan ve hidrojenin farklı oranlardaki karışımalarının yanma kararsızlıklarını, belirli akustik zorlamalar altında analiz etmiştir. Yüksek frekansta hidrojenin kararsızlığı azalttığı, düşük frekansta ise artırdığı gözlemlenmiştir.

Yu ve ekibi [58] Hidrojenin Dimetil Eter (DME) ile oluşturulan ön karışımli alevlerin laminar yanma hızına ve Markstein uzunluğuna olan etkilerini farklı sıcaklıklar, eşdeğerlik oranları ve hidrojen zenginleştirme seviyelerinde incelemiştir. Hidrojen oranı arttıkça laminar yanma hızının yükseldiği belirlenmiştir.

Hidrojen Zenginleştirme ve Termo-Akustik Davranışlar ile alakalı yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir;

Kaufman ve ekibi [59] Düşük girdaplı sistemlerde metana hidrojen eklemenin termo-akustik kararsızlıkları nasıl etkilediğini incelemiştir. Yakıt karışımındaki hidrojen artışının alevin şeklini değiştirdiği ve termo-akustik kararsızlık azalttığı bulunmuştur.

Tuncer ve arkadaşları [60] Hidrojenle zenginleştirilmiş ön karışımlı metan alevlerinin dinamiklerini, NO_x emisyonlarını ve geri tepme özelliklerini incelemiştir. Artan hidrojen seviyelerinin alevin geri tepmeye olan duyarlılığını artırdığını göstermiştir.

1.3. Manyetik Alanların Yakıtın Yapısı ve Aleve Etkileri

Bu bölüm, manyetik alanların yakıt performansı, alev hızı ve yanma kararlılığı üzerindeki etkilerini incelen araştırmaları ele almakta ve bu konudaki güncel bilimsel bulguları derlemektedir. Manyetik alanların hidrokarbon yakıtlar, gazlar ve çeşitli yakıt türleri üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkileri ayrıntılı bir şekilde tartışılmaktadır. Özellikle, manyetik alanın alev kararsızlıkları, reaksiyon dinamikleri, gaz patlamaları ve yanma sıcaklıkları üzerindeki etkileri üzerinde durulmuş, ayrıca viskozite ve akış dinamiklerine olan katkıları da incelenmiştir. Bu çalışmalar, manyetik alanların yakıt karışımları ve yanma davranışları üzerinde nasıl önemli değişiklikler yaratabileceğini ve potansiyel olarak yanma verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Aşağıda literatürden alınan çalışmalar sunulmuştur

1.3.1. Manyetik Alanın Yakıt Performansı Üzerine Etkileri

Manyetik alanların hidrokarbon yapısı, özellikleri ve alev davranışı üzerindeki etkileri aşağıda tartışılacaktır. Farklı yakıt türleri üzerinde yapılan araştırmaların sonuçlarına göre manyetik alanların yanma süreçlerine olan etkileri incelenmiştir.

Shoogo ve diğerleri [61-63], metan, propan ve hidrojen gibi yakıtların manyetik alan altındaki alev yapısı ve gaz akışları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Her ne kadar farklı yakıtlar kullanılsa da manyetik alanın alevin şeklini büyük ölçüde değiştirdiği ve yanma hızını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Yanma hızının, manyetik alanın gradyanına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, yanma sıcaklığının ve hızının manyetik alana bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Farklı manyetik alan şiddetlerinin alev sıcaklığını düşürdüğü bulgulanmıştır. Metanolün manyetik alanda yanma sıcaklığı zaman içinde incelenmiştir ve 0.9T manyetik alanın alevi söndürdüğü tespit edilmiştir.

Wakayama'nın [64-67] çalışmaları, 0-1.5 T gradyan manyetik alan altında havadaki gaz akışının davranışını incelemiştir. Manyetik alanın oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği ve artan oksijen konsantrasyonunun manyetik kuvveti artırdığı gözlenmiştir. Metan difüzyon alevleri üzerine yapılan çalışmalarda, negatif bir gradyan alanının difüzyon alevlerinin yanma hızını artırdığı ancak ön karışımli alevler üzerinde neredeyse etkili olmadığı bulunmuştur. Homojen olmayan manyetik alanların ise difüzyon alevlerinde yanma reaksiyonlarını teşvik ettiği ve eğimli alanlardaki gaz akışının yanmayı artırdığı gözlemlenmiştir. Manyetik alanlar ayrıca konvektif hava akışları oluşturabilir ve mikro yerçekimi koşullarında yanmayı destekleyebilir.

Fujita ve diğerleri [68], mikro yerçekimi koşulları altında manyetik alanın laminar jet difüzyon alevi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Düşük (yaklaşık 0 mT) ve yüksek (yaklaşık 215 mT) manyetik alanlar altında yapılan çalışmada, manyetik alanın alev şekli, uzunluğu, parlaklığı ve rengi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Manyetik alanın artmasıyla alev uzunluğunun azaldığı ve alev renginin sıcaklık artışıyla sarıya döndüğü tespit edilmiştir.

Morozov ve diğerleri [69], sabit manyetik alanın yanma dalgasının yayılma koşullarını nasıl değiştirdiğini incelemiştir. Yapılan çalışmada, 0,27T manyetik alanda yanma hızının %30 arttığı görülmüştür. Yanma hızındaki artışın, manyetik alanın oluşturduğu yığılma derecesine bağlı olduğu belirtilmiştir. Yanma cephesindeki reaktiflerin iyonlaşması sonucu yanma elektromotor kuvvetinin geliştiği tespit edilmiştir.

Guo ve diğerleri [70], hidrokarbon yakıtların viskozitesine manyetik alanın etkisini incelemiştir. Artan manyetik alan gücünün viskozite değişimini artırdığı ve özellikle normal parafinik hidrokarbonlarda karbon atomu sayısının artmasıyla birlikte viskozite azalmasının daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Aynı çalışma ayrıca manyetik alanın hidrokarbonların yüzey gerilimini azalttığını da ortaya koymuştur.

Baker ve Varagani [71] laminar difüzyonlu yarıklı alevlerin düzensiz manyetik alanlar altında nasıl davrandığını incelemiştir. Yarıklı alevler, simetrik bir manyetik alanın elde edilmesinin kolaylığı nedeniyle matematiksel modelleme için tercih edilmiştir. Bu çalışmada maksimum alev sıcaklığında düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Gillion ve diğerlerinin araştırması [72] eksenel simetrik bir süperiletken manyetik alanın brülörlerdeki propan yanmasını nasıl etkilediğini ayrıntılı olarak incelemiştir. Bu çalışma, Lorentz kuvveti, kimyasal reaksiyonlara doğrudan etki ve oksijen üzerindeki dolaylı etki gibi mekanizmaları öne sürerek manyetik alanın yanma reaksiyonlarına olan etkisini açıklamıştır.

Gap ve diğerleri [73] çalışmalarında manyetik alanların alkane gaz patlamalarını bastırma etkisini araştırdılar. Alkane gazlarının patlama basıncı, basınç yükselme hızı ve alev yayılma hızı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmişlerdir. Alkane gaz patlamalarının mekanizması, deneysel sonuçların simülasyonla birleştirilmesiyle ve gradient manyetik alan kuvveti ile açıklamışlardır. Manyetik alan, alkane gaz patlamalarını önemli ölçüde zayıflatarak alev yayılma hızını ve patlama basıncını azalttığını tespit etmişlerdir. Bu etki etan gazı patlamalarında daha belirgin olduğunu tespit etmişlerdi. Manyetik alanın etki mekanizmasını, serbest radikallerin yörüngesini değiştirerek çarpışmaları engellemesi üzerine kurulu olduğu şeklinde açıklamışlardır.

Zharfa ve Karimi [74] yaptıkları çalışmada hidrojen-metan karışimli yakıtların tepkime akışına manyetik alanın etkisini incelemiştir. Yakıcıya giriş nozullarına engel eklenerek ve değişken yoğunlukta manyetik alan uygulanarak yapılan sayısal simülasyonlar, manyetik alanın orta düzey veya yoğun düşük oksijen seyreltme yanmasında gereken hava ön ısıtma sıcaklığını önemli ölçüde azalttığını göstermişlerdir. Ayrıca, uygulanan manyetik alanın yanma akışını kalınlaştırdığını ve ısısal salımı artırdığını ortaya koyduğunu tespit etmişlerdir.

Zhang ve Wie [75] yapmış oldukları çalışmada Katı yakıtlı ramjetlerin performansını artırmak için katı yakıtın yanma hızını değiştirmenin önemi araştırılmıştır. Katı yakıtın yanma hızını kontrol etmek için manyetik alanların etkisi deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Polimetil metakrilat (PMMA) çubuklarının farklı manyetik alan gradyanları altında regresyon hızları ölçülmüş ve alev yapısındaki değişiklikler kaydedilmiştir. Deney sonuçları, PMMA için regresyon hızının farklı manyetik alan etkileriyle düzenli olarak değiştiğini ve hızın 32.5% ile 10.8% arasında değiştiğini göstermiştir. Sayısal simülasyonlar, gaz fazlı yanma ve gaz-katı ısı transferini içeren sonuçlarla uyumlu bulunmuştur. Manyetik alanın, paramanyetik ve diyamanyetik malzemeler üzerindeki etkisi ile yanma hızının değiştiği gösterilmiştir. Farklı türde

manyetik alanlar kullanarak katı yakıtın yanma hızının düzenli olarak ayarlanabileceği ve katı yakıtlı ramjetlerde kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Xie ve diğerleri [76] yukarı doğru azalan manyetik alanların laminar biyogaz alevlerinin yanma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Manyetik alanın önceden karıştırılmış alevler üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı bulunmuş bunun nedeni ise enjekte edilen gazın düşük oksijen konsantrasyonu ve nispeten yüksek akış momentumu olmasıdır. Deneyde değişen oksijen dağılımları, daha iyi yanmayı ve yüksek alev sıcaklığını beraberinde getirdiğini tespit etmişlerdir.

Tung ve diğerleri [77], manyetik kuvvetlerin ham petrolün akışkanlığını nasıl etkilediğini ele almış ve manyetik alanların viskozite üzerindeki etkisini elektron mikroskobu analizi ile göstermişlerdir.

Loskutova ve diğerleri [78] manyetik alanın reçine, asfaltın ve parafin hidrokarbonlarının özellikleri üzerindeki etkisini incelemiş ve viskozite, antioksidan ve paramanyetik özellikleri gibi faktörleri etkilediğini göstermiştir.

Tao'nun [79, 80] çalışmalarında, güçlü ve darbeli manyetik alanın benzin ve dizel viskozitesini azaltabileceği gözlemlenmiştir.

Chang ve Weng'in çalışması [81], artan manyetik alanın sıvı su içindeki hidrojen bağlarını nasıl etkilediğine dair önemli bir bulguyu içermektedir. Bu çalışma, manyetik alanın moleküler kümelerin boyutunu kontrol edebileceği yönünde ilginç bir önermeyi gündeme getirmiştir.

Saksono'nun araştırması [82], gazyağı sobalarının verimliliği üzerinde manyetik yoğunluk, kutup yönü, yakıt akış hızı ve mıknatısın brülörden uzaklığı gibi çeşitli faktörlerin nasıl etkileri olduğunu ele almıştır. Bu çalışma, manyetizasyonun gazyağı sobalarının verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamıştır.

Kumar ve Shakher [83] ise bütan torç brülörü tarafından üretilen alevlerin manyetik alanın varlığı altında nasıl davrandığını detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Bu çalışmalar, manyetik alanın yakıt yanma sistemlerine olan etkilerini kapsamlı bir şekilde ele alarak, bu alandaki bilgi birikimini artırmış ve gelecekteki araştırmalara yön verme potansiyelini taşımaktadır.

Elamin ve arkadaşlarının araştırması [84] manyetik alanın dizel yakıtın özellikleri ve setan sayısı üzerindeki etkisini ele almıştır. Yoğunluk ve viskozite üzerindeki etkiler incelenmiş ve manyetizasyonun dizel yakıtının kalitesini artırdığı tespit edilmiştir.

Singh'in çalışması [85], manyetik alanın alev davranışı üzerindeki etkisini boyutsuz parametrelerle değerlendirmiş ve Froude, Grashoff ve Reynolds sayılarının önemini vurgulamıştır.

Wein-Fei Wu ve diğerleri [86] güçlü manyetik alan altında metanın yanma özelliklerini araştırmış ve manyetik alanın alev sıcaklığını nasıl etkilediğini incelemişlerdir.

Barmina ve diğerleri [87, 88], odun biyokütlesinin yanma davranışı üzerinde manyetik kuvvetin etkisini araştırmış ve manyetik alanın alev hızı, bileşimi, sıcaklığı ve yanma verimliliği profilleri üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde incelemişlerdir.

Aynı şekilde, Barmina ve arkadaşlarının çalışmaları [89], dönen alev dinamiklerinin gradyan manyetik alanın etkisi altındaki gelişimini ele almış ve bu etkinin uçucuların daha etkili tükenmesini ve temiz enerji üretimini sağladığını göstermiştir.

Zhou ve diğerleri [90] C₃H₈/hava karışımının patlama reaksiyonuna manyetik alanın etkisini ve mekanizmasını araştırmışlardır. Ferromanyetik ve diyamanyetik malzemelerin patlama bastırma performansı test edilmiş, ferromanyetik malzemelerin patlama bastırmada daha etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, DC manyetik alanın gaz patlamalarına etkisi incelenmiş, demir yüzeyin manyetize olmasının patlama bastırma yeteneğini artırdığı tespit etmemişlerdir.

Marouf ve ekibinin çalışması [91] manyetik alanın mum alevi üzerindeki etkilerini inceleyerek alev yüksekliği ile ömrü üzerine pozitif bir etki olduğunu tespit etmiştir.

Perdana ve arkadaşlarının araştırması [92], bitkisel yağın yanma özellikleri üzerine manyetik alan yöneliminin etkisini ele alarak, elektronun enerjik hale gelmesiyle hidrojen protonunun dönüşümünü açıklamış ve daha güçlü manyetik kutupların bitkisel yağın yanma hızını artırabileceğini göstermiştir. Bu çalışmalar, manyetik alanın yanma süreçleri üzerindeki etkilerini farklı açılardan ele alarak, yakıt teknolojilerine yeni bakış açıları sunmuş ve bu alandaki ilerlemeye katkı sağlamıştır. Oksijen ve su buharının manyetik alanlar altında davranışı, ısı dağılımı ve yanma üzerinde etkili oldu. Bu nedenle,

çekici manyetik alanda alev hızı en yüksek, itici manyetik alanda ise en düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Perdana [93] araştırmada zeytinyağı damlasının yanma sürecini evrim, sıcaklık, yükseklik ve ateşleme gecikmesi açılarından analiz etmiştir. Yüksek hızlı bir kamera ile görüntü alan yazar Zeytinyağı damlası, azot basınçlı bir yanma odasındaki iki manyetik çubuğun arasına K tipi termokupl üzerine yerleştiriliyor. Yanma odasındaki azot basıncı 0,5, 1 ve 1,5 bar olmak üzere üç farklı seviyede denemiştir. Sonuçlar, 0,5 bar azot basıncının daha istikrarlı bir alev evrimi ve alev stabilitesi sağladığını göstermiştir. Ayrıca, 0,5 bar basıncının, 1 bar ve 1,5 bar basınca göre daha yüksek sıcaklık ve daha kısa ateşleme gecikmesi sağladığı bulunmuştur. Bu, yüksek azot basıncının zeytinyağı buharının hava ile çarpışmasını engellediğinden kaynaklandığını deneysel olarak ortaya koymuştur.

Perdana ve diğerleri [94] yaptıkları çalışmada delikli plakaların çeşitliliği ve manyetik alanın yönünün önceden karıştırılmış yanmada hindistancevizi yağının alev özellikleri üzerindeki etkisini belirlemek istemişlerdir. Sonuçlar, delikli plakanın çeşitliliğinin alevin stabilitesi ve sıcaklığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. 11 delikli plaka, daha yüksek reaktan hızlarında daha istikrarlı bir alev ürettiği belirlenmiştir. Manyetik alan, 7 deliği olan delikli plakada 659°C sıcaklıkla laminar yanma hızını artırmada çok önemli bir rol oynadığını belirlemişlerdir. Bunun nedeninin elektron spin manyetik alanı yakıttaki karbon zincir bağlarının kırılmasından dolayı hızlanmasıdır.

Perdana ve diğerleri [95] çalışmalarında bitkisel yağın önceden karıştırılmış yanmasında manyetik alanın etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar, manyetik alanın elektron spinini enerjik hale getirerek laminar yanma hızını artırdığını ve bitkisel yağlarda daha güçlü elektrik kutuplarıyla bu etkinin daha belirgin hale geldiğini göstermişlerdir. Bu sonuç olarak, itme kutuplarında laminar alev hızının çekme kutuplarına göre daha düşük olduğunu belirlenmiştir.

Perdana ve diğerleri [96] çalışmalarında manyetik alanların yönünün ve varlığının kapok yağıyla yapılan premiks yanma üzerindeki etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. kapok yağı buharı ve hava karışımı, laboratuvar koşullarında, manyetik alan eklenerek yanmış ve alevin özellikleri ölçülmüştür. Sonuçlar, manyetik alanın çekici etkisinin, itici etkiye göre daha parlak, ince ve yüksek sıcaklıklı bir alev oluşturduğunu göstermiştir. Manyetik

alanlar alevde kimyasal bağları kırarak titreşimlere neden olurken, etraftaki oksijen içeriği yüksek sıcaklıklı yanma sağlar. Manyetik alan ayrıca alev etrafında hava akışına yol açarak ısı transferini artırır ve farklı alev yükseklikleri meydana getirdiğini belirlemişlerdir.

Iwata ve diğerleri [97], manyetik alanın etkisi altında girişteki hava akışının sayısal simülasyonunu yaparak, manyetik alanın hava akışını artırdığını ve basınç farkının iki katına çıktığını bildirmişlerdir.

Evdokimov ve Kornishin [98] manyetik yakıt koşullandırmanın yağdaki kolloidlerin ayrışması yoluyla viskozitenin azalmasına nasıl neden olduğunu gözlemlemişlerdir.

Legros ve diğerlerinin çalışması [99], yüksek manyetik yoğunluğun metan difüzyon alevi üzerindeki etkilerini incelemiş ve manyetik alanın titremenin artmasına ve alev reaksiyon bölgesinin genişlemesine yol açabileceğini belirtmiştir. Jalali ve ekibinin araştırması [100], manyetik alanın n-hekzan ve benzen gibi moleküller üzerindeki etkilerini ele alarak, manyetizasyonun moleküllerin titreşim durumlarını etkileyerek yakıtın kinetik enerjisinin ve serbest enerjisinin artabileceğini öne sürmüştür. Ugare ve diğerlerinin çalışması [101], manyetik alanın yakıt özellikleri üzerindeki etkilerini incelemiş ve benzinin yoğunluğunda azalma ve kalorifik değerde artış olduğunu tespit etmiştir.

Manyetik alanın yanma süreçlerine olan etkileri üzerine yürütülen çeşitli araştırmalar, bu alandaki önemli bulguları sunmuş ve yakıt yanma teknolojilerinin gelişimi için yeni görüşler ortaya koymuştur. Agarwal ve ekibinin çalışması [102], manyetik alanın difüzyon alevinin sıcaklık profili üzerindeki etkisini detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu araştırmada, manyetik alanın alev sıcaklığını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Morsi K.'nın araştırması [103], elektrikle çalışan yanma sentezi süreçlerinin prensiplerini ve son gelişmeleri ele alarak, elektrik alanının bu süreçlere sağladığı faydaları vurgulamıştır.

Boben, Ramnath ve Lyons [104] ise orta şiddetli manyetik alanın difüzyon alevlerinin sıcaklığına etkisini inceleyerek, azalan manyetik alanın yerel sıcaklıkta önemli bir artışa neden olduğunu bulmuşlardır. Agarwal ve Shakher [105], mikro alevin sıcaklık profili ve akış karakteristikleri üzerine manyetik alanın etkisini sayısal modelleme ve deneysel çalışmalarla incelemiş ve sonuçları ayrıntılı bir şekilde belirtmişlerdir.

Di Renzo ve diğerlerinin çalışması [106], metan-hava yanması için ayrıntılı kimyasal mekanizma kullanılarak gerçekleştirdikleri deneyde elektriksel bozulmaların yoğunluğu ile ilgili anlaşmazlıkları tartışmış ve olası kaynakları tanımlamışlardır.

Ramnath ve Lyons [107], düşük mukavemetli kalıcı mıknatıslar kullanarak propan difüzyon alevinin manipüle edilmesine yönelik bir yöntemi incelemişlerdir.

1.3.2. İçten Yanmalı Motorlarda Manyetik Alanın Etkisi

Bu kısımda, manyetik alanın motor performansı ve emisyon üzerindeki etkilerine odaklanmaktadır. Manyetik yakıt koşullandırmanın hem dizel hem de benzin motorları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırmalar, manyetik alanın uygulanmasının yakıt tüketimi ve motor performansı üzerinde nasıl iyileştirmeler sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, çeşitli motor türlerinde yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için manyetik yakıt koşullandırmanın potansiyel faydaları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmalar, manyetik teknolojinin motor teknolojisinde verimlilik ve çevresel sürdürülebilirlik açısından nasıl önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

1.3.2.1. Manyetik Alanda Motor Performansı ve Emisyonları

Govindasamy ve diğerleri [108] tarafından tek silindirli iki zamanlı kıvılcım ateşlemeli bir motora kuzey kutupları radyatör çekirdeğine bakacak şekilde değişen yoğunluklarda NdFeB mıknatıslar yerleştirilmiştir. Motorun Fren Termal Verimliliği ve tepe basıncı sırasıyla %3,2 ve %6,1 oranında artmış, yanmamış hidrokarbonlar ve Karbon monoksit azalmıştır. Başka bir çalışmada [109] tek kutup teknolojisini uygulamışlar ve manyetik güç arttıkça tepe basıncının her döngü için arttığı sonucuna varmışlardır. Govindasamy & Dhandapani [110] Jatropha Biyodizelinin manyetik koşullandırmasını tek silindirli dört zamanlı bir dizel motor üzerinde test etmiştir. Termal Verimlilik %5'e kadar artmış ve NO_x emisyonu sıfıra yaklaşmıştır.

Fatih ve diğerleri [111] tarafından dört silindirli dört zamanlı benzinli bir motorda kalıcı mıknatıslar kullanıldığında SFC'de %15'lik bir azalma ile birlikte CO, HC ve NO_x emisyon konsantrasyonunda bir düşüş elde edilmiştir. Ayrıca yakıtın manyetik iyonizasyonunun yakıt enjektöründe, karbüratörde ve yanma odasında biriken karbonun çözülmesine yardımcı olduğunu ve böylece motorun genel ömrünü uzattığını

gözlemlemişlerdir. Manyetik alan yakıtın daha tam yanmasına yardımcı olduğu için metan konsantrasyonu %40'a kadar azalmıştır.

Faris ve diğerleri [112] ultraviyole ve kızılötesi absorpsiyon spektrumlarını kullanarak manyetik alanın yakıtın mikro yapısı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Aromatik hidrokarbonlar manyetize edildiğinde ultraviyole absorpsiyon gücünün önemli ölçüde arttığını bildirmişlerdir. Artan absorpsiyon gücü, elektronların Π -bağı konjuge sisteminden daha yüksek enerji seviyelerine geçiş olasılığının artmasına karşılık gelmektedir. Daha fazla elektron temel halden daha yüksek enerji hallerine geçtikçe, aromatik halkalardaki C=C bağları yanma sırasında bölünerek moleküler kümelerin kırılmasına neden olur ve böylece yanma verimliliği artar. Testler, spesifik yakıt tüketiminin %14'e kadar azalma gösterdiği iki zamanlı kıvılcım ateşlemeli bir motora genişletilmiştir. UBHC ve CO emisyonu sırasıyla %30 ve %40'a kadar azalmış, ancak karbondioksit emisyonunda %10'luk bir artış kaydedilmiştir.

Habbo ve diğerleri [113] tarafından 1000G ve 2000G manyetik bobinler kullanılarak tek silindirli dört zamanlı bir VCR benzinli motorun performansı ve emisyonları, her biri 5 derecelik adımlarla 5 derece ile 30 derece ÜÖN arasında değişen ateşleme zamanlaması ile incelenmiştir. Özgül yakıt tüketiminde kayda değer bir düşüş ve egzozda önemli bir azalma kaydedilmiştir. Egzoz gazı sıcaklığında da %8'e varan bir düşüş kaydedilmiştir.

Tek silindirli, dikey bir dizel motorun hem yakıt hem de hava hatları Jain ve diğerleri [114] tarafından kalıcı mıknatıslar kullanılarak mıknatıslanmıştır. Yük 0 ila 10 kg arasında değiştiğinde yakıt tüketimindeki maksimum azalmanın en yüksek yüklerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Yazarlar, mıknatısların termal hasar görmesini önlemek için neopren yalıtım kullanılmasını önermişlerdir. Yaptıkları testlerde aracın kilometre performansı %10-40 aralığında artmıştır.

Siregar ve Nainggolan [115] tarafından düz karbon çeliği ve bakırdan oluşan çekirdeklere sahip iki elektromanyetik yakıt tasarrufu cihazı geliştirilmiş ve hem laboratuvar da hem de yol koşullarında test edilmiştir. Bakır çekirdeğin manyetik kuvvet oluşturmada çelikten daha etkili olduğu görülmüştür, ancak teori bunun tersini önermiştir.

Ünaldı [116] çalışmasında, çevre kirliliği ve petrol bazlı yakıtların tükenme riskine yanıt olarak yakıt tüketimi ve emisyonları azaltma yöntemlerini araştırmıştır. Araştırma,

karbüratörlü bir benzinli motorda manyetik bir alan cihazının emisyon üzerindeki etkilerini değerlendirerek, bu yöntemin emisyonları azaltma konusunda sınırlı etkinlik gösterdiğini ortaya koymuştur.

1.3.2.2. Manyetik Alanın Dizel ve Benzin Motorlar

Demirtaş [117] tarafından yürütülen çalışmada, bir benzinli motorun yakıt hattına uygulanan manyetik alanın yanma verimliliğini artırma ve egzoz gazlarını azaltma potansiyeli değerlendirilmiştir. Deneylerde, neodimyum mıknatıslar kullanılmış ve belirli motor devirlerinde istenmeyen gazlardan HC, CO ve CO₂ miktarında belirgin bir azalma sağlanmıştır.

Attar ve diğerleri [118], sabit bir dizel motorun yanı sıra 2000G ile 8000G arasında değişen manyetik şiddetler uygulanan bir motorlu bisiklet üzerinde testler gerçekleştirmiştir. Araç üzerinde yapılan testlerde motosikletin kilometresinin yaklaşık 7 kmpl arttığı tespit edilmiştir. Yazarlar, optimum durumun üzerindeki alan yoğunluğu değerlerinin motor performansını kötüleştirebileceğini, çünkü daha yüksek manyetik yoğunlukların yakıtın viskoz ısınmasına neden olduğunu öne sürmüşlerdir.

Garg ve diğerleri [119] tarafından manyetik olarak şartlandırılmış benzinle beslenen çeşitli otomobil markalarının motorları üzerinde bir dizi araç üstü deney gerçekleştirilmiştir. Tüm markalar performans ve emisyon özelliklerinde iyileşme göstermiş, ancak iyileşme yüzdesi motorun markasına bağlı olarak değişmiştir. Ortalama olarak kilometre performansı %15 ila 25 oranında artmıştır.

Vijayakumar ve diğerleri [120] tek silindirli dört zamanlı bir dizel motora Ni-Cu-Ni ile kaplanmış 6000G NdFeB mıknatıslar uygulamıştır. AFR'nin 31,38'den 33.8 ile performans ve emisyon özelliklerinde gözle görülür bir iyileşme sağlamıştır. Manyetik alanların moleküler radikalleşme yoluyla yakıtın iç enerjisini artırabildiğini ve bunun da daha kolay ve daha iyi yanma ile sonuçlandığını öne sürmüşlerdir.

Abdel-Rehim ve diğerleri [121] manyetik yakıt işlemenin yanmalı motorların performansı üzerindeki etkisini araştırmak için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Benzin, dizel ve doğal gaz, manyetik alana maruz bırakılan farklı konfigürasyonlara sahip iki farklı motorda test edilmiştir. Çalışmaları, mıknatıslanmanın en yüksek etkisinin diğer iki yakıtla kıyasla benzin yakıtı üzerinde olduğu sonucuna varmıştır. Manyetik alanların,

daha basit yapılara dönüşme kabiliyetleri nedeniyle sıvı faz yakıtlar üzerinde daha yüksek etkiye sahip olacağını öne sürmüşlerdir. Hidrokarbonlar üzerindeki manyetik etki, moleküllerin rastgele organizasyonu nedeniyle gaz fazında daha hızlı kaybolacaktır. Motorun yakıt ekonomisi, benzinle çalışırken uygulanan manyetik alanla %15,5'e kadar iyileşmiştir.

Patel ve diğerleri [122] katalitik konvertörün yanı sıra manyetik şartlandırma uygulamasıyla bir dizel motor üzerinde incelemeler yapmıştır. Her iki teknolojinin kombinasyonu ile performans ve emisyon özelliklerinde maksimum iyileşme elde edilmiştir. Egzozdaki CO₂ ve O₂ miktarı bu modifikasyonlarla artmıştır.

1.3.2.3. Manyetik Alanın Yakıt Tüketimi ve Motor Performansı

Khedawan & Gaikwad [123] bir buhar sıkıştırma sistemi için manyetik alanların hidrokarbon bazlı soğutucu akışkan R600 ve hidrokarbon bazlı olmayan R134A üzerindeki etkisini incelemiştir. Yakıt tüketimi ve egzoz konsantrasyonu aşağıdakiler için azalmıştır manyetik koşullandırma üzerine hidrokarbon bazlı R600. Manyetik alanın hidrokarbon bazlı olmayan soğutucu akışkanlar üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır.

Irak benzini ile çalışan bir Mercedes Benz motoru mıknatıslanmış ve Mohammed Al-Rawaf [124] tarafından incelenmiştir. Bu çalışmada yakıt tüketiminde %5,5'lik bir azalma ve fren ısı veriminde %13,5'e varan bir artış elde edilmiştir.

Gabina ve diğerleri [125], balıkçı gemilerinin enerji verimliliğini artırmada manyetik cihazların faydasını incelemiştir. Farklı çalışma koşulları altında üç farklı sıkıştırma ateşlemeli motor üzerinde üç bağımsız manyetik cihazı test etmişlerdir. Laboratuvar koşullarında daha büyük yüklerde yakıt tüketiminin azaldığı görülmüştür. Düşük motor devirlerinde CO emisyonlarında da kayda değer bir azalma gözlenmiştir.

Uzunsoy [126], araştırmasında, içten yanmalı motorlarda yakıt ekonomisi ve egzost emisyonlarını iyileştirmeye yönelik "Manyetik Koşullandırıcı" cihazlarının etkinliğini değerlendirmiştir. Bu çalışma, mıknatısların farklı kombinasyonlarını ve motorun farklı devir aralıklarını içeren deneylerle, manyetik alanın yakıt üzerindeki etkisini incelemiştir.

Balo [127] tarafından yapılan çalışmada, içten yanmalı motorlarda manyetik alanın yakıt ekonomisi ve egzost emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma, piyasada

mevcut sabit manyetik alan cihazları kullanılarak yapılmış ve bulgular, manyetik alanın motor performansı üzerindeki potansiyel faydalarını ve yakıt verimliliği ile emisyon azaltma potansiyelini ortaya koymuştur.

1.3.2.4. Manyetik Yakıt Koşullandırmanın Çeşitli Motor Türleri

Gad [128] tek silindirli, dört zamanlı bir kirloskar dizel motor üzerinde sadece tam yük ve yüksüz koşullarda deneyler gerçekleştirmiştir. SFC, yüksüz durumdan tam yüke doğru %3 ila %8,5 oranında azalmıştır. CO emisyonu %10 ve %4,5 oranında azalırken NOx sırasıyla %13 ve %24 oranında azalmıştır .

Yakıt girişine bir manyetik tüp dahil edildiğinde dizel jeneratörün performansı ve emisyonları üzerindeki etkisi Chen ve diğerleri [129] tarafından araştırılmıştır. Deneylerinde özgül yakıt tüketiminde %3,5'lik bir düşüş ve fren termal verimliliğinde aynı büyüklükte bir artış gözlemlenmiştir.

Tipole ve diğerleri [130] yakıt hattına manyetik akı entegre edilmiş bir dizel motorun performansını araştırmıştır. Deneyler, tek silindirli dört zamanlı bir dizel motor üzerinde, 0 ila 8 kg arasında değişen yük ile 1500 rpm sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Yakıt ekonomisindeki en yüksek iyileşme 9000 G'lik bir yoğunlukta gözlemlenmiş ve sonrasında yakıt tüketimi tekrar artmaya başlamıştır. Motor üzerindeki yük arttıkça yakıt tasarrufu modelinde bir düşüş gözlenmiştir.

Kurji ve Imran [131], enjeksiyon pompasından önce kalıcı mıknatıslar yerleştirilmiş tek silindirli dört zamanlı bir CI motor üzerinde testler gerçekleştirmiştir. Yakıt tüketimi azaldı mıknatıslanma nedeniyle azalan yüzey gerilimi sayesinde %15,71'e kadar. CO, HC ve NOx gibi emisyonlar da önemli ölçüde azalmıştır.

Sahoo ve Jain [132], nano yakıt katkıları ile bir dizel motorda manyetik yakıt koşullandırmanın etkisini araştırmıştır. CuO nano yakıt ile birlikte deney için 3000 G manyetik yoğunluğa sahip NdFeB mıknatıslar seçilmiştir. Manyetik alan yakıt partiküllerinin daha iyi atomize olmasını ve dağılmasını sağlayarak daha yüksek termal verimlilik elde edilmesini sağlamıştır. Mıknatısları yerleştirmek için ideal konumun deneysel olarak yakıt enjektörüne bitişik olduğu sonucuna varılmıştır. Yakıt ekonomisi ve termal verimlilikte ortalama %4'lük bir iyileşme gözlemlenmiştir. Karbon monoksit

ve NO_x, manyetik koşullandırma altında sırasıyla %17 ve %19 oranında azalma göstermiştir.

Çok silindirli bir benzinli motor üzerinde 9000 G manyetik yoğunluğun etkisi Niaki ve diğerleri [133] tarafından incelenmiştir. Manyetik yakıt koşullandırmanın yakıt ekonomisini %4 ila %12 aralığında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. HC ve NO_x emisyonları, manyetik alanın etkisi altında sırasıyla %18 ve %10'a kadar azalmıştır. arlıdır.

Oommen & Narayanappa [134] sıvı ve gaz fazındaki yakıtların (benzin ve LPG) manyetik alan destekli yanmasının bir otomobil motorundaki emisyon seviyeleri üzerindeki etkisini araştırmıştır. Manyetik alan yanmayı olumlu yönde etkilemiş ve her iki yakıt türünde de toksik bileşenleri azaltarak CO emisyonlarında %20,58 ve UBHC emisyonlarında %14,47 azalma sağlamıştır. Başka bir çalışmada [135], manyetik alan destekli LPG yanması ve kısmi EGR arasındaki etkileşimi araştırmışlardır. Uygulanan manyetik alanlar LPG yanma özelliklerini iyileştirerek yakıt ekonomisinde %13,8 ve fren termal verimliliğinde %3,9 artış sağlamıştır. Çalışmalarında [136], manyeto-ateşlemenin çok noktadan yakıt enjeksiyonlu bir otomotiv motorundan yayılan kirleticiler üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Manyeto ateşleme toksik emisyonları azaltmış ve hidrokarbon bileşimini yeniden yapılandırarak CO'da %23,97, UBHC'de %13,1 ve NO_x'te %5,23 azalma sağlamıştır. Benzinle beslenen bir motorla yapılan farklı bir çalışmada, yazarlar [137] manyetik alan altında yanma özelliklerini incelemiş ve motor performansının arttığını ve egzoz emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir. Son çalışmalarında [138], güçlü bir manyetik alan altında inert egzoz gazı ile karıştırılmış şarj yanmasını incelemişler, yakıt oksidasyonunun arttığını ve çevrim değişkenliğinin azaldığını gözlemlemişlerdir.

Pawar & Hudgikar [139], çalışmalarında, sabit mıknatısların benzin yanmasını geliştirebileceğini, egzoz emisyonlarını azaltırken içten yanmalı motorların performansını artırabileceğini öne sürmüşlerdir. Güçlü bir manyetik alanın yakıt yapısını değiştirerek daha iyi atomizasyona izin verdiğini gözlemlemişlerdir. Bu etki, yanma verimliliğini artırarak egzoz kirleticilerinin azaltılmasına yardımcı olurken yakıt tüketimini azaltabilir.

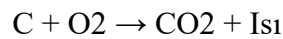
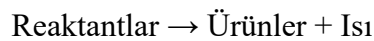
2. BÖLÜM

KAVRAMSAL TEMELLER

2.1. Yanma

Yanma için yapılan en basit tanım, bir yakıt ile oksitleyicinin ekzotermik tepkimeye girmesi şeklindedir. Başka bir tanımda yanma, “genelde alevlenme ve /veya ısıma ve /veya duman eşliğinde bir maddenin ısı vererek oksijenle reaksiyonu” şeklinde izah edilir. Yanma, enerji üretiminde kritik bir rol oynar ve kimyasal reaksiyonlar aracılığıyla yakıtta depolanan enerjinin serbest bırakılmasını sağlar. Buradaki anahtar kavramlar kimyasal dönüşüm ve enerji yayımıdır. Bu iki temel kavramın açıklanması yanmanın anlaşılması için önem arz eder. İki tip yanma reaksiyonu vardır. Bunlar ekzotermik (ısı yayan) ve endotermik (ısı alan).

Maddenin moleküler yapısında elektronlar düzeyindeki değişikliklere kimyasal reaksiyon adı verilmektedir. Reaksiyonlara girenlere reaktant, çıkanlara ise ürün adı verilir. Reaksiyona giren elemanlar yakıt ve oksidant olmak üzere iki gruba ayrılırlar.



Yakıt ve oksidant oranı yanma açısından önemlidir. Bu oran kütleli veya moleküler olabilir. Yakıt/oksidant oranına göre kullanılan hava teorik hava miktarından az ise eksik yanma, daha fazla hava miktarı kullanılıyorsa da fakir yanma olarak adlandırılır [140]

- *Ekzotermik Kimyasal Dönüşüm*: Yanma sırasında yakıt molekülleri, bir oksitleyici (genellikle oksijen) ile reaksiyona girerek enerji yayarak, genellikle CO₂ ve H₂O gibi daha kararlı ürünleri oluştururlar. Bu süreç, ekzotermik bir reaksiyon olarak tanımlanır çünkü reaksiyon sırasında çevreye enerji (ısı ve bazen ışık) yayılır [141].

-*Elektronegatiflik*; kimyasal reaksiyonlardaki elementlerin davranışını etkileyen temel bir özelliktir. Bir elementin elektronları çekme yeteneğini ölçerek oksitleyici veya yakıt olarak rolünü etkiler. Oksijen gibi yüksek elektronegatifliğe sahip elementler, elektronları kolayca çekerek oksidasyon reaksiyonlarını teşvik ettikleri için etkili oksitleyicilerdir. Tersine, düşük elektronegatifliğe sahip elementler elektron bağışlama eğilimindedir ve bu da indirgeme reaksiyonlarına girme eğilimleri nedeniyle onları uygun yakıt adayları haline getirir. Elektronegatiflik kavramı kapsamlı bir şekilde incelenmiştir ve bu özelliği doğru bir şekilde ölçmek için çeşitli ölçekler önerilmiştir. Elektronegatiflik değerlerini anlamak, elementlerin kimyasal reaksiyonlardaki davranışlarını tahmin etmeye yardımcı olur ve oksitleyici veya yakıt olarak uygulamalarına rehberlik eder [142].

Yanma reaksiyonları için genel denklem aşağıdaki gibidir:



Yanma bilimi, yanma verimliliğini artırmak, emisyonları azaltmak ve enerji kaynaklarını daha etkin kullanmak için bu kimyasal süreçlerin nasıl kontrol edileceğini ve optimize edileceğini anlamak üzerine yoğunlaşır.

Tablo 2.1’de verilen elektronegativite değerleri, çeşitli elementlerin yanma sürecindeki rollerini daha iyi anlamak için kullanılabilir. Yüksek elektronegativite değerlerine sahip elementler (ör. flor), genellikle güçlü oksitleyicilerdir ve düşük elektronegativite değerlerine sahip elementler (ör. sodyum) ise yakıt olarak kullanılabilirler. Burada, bir elementin oksitleyici veya yakıt olarak davranışı büyük ölçüde elektronegativitesine bağlıdır. Yanma sürecinde, genellikle düşük elektronegativiteye sahip elementler (yakıtlar) yüksek elektronegativiteye sahip elementlerle (oksitleyiciler) reaksiyona girer [143].

Tablo 2.1. Çeşitli Elementlerin Elektronegativiteleri [143].

Element	Elektronegativite
F	4
O	3,5
N, Cl	3,0
Br	2,8
C, S, I	2,5
H, P	2,1
B	2,0
Be, Al	1,5
Mg	1,2
Li, Ca	1,0
Na, Ba	0,9

2.1.1. Yanma ve Alev Tipleri

Temel bir kimyasal reaksiyon olan yanma, endüstriyel ve otomotiv ortamlarında kullanılır ve farklı modlara ayrılabilir. İki ana yanma türü vardır ve bunlar; alevli ve alevsizdir. Her biri farklı özelliklere ve uygulamalara sahiptir. Alevli yanma, ısı açığa çıkaran hızlı kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanan görünür bir alevi içerir [144]. Buna karşılık, alevsiz yanma, yanmanın görünür bir alev olmadan gerçekleştiği ve emisyon kontrolü ve verimliliği açısından avantajlar sunan bir moddur [145].

Alevli Yanma, ön karışım ve difüzyon alevi şeklinde iki çeşittir. Aşağıda tanımlanmıştır:

Ön Karışım Alevi: Yakıt ve oksidasyon maddesi (genellikle hava) yanma odasına girmeden önce karıştırılır. Bu homojen karışım alev önü boyunca yanar ve genellikle düzgün bir alev yolu izler. Ön karışım alevler temiz yanma ve düşük emisyon avantajları sunar. Ancak bu tip alevler vurutuya daha meyilli olabilir ve yakıt-hava karışımının doğru bir şekilde ayarlanması gerektirir.

Difüzyon Alevi: Yakıt ve oksidasyon maddesi ayrı ayrı yanma odasına girer ve ancak orada karışır. Alev, yakıtın hava ile temas ettiği noktada oluşur ve genellikle daha az kontrol edilebilir ve daha yüksek emisyonlara neden olabilir. Bu tür alevlere örnek olarak endüstriyel fırınlar, bazı gaz türbinleri ve mum alevleri verilebilir. Difüzyon alevlerinin kontrolü daha zordur ve genellikle daha yüksek emisyon seviyelerine neden olur, ancak yanma sırasında karışımın ayarlanabilirliği nedeniyle kullanışlıdır [146,147].

Her iki alev türünün de kendine has avantajları ve dezavantajları vardır ve uygulamanın gereksinimlerine göre doğru yakıt-hava karışım yöntemini seçmek önemlidir. Örneğin, emisyonların düşük olması gereken uygulamalarda ön karışım alevleri tercih edilirken, yanma odasındaki karışımın daha esnek kontrol edilmesi gereken durumlarda difüzyon alevleri daha uygun olabilir.

Alevsiz yanma veya Yüksek Sıcaklıklarda Oksidasyon: Bazı uygulamalarda, yüksek sıcaklıklar alev oluşturmada yanmayı başlatır. Bu tür alevsiz yanma, genellikle endüstriyel proseslerde ve emisyon kontrolünde kullanılır.

Vuruntu, yanma odasında istenmeyen yüksek basınç dalgalanmalarına yol açan anormal bir yanma olayıdır. Yanma odasının sıcak noktalarında veya birikmiş radikal tepkimeler sonucunda, hava-yakıt karışımı aniden yanabilir ve aşırı basınç dalgalarına neden olabilir.

Vuruntunun zararları, motor performansını ciddi şekilde etkileyebilir, yakıt ekonomisini düşürebilir ve motor bileşenlerine zarar verebilir. Bunun yanında yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında NO_x gibi zararlı emisyonların oluşumunu da artırabilir [146].

Yanma sürecinde, hava ve yakıtın nasıl karıştığı alev türünü belirler ve bu durum yanma verimliliği, emisyonlar ve kontrolün kolaylığı açısından önemlidir.

Yanma esnasında hava akış hızının ayarlanması, alevin zengin veya fakir olmasını kontrol edebilir. Karışımın fakir olması, yani oksijenin nispeten fazla olması, genellikle daha düşük alev sıcaklıklarına ve azaltılmış NO_x emisyonlarına yol açar. Karışımın zengin olması, yani yakıtın nispeten fazla olması, CO ve hidrokarbon gibi yanmamış veya eksik yanmış emisyonların artmasına neden olabilir [147]

Laminer Alev: Akım çizgilerinin düzenli olduğu, hava ve yakıt moleküllerinin düzgün ve düzenli bir şekilde karıştığı bir akış türüdür. Laminer akışta enerji ve madde taşınımı esas olarak moleküler difüzyon ile gerçekleşir ve alev genellikle düzgün ve sabittir [148].

Türbülanslı Alev: Akım çizgilerinin olmadığı, hava ve yakıt moleküllerinin kaotik ve düzensiz bir şekilde karıştığı bir akış türüdür. Türbülanslı akışta enerji ve madde taşınımı türbülans sayesinde artar, bu da yanma sürecini hızlandırır ve alevin yapısını daha düzensiz hale getirir [149].

Subsonik Alev: Alev hızının, ses hızından düşük olduğu durumlardır. Subsonik alevlerde moleküler difüzyon, yanma sürecinin hızını ve dolayısıyla reaksiyon hızını belirler. Günlük hayatta rastladığımız çoğu alev (mum, ocak, pilot alevi vb.) subsonik alev örnekleridir.

Süpersonik Alev: Alev hızının, ses hızından yüksek olduğu durumlardır. Süpersonik alevlerde konvektif taşınım, moleküler difüzyonu baskılar ve genellikle yüksek enerji içeren olaylarda (patlamalar, süpersonik jet motorları vb.) gözlemlenir.

Ses altı alevler tipik olarak geleneksel yanma sistemlerinde yaygındır, süpersonik alevler ise scramjetler ve darbe patlatma (Pulsejet) motorları gibi uygulamalarda çok önemlidir [150].

Homojen Yanma: Hava ve yakıtın aynı fazda olduğu ve moleküler seviyede tamamen karıştığı yanma türüdür. Gaz fazlı yakıtların yanması sırasında genellikle homojen yanma gerçekleşir.

Heterojen Yanma: Hava ve yakıtın farklı fazlarda olduğu ve karışımın yüzeydeki reaksiyonlarla sınırlı kaldığı yanma türüdür. Katı yakıtların yanması genellikle heterojen yanma örneğidir.

Her bir yanma türü ve alev karakteristiği, belirli uygulamalara ve koşullara göre avantajlar ve dezavantajlar sunar. Laminer akışın düzenliliği ve tahmin edilebilirliği, kontrol edilebilir bir yanma süreci için tercih edilirken, türbülanslı alevler daha hızlı ve tam bir yanma sağlayabilir. Yanma mühendisliği bu süreçleri anlamak ve çeşitli uygulamalarda en iyi performansı sağlamak için bu farklılıkları kullanır [147].

Alev Yapısı, alev bölgesinin iki ana kısmının yanı sıra reaksiyon bölgesinin detaylı incelemesi, yanma dinamiklerini anlamak açısından oldukça önemlidir. Aşağıda bu konseptlerin özetlenmiş hali bulunmaktadır:

Alev Bölgesinin Kısımları aşağıda verilmiştir;

1. Ön Isıtma Bölgesi:

- Alev bölgesinin ilk kısmıdır.
- Yakıt ve hava karışımı, reaksiyon bölgesine ulaşmadan önce bu bölgede ısınır.

- Isı ve radikallerin difüzyonu nedeniyle çok az kimyasal enerji salınımı gerçekleşir.
- Atmosferik basınçta, bu bölgenin kalınlığı genellikle milimetre mertebesindedir.

2. Reaksiyon Bölgesi:

- Kimyasal enerjinin büyük bir kısmının salındığı yerdir.
- Bu bölge daha da ikiye ayrılır:
- İnce Reaksiyon Bölgesi: Çok hızlı kimyasal tepkimelerin gerçekleştiği ve yakıt moleküllerinin parçalanıp, birçok ara türün olduğu kısım. Bu bölgede sıcaklık ve tür konsantrasyonu gradyanları yüksektir, böylece alevin yayılmasını sağlar.
- Geniş (İkincil) Reaksiyon Bölgesi: Daha yavaş kimyasal tepkimelerin, özellikle üçlü radikal rekombinasyon reaksiyonlarının baskın olduğu kısım.

Bu bölgede $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$ gibi reaksiyonlar gerçekleşir ve kalınlığı birkaç milimetreye kadar ulaşabilir.

2.1.2. Alevin Yayılma Mekanizması

Alev, reaksiyon bölgesinden ön ısıtma bölgesine ısı ve radikal türlerin difüzyonu sayesinde kendi kendine yayılır. Bu difüzyon işlemi, alevin sabit bir hızda ilerlemesini ve yanmamış karışımın yanma bölgesine doğru sürekli bir şekilde çekilmesini sağlar. Alevin bu ilerleme kabiliyeti, yanma sürecinin sürdürülebilirliği için kritik öneme sahiptir.

Alev Yapısının Önemi;

- Enerji Üretimi: Bu süreçler, motorların ve enerji sistemlerinin verimliliğini ve performansını etkiler.
- Emisyon Kontrolü: Reaksiyon bölgesinin dinamikleri, emisyonların türünü ve miktarını belirler. Özellikle CO_2 ve NO_x gibi zararlı emisyonların kontrolü için bu bilgiler önemlidir.
- Yanma Verimliliği: İnce ve geniş reaksiyon bölgelerinde gerçekleşen tepkimelerin anlaşılması, yanma süreçlerinin optimizasyonu için gereklidir.

Alev bölgesi ve reaksiyon mekanizmalarının bu detaylı anlayışı, yanma teknolojilerinin geliştirilmesinde ve çevresel etkilerin azaltılmasında temel bir rol oynar [146].

2.1.3. Yanma Termodinamiği

Eşdeğerlik oranı ϕ , yanma sürecinde kullanılan hava-yakıt karışımının oranını ifade eden önemli bir parametredir. Bu oran, karışımın stokiyometrik, zengin veya fakir olup olmadığını belirlemeye yardımcı olur. Eşdeğerlik oranının tanımı genellikle şu şekildedir:

$$\phi = \frac{(\text{Yakıt/Hava}) \text{ Gerçek}}{(\text{Yakıt/Hava}) \text{ Stoikiyometrik}} \quad (2.1)$$

Burada:

- $\phi = 1$ olduğunda karışım stokiyometrik olarak kabul edilir; yani yakıt tamamen yanmak için gerekli teorik hava miktarıyla tam bir denge içindedir.
- $\phi > 1$ olduğunda, karışım yakıt zenginidir; bu, yanma için gerekenden daha fazla yakıtın bulunduğu anlamına gelir ve genellikle daha düşük yanma sıcaklıkları ve artmış CO, H₂, ve HC emisyonlarına yol açar.
- $\phi < 1$ olduğunda ise, karışım yakıt fakirdir; bu durumda hava fazladır, yani yakıtın tamamen yanması için gerekenden daha fazla hava vardır ve genellikle daha yüksek yanma sıcaklıkları ve artmış NO_x emisyonları meydana gelir [151].

Eşdeğerlik oranının yanma verimliliği, emisyonlar ve alev karakteristikleri üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Stokiyometrik bir karışım ideal yanma koşullarını ifade eder ve genellikle en yüksek sıcaklığa ve dolayısıyla teorik olarak en yüksek enerji çıktısına ulaşılmasını sağlar. Ancak pratikte, motor tasarımı, yakıt türü ve çevresel düzenlemeler gibi faktörler eşdeğerlik oranının optimizasyonunu etkiler. Bu nedenle, yanma süreçlerini optimize etmek ve çevresel emisyonları kontrol altında tutmak için eşdeğerlik oranının dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir [147.]

2.1.4. Reaksiyon Entalpisi

Reaksiyon veya yanma entalpisi, bir kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen toplam entalpi değişikliğini tanımlar. Bu terim, sistemin enerji alışverişini ifade eder. Eğer bir

reaksiyon endotermik ise, yani reaksiyon sırasında çevreden enerji emilirse, reaksiyon entalpisi pozitif bir değer alır. Tersine, ekzotermik bir reaksiyon durumunda, reaksiyon sırasında sistemden çevreye enerji salınır ve bu durumda reaksiyon entalpisi negatif bir değere sahip olur. Bu entalpi değişiklikleri, bir kimyasal reaksiyonun enerji profilini anlamak için kritik öneme sahiptir.

$$\Delta h_R = h_{\text{ürün}}(T_f) - h_{\text{giren}}(T_R) \quad (2.2)$$

T_f , alev sıcaklığı; T_R , tepkimeye giren maddelerin sıcaklığıdır [152].

Kimyasal bir reaksiyonun entalpi değişimi, reaksiyona giren maddelerin ve oluşan ürünlerin kimyasal bağlarının kırılması ve oluşturulması sonucunda meydana gelen enerji değişimlerinden kaynaklanır. Bu nedenle, reaksiyonun stokiometrisi ve ürünlerin bileşimi, reaksiyonun entalpi değişimini doğru bir şekilde hesaplamak için belirlenmelidir. Kimyasal analiz, bu bileşimleri hassas bir şekilde belirleyerek, reaksiyonun entalpi değişimini doğru bir şekilde tahmin etmemize olanak tanır. Bu analiz, termodinamik açıdan bir reaksiyonun termodinamik verimliliğini veya enerji dönüşümünü de değerlendirmemize yardımcı olur. [153]. Bir yanma işleminde kinetik ve potansiyel enerji değişimi ihmal edilir, sistem tarafından herhangi bir iş yapılmadığı varsayılırsa, salınan ısı Q :

$$Q = -\Delta h_R \quad (2.3)$$

Evet, kimyasal reaksiyonlarda enerji dengesini hesaplamak için reaktanlar ve ürünlerin sıcaklık ve entalpi değerlerinin bilinmesi önemlidir. Oluşum entalpisi (H^0), bir maddenin en stabil formundan kimyasal bileşenlere ayrıştırılması durumunda serbest bırakılacak veya absorbe edilecek enerji miktarını ifade eder. Bu değer, her bir maddenin standart referans halindeki entalpi değeridir ve genellikle standard oluşum entalpisi olarak tablolar halinde verilir.

Bir kimyasal reaksiyonda salınacak veya absorbe edilecek toplam enerji miktarı, reaktanların oluşum entalpisinin toplamı ile ürünlerin oluşum entalpisinin toplamı arasındaki fark olarak hesaplanabilir.

Standard oluşum entalpisi değerleri, termodinamik hesaplamalar için temel bir referans noktası sağlar ve kimyasal reaksiyonların enerji profillerini analiz etmede kritik öneme sahiptir [154]

2.1.5. Kimyasal Denge

Kimyasal reaksiyonlar her zaman tamamlanmayabilir ve bu durumlar için reaksiyon karışımındaki stokiometrik dengenin sapmaları gözlemlenebilir. Bu tür durumlar, reaksiyonun tamamlanmaması veya tersinir (reversible) olması gibi durumlarla ilişkilendirilebilir. Termodinamiğin ikinci kanunu, bu gibi durumları açıklamak için kullanılan temel prensiplerden biridir.

Kimyasal dengenin tanımı, verilen sıcaklık ve basınç koşulları altında Gibbs serbest enerjisinin (G) minimum olduğu durum olarak ifade edilir. Gibbs serbest enerjisi, bir sistemin iş yapma kapasitesini ifade eder ve aşağıdaki denklemle verilir:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.4)$$

Gibbs serbest enerjisi; S , entropidir.

Burada, ΔH reaksiyon entalpisini, T mutlak sıcaklığı ve ΔS ise reaksiyon entropi değişimini temsil eder. Dengede, ΔG sıfıra eşit olur veya mümkün olan en düşük değeri alır. Bu, sistem enerjisindeki net değişimin sıfır olduğu anlamına gelir, yani sistemde enerji girişi veya çıkışı olmaz. Eğer ΔG negatifse, reaksiyon kendiliğinden gerçekleşir (ekzotermik reaksiyon); eğer pozitifse, reaksiyon enerji gerektirir (endotermik reaksiyon) [153].

2.1.6. Reaksiyon Kinetiği

Yanma prosesleri, enerji salımı açısından genellikle kimyasal reaksiyonların doğası ve şiddeti ile karakterize edilir, ancak tüm yanma türleri reaksiyon hızına aynı derecede bağımlı değildir. Bu, yanma sürecinin dinamiklerini belirleyen temel faktörlerden biridir ve farklı yanma türleri bu dinamiklere farklı şekillerde tepki verir.

Örneğin, patlama dalgaları, difüzyon alevleri, damlacık yanması ve sıvı püskürtmeli roket motorları gibi yanma türleri, büyük ölçüde kimyasal kinetiklerden bağımsızdır. Bu durumlar, yanma sürecinin daha çok maddenin fiziksel dağılımı ve ısı ile kütle transferi

mekanizmaları tarafından yönlendirildiği anlamına gelir. Özellikle, patlama dalgaları ve difüzyon alevleri, yanma ortamında hızlı enerji salımı ve maddelerin fiziksel hareketi ile karakterize edilir. Damlacık yanması ve sıvı püskürtmeli roket motorları ise, yakıtın fiziksel özelliklerine ve bu yakıtların oksitleyici ortamla etkileşim şekillerine bağlıdır.

Diğer taraftan, ön karışım alevleri ve içten yanmalı motorlar gibi sistemler, kimyasal reaksiyon kinetiklerine oldukça bağımlıdır. Bu tür yanma sistemleri, yakıt ve oksitleyicinin önceden karıştırılmasıyla işler ve reaksiyon hızı, yanma verimliliği ve motor performansı üzerinde doğrudan etkili olur. Ön karışım alevlerinde, yakıt-oksitleyici karışımı homojen bir şekilde dağıtıldığı için, kimyasal reaksiyonların hızı, alevin yayılma hızını ve dolayısıyla yanma verimliliğini belirler. İçten yanmalı motorlarda da durum benzerdir; motorun performansı, yanma odasındaki yakıt-oksijen karışımının ne kadar hızlı ve etkili bir şekilde yanabileceğine bağlıdır [153].

Kimyasal reaksiyonlar, gerçekleşme hızları ve etkileşimler açısından sistem şartlarına oldukça hassastırlar. Reaksiyon hızı, belirli bir süre içinde reaktanların tüketilme oranı veya ürünlerin oluşum oranı olarak tanımlanır ve bu, çeşitli faktörler tarafından belirlenir ve etkilenir.

1. **Reaktanların Konsantrasyonları:** Reaksiyon hızı genellikle reaktanların konsantrasyonlarına bağlıdır. Çoğu kimyasal reaksiyon için, reaktanların konsantrasyonları arttıkça reaksiyon hızı da artar. Bu, çoğu reaksiyonun hızının, reaktanların konsantrasyonlarının bir üssü ile orantılı olduğu anlamına gelir, ki bu ilişki reaksiyonun derecesini gösterir.
2. **Sıcaklık:** Sıcaklık artışı, moleküller arasındaki çarpışma frekansını ve enerjisini artırarak reaksiyon hızını genellikle artırır. Arrhenius denklemi, sıcaklığın reaksiyon hızı üzerindeki etkisini modellemek için kullanılır ve bu denklemde sıcaklıkla birlikte aktivasyon enerjisi de önemli bir rol oynar.
3. **Radyasyon Etkileri:** Bazı kimyasal reaksiyonlar, özellikle foto-kimyasal reaksiyonlar, ışık veya diğer radyasyon formlarının varlığında gerçekleşir. Bu tür reaksiyonlar, radyasyonun enerjisiyle tetiklenir ve bu enerji reaktan moleküllerin bağlarını kırmak için kullanılır.
4. **Katalizör ve İnhibitörler:** Katalizörler, reaksiyon hızını artıran ve reaksiyon sırasında tükenmeyen maddelerdir. Katalizörler, reaksiyonun gerektirdiği aktivasyon enerjisini

düşürerek hızı artırır. Öte yandan inhibitörler, reaksiyon hızını yavaşlatan maddelerdir ve genellikle reaktanlar ile rekabetçi bir şekilde bağlanarak veya reaktif ara ürünleri stabilize ederek çalışırlar.

Reaksiyon hızının niceliksel olarak ifade edilmesi genellikle reaktan veya ürün konsantrasyonlarının zamanla nasıl değiştiğinin bir oranı olarak yapılır. Bu, genellikle bir hız denklemi ile ifade edilir ve bu denklem, reaktanların konsantrasyonlarındaki değişiklikleri zamana göre türev olarak elde edilir. Bu tür bir analiz, reaksiyon mekanizmalarını anlamada ve kimyasal süreçleri optimize etmede çok önemli bir araçtır [154].

2.2. Yanma Kararsızlıkları

Yanma kararsızlıkları, yakıcıda bir veya birden fazla doğal akustik modun geniş genliğe sahip salınımlarını içeren olaylardır [155]. Diğer bir deyişle, ısı yayılım hızındaki değişiklikler nedeniyle oluşan zararlı basınç dalgalanmaları olarak tanımlanır [156]. Bu tür kararsızlıklar, yanma sistemi bileşenlerinde yıpranma ve zarara yol açar ve durum daha da kötüleşirse, yakıcıdan ayrılan parçaların aşağı akımda bulunan yanma odası bileşenlerine hasar vermesine neden olabilir. Dinamik veri analizleri, yakıcıda meydana gelen yüksek frekanslı radyal kararsızlıkların nozullarda hasara yol açtığını, bunun sonucunda yanma veriminde düşüş yaşandığını ve NO_x emisyonlarında artış olduğunu ortaya koymuştur [157, 158].

Yanma kararsızlıkları, itki sistemleri (örneğin, roketler, jet motorları, art yakıcılar), güç üretim tesisleri (gaz türbinleri gibi), ısıtma sistemleri (kombiler, radyant ısıtıcılar gibi), kazanlar ve endüstriyel fırınlar gibi çeşitli uygulamalarda geliştirme ve işletme sırasında karşılaşılan bir sorundur. Bu kararsızlıklar, genellikle yakıcının doğal akustik modlarından biri veya birkaçı ile salınımlı yanma süreci arasındaki geri besleme döngüsü yoluyla kendiliğinden tetiklenir.

Gaz türbin sistemlerinde yanma kararsızlıklarının ortadan kaldırılması, zararlı emisyonların azaltılması ve yakıcı sistemlerinin korunması amacıyla araştırmacıların yoğun ilgisini çeken bir konudur. Farklı yakıcı tipleri üzerine yapılan çalışmalar, bu kararsızlıkların neden olduğu zararları anlama ve çözüm yolları geliştirme açısından önem taşımaktadır. Yanma kararsızlıkları, yakıcı sisteminin doğal akustik modlarının

büyük genlikli salınımlar şeklinde tanımlanır. Bu kararsızlıklar, sadece gaz türbin yakıcılarında değil, roketler gibi yüksek hızlı sistemlerde ve endüstriyel ile konut ısıtma sistemlerinde de karşılaşılan bir sorundur. Kararsızlıkların varlığı, yakıcı sistemler için ciddi problemlere yol açabilir. Özellikle, basınç ve hız dalgalanmaları yanma odası duvarlarında yüksek termal gerilmelere sebep olur, bu da alevin geri tepmesine (flashback) ve sönmesine (blow-off) neden olabilir. Yanma kararsızlıkları genellikle yanma sistemlerinin doğal akustik modlarıyla ilişkili frekanslarda meydana gelir. Ancak bazı durumlarda, entropi dalgalanmaları veya alev bölgesinde oluşan bir girdabın da kararsızlıklara sebep olabileceği bilinmektedir [155].

2.2.1. Tarihsel Süreç

Higgins, 1777'de yanma dalgalanmalarını, yani "şarkı söyleyen alev" fenomenini ilk defa gözlemleyen bilim insanıdır [159]. Bu araştırmasında, açık uçlu bir boru içinde yanma sonucu oluşan gazların yaydığı ısıyla ses üretildiğini keşfetmiştir. Bu bulgu, Higgins'in ardından gelen birçok bilim insanının ilgisini çekmiş ve bu alanda derinlemesine çalışmalar yapılmasına yol açmıştır. Boru çapının ayarlanması sayesinde yüksek ses dalgaları üretilebileceği gözlemlenmiştir [160, 161] Faraday, Chladni, Rayleigh ve Tyndall gibi bilim insanları, farklı çapta borular ve küçük bir brülör kullanılarak gaz aleviyle önemli ses genlikleri elde edilebileceğini kanıtlamışlardır [161, 162]. Bu çalışmalar, uygun koşullar altında, yakıcı alev etkileşiminin akustik dalgalanmalar yaratabileceğini göstermiştir.

Leiden Üniversitesi'nde profesör olan Petrus Leonardus Rijke, 1859'da iki ucu açık ve farklı çap ölçülerine sahip cam bir tüp içerisine, demir tellerden oluşturulan daire şeklinde bir yapı yerleştirerek ses dalgaları üretmiştir [163] Isıtılan bu tel yapının, yüksek ses seviyelerinde ve kısa süreli dalgalar oluşturduğu gözlenmiştir. Tüp içine farklı noktalara birden fazla tel yapısı yerleştirerek sesin süresini artırmış, tüpün üst kısmını kapattığında ise sesin aniden kesildiğini belirlemiştir. Rijke ayrıca, tüp uzunluğunun ses üretimi üzerindeki etkisini araştırarak, 0,2 metre ve altındaki uzunluklarda ses oluşumunun gerçekleşmediğini saptamıştır. En yoğun ses dalgalarının, tel yapının tüpün altından yaklaşık $\frac{1}{4}$ yükseklikte konumlandırıldığında oluştuğunu tespit etmiştir. Tel malzemesinin ısı kapasitesi ve ısı dağılımı özelliklerinin ses üretim süresini etkilediği

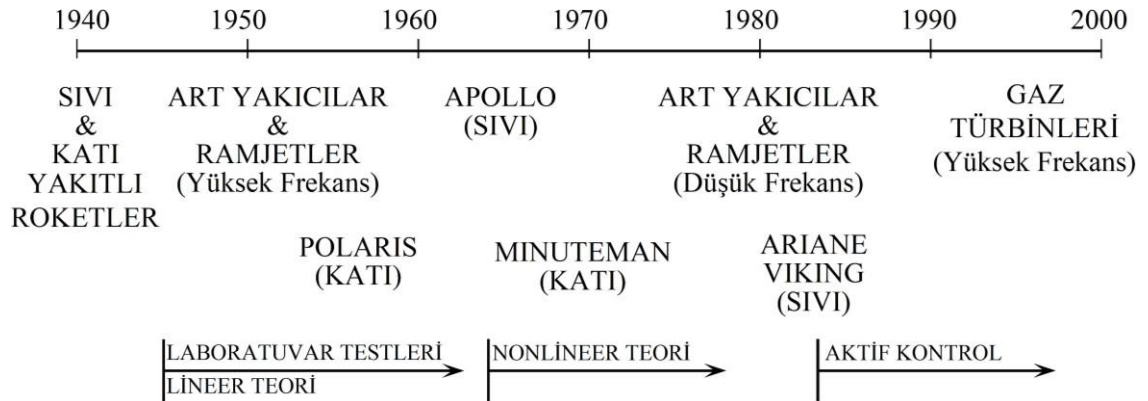
bulgusuna ulaşmıştır. Aşağıda şekil 2.1’de Higgins ve Rijke’nin deney düzenekleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Higgins (sol) ve Rijke’nin (sağ) deney düzenekleri

2.2.2. Motor Teknolojileri Alanında Yapılan Çalışmalar

Geçmiş dönemlerde, geleneksel gaz türbin motorlarında, yakıt ve havanın yanma odasına ayrı girişlerden sağlanması ve reaktan akış oranlarının dikkatlice kontrol edilmesiyle kararlı alevler üretiliyordu. Ayrıca, ikincil ve üçüncül hava akımlarının karışımı sayesinde, gazın sıcaklığı, türbinin istenilen giriş sıcaklığında düşürülüyor; bu şekilde, yakıt ve havanın yanma odasında karıştırılmasıyla çalışan difüzyon tipi yakıcılar aracılığıyla alev geri tepmesi olayı engelleniyordu. Türbin tasarımcıları, bu tip yakıcıların sunduğu avantajlardan yıllarca yararlandı. Ancak, günümüzün katı emisyon standartları nedeniyle, difüzyon tipi yakıcıların yerini daha düşük yanma sıcaklıkları ve termal NO_x emisyonları sağlayan fakir ön karışimli yakıcılar almıştır [164]. Yüksek performanslı modern gaz türbin motorlarının geliştirilmesinde kritik öneme sahip olan bu yeni tip yakıcılar, düşük NO_x emisyonları sunmalarına rağmen, yanma kararsızlıkları konusunda daha hassas olabilirler. Yanma dinamikleri, akışkanlar mekaniği, termodinamik, kinetik, akustik, hidrodinamik, kontrol teorisi ve dinamik sistemler gibi alanlarda derin bilgi gerektiren yanma kararsızlıkları, 1940'lardan bu yana katı ve sıvı yakıtlı roket motorlarından günümüz gaz türbin motorlarına, endüstriyel fırınlardan ev tipi ısıtıcılara kadar birçok yanma sisteminde önemli bir sorun olmuştur [165]. Aşağıda Yanma kararsızlıklarının tarihsel süreci verilmiştir.



Şekil 2.2. Yanma Kararsızlıklarının Tarihsel Süreci [166].

1940'ların başında yanma kararsızlıklarını anlamak ve tanımlamak için kurulan tam ölçekli laboratuvar sistemlerine rağmen, basınç ölçüm ekipmanlarının yetersiz hassasiyeti nedeniyle bu alanda önemli bir ilerleme kaydedilememiştir. Ancak, 1950'lerde ölçüm teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde akustik titreşimler ve zayıf şok dalgaları gibi kararsızlık özellikleri tanımlanabilir hale gelmiştir. 1980'lerde yeni itki sistemleri üzerine yapılan çalışmalar ve 1990'larda Ariane 5 roketlerinde gerçekleştirilen düşük frekanslı dalgalanmalar üzerine yapılan araştırmalar, yanma kararsızlıkları alanındaki bilgi birikimini genişletmiştir. 1990'ların sonlarına doğru, yanma kararsızlıkları üzerine yapılan çalışmalar, temel kimyadan motorların iç dinamiklerine kadar geniş bir aralığı kapsar hale gelmiştir [166].

2.2.3. Yanma Kararsızlığı Çeşitleri

Gaz türbin sistemlerinde yanma kararsızlıkları, zararlı emisyonların artışına ve yakıcı sistemine zarar vermesi nedeniyle araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Bu kararsızlıklar, farklı yakıcı tiplerinde gerçekleşebilir ve yakıcı sisteminin doğal akustik modlarının büyük genlikli salınımları şeklinde tanımlanır. Gaz türbin yakıcılarının yanı sıra, roketler gibi yüksek hızlı sistemlerde ve endüstriyel ile konut ısıtma sistemlerinde de karşılaşılan yanma kararsızlıkları, genel olarak ciddi problemlere yol açabilir. Bunlar, yakıcı sistemler için zarar verici büyüklükte olabilir ve sonuç olarak yanma odası duvarlarında yüksek termal gerilmeler oluşabilir; bu durum alevin geri tepmesine (flashback) ve sönmesine (blow-off) sebep olabilir.

Yanma kararsızlıklarının meydana gelmesi, genellikle yanma sürecinin doğal akustik modlarıyla ilişkili frekanslarda gerçekleşir. Ancak, bazı durumlarda, bir entropi dalgası veya alev bölgesinde oluşan bir girdap gibi diğer faktörler de kararsızlıklara neden olabilir. Bu karmaşık etkileşimler, yanma sistemlerinin stabilitesini sağlamak ve olası zararları en aza indirmek için detaylı bir şekilde anlaşılmalı ve modellenmelidir. Bu nedenle, yanma kararsızlıklarının ortadan kaldırılması veya kontrol altına alınması hem çevresel etkileri azaltma hem de sistem güvenliğini artırma açısından kritik öneme sahiptir. Bu amaçla, pasif ve aktif kontrol yöntemleri gibi çeşitli stratejiler geliştirilmekte ve uygulanmaktadır. Pasif kontrol yöntemleri, sistem tasarımında yapılan değişikliklerle kararsızlıkları azaltmayı hedeflerken, aktif kontrol yöntemleri, sistem dinamiklerine doğrudan müdahale ederek kararsızlıkları kontrol altına almaya çalışır. Bu çalışmalar, daha verimli, güvenli ve çevreye duyarlı yanma sistemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunur [155].

2.2.3.1. Statik Yanma Kararsızlıkları

Statik yanma kararsızlıkları, yanma sistemine harici bir etki olmaksızın, ısı yayılımıyla tetiklenen akustik salınımlar üzerinden, alev sönmesi ve geri tepmesi olaylarını dinamik kararsızlıklardan ayırmak için kullanılır [167, 168, 169]. Bu ayrım, özellikle fakir ön karışımli gaz türbin yakıcılarında önemlidir, zira bu yakıcılar dar çalışma aralıklarına sahiptir ve sıkça alev sönmesi ve geri tepme ile karşılaşır. Yakıtın fakir koşullar altında yanması, yakıt kompozisyonundaki, hava sıcaklığındaki ve nemdeki minimal değişikliklere özellikle yük altındayken oldukça duyarlıdır. Bu tür değişkenler altında, yanma sistemi alevin stabilizasyonunu sağlayacak yöntemler yetersiz kaldığında, alev sönmesine ya da geri tepmeye sebep olabilir.

Geri Tepme: Geri tepme olayı, alevin brülör ucundan geriye doğru, bağlantı hortumlarına doğru ilerlemesiyle başlar ve genellikle yüksek sesli bir gürültüye veya ısıklık benzeri bir sese neden olur. Bu olay, özellikle homojen olmayan türbülanslı akışlarda, türbülanslı alev hızının yayılmasıyla ilişkilidir. Ön karışımli nozulların yeterince soğutulmaması halinde gerçekleşen alev geri tepmesi, ciddi güvenlik riskleri oluşturur ve malzeme sıcaklığında ani bir artışa sebep olarak sisteme kalıcı hasarlar verebilir. Bu durum, yanma sistemlerinin güvenliği ve verimliliği açısından önemli sorunlara yol açabilir. Alev geri tepmesi, türbülanslı alev hızının yakıt-hava karışımının yanma odasına

giriş hızından daha fazla olduğu durumlarda meydana gelir ve alevin, ön karışım bölgesinde aşağı akıma doğru yayılmasıyla devam eder. Alev geri tepme mekanizması, yoğun bir şekilde incelenmiş olmasına rağmen, mekanizmanın karmaşıklığı nedeniyle önemini korumaktadır [156]. Geri tepmenin temel olarak üç farklı türü tanımlanmıştır:

Serbest Gaz Akışında Meydana Gelen Geri Tepme: Bu tür, akışkanın serbest akışında, yani herhangi bir engelle karşılaşmadan meydana gelir.

Sınır Tabaka Bölgesinde Meydana Gelen Geri Tepme: Bu, ön karışım bölümünde duvarlar ve akışkan arasında meydana gelen ve bu bölgedeki akışın yavaşlaması ile karakterize edilen bir geri tepme türüdür.

Girdap Destekli Yanma Sistemlerindeki Geri Tepme: Girdap oluşumunun kaynaklı olduğu ve özellikle girdap destekli yanma sistemlerinde görülen bir geri tepme türüdür.

DeneySEL çalışmalarda, çalışma koşullarına ve yanma odası tasarımına bağlı olarak alevin ön karışım bölgesine yayılmasına neden olan dört farklı geri tepme mekanizması belirlenmiştir: çekirdek akışta türbülanslı alev yayılması, yanma kararsızlıklarından kaynaklanan alev geri tepmesi, sınır tabakada alev geri tepmesi ve vorteks yıkımı dinamiklerinden kaynaklanan çekirdek akıştaki alev geri tepmesi [170, 171]. Bu mekanizmalar, girdaplı ve girdapsız ön karışımlı yakıcılarda görülebilir, ancak sonuncusu karışım bölgesinde girdaplı bir akışı gerektirir. Yakıt kompozisyonunun her bir mekanizma üzerindeki etkisi farklılık gösterir [172].

Özellikle, ön karışımlı yanma mekanizmalarında, ön karışım kısmındaki türbülanslı alev hızı, çıkıştaki bölgesel akış hızından daha yüksek olduğunda geri tepme riski artar. Fakir karışım yanmalarında alev hızları genellikle düşük olmakla birlikte, yüksek sıcaklıklardaki motor çevrimleri gibi durumlarda artan basınçlar ve türbülanslar nedeniyle alev hızları artabilir. Yüksek sıcaklık seviyeleri, gazlarda ön reaksiyonların meydana gelmesine ve böylece alev hızının artmasına neden olur. Bu durum, akış hızının istenilen en düşük seviyenin çok üzerine çıkarılmasını gerektirerek geri tepme oluşumunun önüne geçilmesi için stratejiler geliştirilmesini zorunlu kılar [173].

Ön karışımlı yakıcılar, yapısı gereği alev geri tepme eğilimindedir. Bu, alevin yanma odasından yakıcının ön karıştırıcı kısmına, yani yukarı akıma doğru hareket etmesi olarak tanımlanabilir [173]. Alev geri tepmesi en sık, akışın ters yönlü hareket etmesi sonucu

meydana gelir. Bu ters akış, yanma kararsızlıkları sonucu oluşabileceği gibi, alev hızının akış hızından fazla olduğu durumlarda da gerçekleşebilir. Fakir yanma alev hızını düşürürken, yüksek sıcaklık, basınç ve türbülans alev hızını artırabilir. Dolayısıyla, yanma sürecinde olası bozuklukları önlemek için ön karıştırıcı kısımdaki akış hızının yeterli miktarda artırılması önemlidir [174]

Geri tepme oluşumunu önlemek için yanma sistemlerinin tasarımı ve işletilmesi sırasında dikkatli önlemler alınmalıdır. Bu önlemler arasında, yanma odasının geometrisinin optimize edilmesi, uygun yakıt-hava karışım oranlarının kullanılması ve akışkan dinamiklerinin doğru bir şekilde yönetilmesi yer alır. Bu stratejiler, yanma sistemlerinin daha güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir.

Geri tepme olayı sırasında yakıcı içerisinde meydana gelen yüksek seviyedeki dinamik basınç dalgalanmaları, brülörlerde hasara neden olabilir. Bu tür hasarlar, sadece onarım için ek maliyetler gerektirmez, aynı zamanda yanma sisteminin bütünlüğünü ve güvenliğini de riske atar. Geri tepme ve yanma kararsızlıkları, yanma sonu emisyonları üzerinde de olumsuz etkilere sahip olabilir; özellikle, zararlı NO_x emisyonlarının önemli seviyelerde artışı bu durumlardan biridir [175].

NO_x emisyonları, yanma sırasında yüksek sıcaklık koşullarında azotun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Geri tepme ve buna bağlı yanma kararsızlıkları, yanma odasında anormal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşumuna yol açabilir, bu da NO_x oluşumunu katalize eder. Dolayısıyla, geri tepmenin önlenmesi ve yanma kararsızlıklarının etkin bir şekilde kontrol altına alınması, yanma sisteminin performansı ve çevresel etkileri açısından kritik önem taşır.

Yanma sistemlerinde geri tepme olaylarının önlenmesi ve dinamik basınç dalgalanmalarının minimize edilmesi için çeşitli stratejiler geliştirilmiştir. Bu stratejiler arasında, yanma odası geometrisinin optimize edilmesi, uygun yakıt-hava karışım oranlarının sağlanması, akustik sönümleyicilerin kullanılması ve aktif kontrol yöntemlerinin entegrasyonu yer alır. Bu yaklaşımlar, sistemin daha stabil çalışmasını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda NO_x gibi zararlı emisyonların azaltılmasına da katkıda bulunur. Böylece, yanma sistemlerinin hem daha güvenli hem de çevreye daha az zararlı olması sağlanabilir [176].

Çekirdek akıştaki türbülanslı alev yayılmasının neden olduğu alev geri tepmesi, alevin yanma hızından daha düşük akış hızlarına sahip her yere yayılma eğiliminde olmasıyla karakterizedir. İyi tasarlanmış yakıcılarda, alevin içeriye yayılmamasını sağlamak için yüksek hızlı aksenel akış üretecek şekilde nozullar dizayn edilir. Bu koşulların sağlanmadığı durumlarda, özellikle yüksek yayılma hızlarına sahip yakıtlar kullanıldığında, alev geri tepmesi meydana gelebilir. Yüksek türbülanslı akışlar, yanma karışımının daha homojen bir yapıya sahip olmasını sağlar, bu da daha kısa alevlere ve potansiyel olarak alev geri tepmesine yol açabilir. Dolayısıyla, çekirdek akıştaki türbülanslı alev yayılmasının neden olduğu alev geri tepmesini önlemek için yakıcı geometrisinin optimizasyonu büyük önem taşır.

Yanma kararsızlıklarına bağlı alev geri tepmesi, yanma kararsızlıkları sonucu ortaya çıkan hız dalgalanmaları ile ilgilidir. Bu hız dalgalanmaları, akış hızında düşüşlere ve büyük ölçekli girdapların oluşumuna neden olur, bu da alev geri tepmesine yol açar. Bu mekanizma, yakıt kompozisyonundan bağımsızdır ve yanma odası akustiğinin neden olduğu titreşimlerin engellenmesi için akustik sönümleyicilerin kullanılması önerilir [177].

Sınır tabakaya bağlı alev geri tepmesi, yakıcının katı yüzeyleriyle doğrudan temas halinde olan gazların viskoz etkileri nedeniyle düşük hızlara sahip olmasıyla ilgilidir. Alev, bu düşük hızlı bölgelere doğru hızla yayılır. Bu sorunu çözmek için sınır tabaka kalınlığını mümkün olduğunca düşük tutmak ve yerel ayrılma ile duvar sınır tabakalarını artırabilecek difüzör bölgelerinden kaçınmak gerekir.

Vorteks yıkımı dinamikleri kaynaklı alev geri tepmesi, girdaplı akışlar ve ısı salınımı arasındaki etkileşim sonucunda gerçekleşir. Düşük girdap sayılarında, girdap kopmaları meydana gelmezken, yüksek girdap sayılarında alevin girdap kopmalarına yol açması ve akışta ani geçişlere neden olmasıyla baloncuk şeklinde yukarı akıma doğru hareket eden kopuk girdaplı akış geri tepmeye yol açar [178].

Alev Sönmesi: Yakıcının statik kararlılığı genellikle, alev çekirdeğinin ideal konumundan ayrılmasıyla ilişkilendirilen bir durumdur. Alev sönmesi, reaksiyon hızları ile yüksek hızda gerçekleşen yayılma oranları arasındaki etkileşimleri içerir ve karşılaşılan yakıcılarda yeniden başlatma, tahliye ve kapatma gibi maliyetli sistemlerin kullanımını zorunlu kılar [156]. Geçmiş araştırmalarda, farklı teorik ve fiziksel

değerlendirmelerle alev sönmesi üzerine çalışılmıştır. Alev sönmesi olayının, resirkülasyon bölgesine giren reaktanların miktarının yetersizliği veya kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan ısı ve sıcak resirkülasyon akışı arasındaki enerji dengesinin sağlanamaması durumunda meydana geldiği belirlenmiştir [179, 180, 181.]. 20. yüzyılın sonlarında yapılan çalışmalarda, yanıcı gaz karışımı ile sıcak kayma tabakası arasındaki temas süresinin kimyasal ateşleme süresinden kısa olduğu durumlarda alev sönmesinin gerçekleştiği gösterilmiştir [182].

Alev sönmesi, özellikle gaz türbinli motorlar gibi yanma sistemlerinde ciddi bir sorun oluşturur. Bu olay, akışın çok yüksek olduğu durumlarda veya yakıt miktarının önemli ölçüde düşürüldüğü zamanlar, alevin kararlı bir şekilde yanmaya devam edemeyip akış yönünde yayılarak sönmesi şeklinde gerçekleşir [183]. Fakir karışım durumlarında görülen bu fenomen, giriş havası sıcaklığı, basıncı, hızı ve türbülansı gibi faktörlerle de yakından ilişkilidir.

Yanma sayısı ve Damköhler sayıları türbülanslı yanma çalışmalarında önemli parametrelerdir. Araştırmalar, Damköhler sayısının türbülanslı hızı ve skaler istatistikleri etkilemede önemli bir rol oynadığını göstermiştir [184]. Çok gergin koşullar altında veya düşük Damköhler sayılarında yanma, stabilite için alev yapısını ve kimyasal durumları etkileyerek harici entalpi kaynakları gerektirir [185]. Harici entalpi desteği, normal yanıcılık sınırlarının ötesinde yanmayı sağlayarak, Damköhler sayıları birlik civarında olan yalın türbülanslı önceden karıştırılmış alevlerde emisyonları ve yakıt tüketimini etkileyerek yanmayı etkileyebilir [186]. Türbülanslı önceden karıştırılmış alevlerde akışkan hızı istatistiklerinin analizi, özellikle yüksek Damköhler sayıları altında Damköhler sayısı ve ısı salınım parametrelerinin önemini ortaya koymaktadır [187]. DeneySEL araştırmalar ayrıca, Reynolds ve Damköhler sayılarının alev özellikleri üzerindeki etkisini vurgulayarak türbülanslı bir yanma diyagramında farklı yanma rejimlerini araştırmıştır [188].

Damköhler sayısı, Alman kimyager Gerhard Damköhler'in adıyla anılan ve alev sönmesi limitlerinin başarılı bir şekilde tahmin edilmesini sağlayan bir yaklaşım ile tanımlanmıştır. Noble ve diğerleri tarafından Damköhler sayısı, denklemler 2.5-2.9'de belirtildiği şekilde formüle edilmiştir.

$$Da = \frac{\text{Reaksiyon Oranı}}{\text{Yayılma Oranı}} = \frac{\text{yayılma Zamanı}}{\text{Reaksiyon Zamanı}} \quad (2.5)$$

$$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}} = \frac{\text{Reaktantların Reaksiyon Bölgesinde Kalma Süresi}}{\text{Reaksiyon için Gereken Süre}} \quad (2.6)$$

$$\tau_{res} = \frac{d}{U_{ref}} \quad (2.7)$$

$$\tau_{chem} = \frac{\alpha}{S_L^2} \quad (2.8)$$

$$Da = \frac{\tau_{res}}{\tau_{chem}} = \frac{S_L^2 \cdot d}{\alpha \cdot U_{ref}} \quad (2.9)$$

Burada;

- Da (Damköhler sayısı),
- S_L (laminer yanma hızı),
- d (karakteristik uzunluk ölçeği, yani resirkülasyon bölgesinin uzunluğu),
- α (termal difüzyon veya ısı yayılma),
- U_{ref} (referans hız ölçeği)

Damköhler sayısı yukarıdaki terimler ile tanımlanır.

Bu sayı, reaktanların reaksiyon bölgesindeki kalış süresinin kimyasal reaksiyona ihtiyaç duyulan süre ile oranını ifade eder. Reaktanların reaksiyon bölgesindeki kalma süresi, kimyasal kinetik süreden kısa olduğunda, yani reaksiyon için gereken zamandan daha az bir süre içerisinde reaktanlar reaksiyon bölgesinden ayrılırsa, alev sönmesi meydana gelir. Bu durumda, alev, kararsızlaşarak aşağı akıma doğru ilerler. Kimyasal reaksiyonun hızlı gerçekleştiği durumlar için Damköhler sayısı yüksektir ($Da \gg 1$), bu da reaksiyonun hızlı gerçekleştiğini gösterir. Aksine, Damköhler sayısı düşük olduğunda ($Da < 1$), bu, reaktanların akış hızının kimyasal reaksiyon süresinden daha hızlı olduğu anlamına gelir, dolayısıyla alev sönme olasılığı artar [189].

Alev sönmesi mekanizmasının matematiksel bir açıklaması için Damköhler sayısı, kritik bir parametre olarak kullanılır. Damköhler sayısı, reaksiyona girmesi gereken bileşenlerin reaksiyon bölgesinde kaldıkları sürenin, teorik olarak kalmaları gereken süreye oranını ifade eder. Eğer bu bileşenler, reaksiyon bölgesinde yeterince kalmazsa, yani Damköhler sayısı düşük bir değer alırsa, alev sönmesi meydana gelir [190].

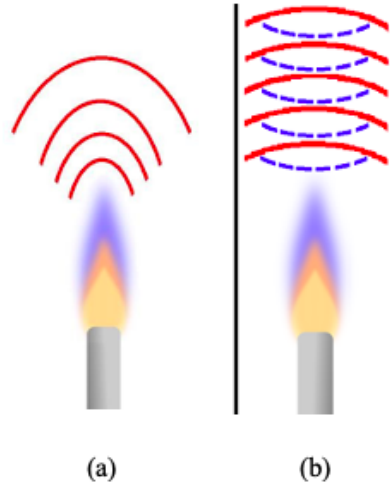
Wang et al. [191] tarafından yapılan araştırmada, Damköhler sayısının kararlı alevlerin sönmesi üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Araştırmada, reaksiyonda kalma zamanlarının ayarlanması yoluyla Damköhler sayısı değiştirilmiş ve bu değişikliklerin alev sıcaklığı üzerindeki etkileri Chemkin yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Damköhler sayısı, 0.673 ile 1.351 aralığında değişiklik göstermiştir.

Bu çalışma, Damköhler sayısının alev sönmesi üzerindeki etkisini anlamak açısından önemlidir. Bu sayının değeri, yanma sürecinin ne kadar verimli veya kararlı olduğunu gösterir. Damköhler sayısının düşük olması, reaksiyonun tamamlanamayacağı ve alevin sönme riskinin artacağı anlamına gelir. Tersine, yüksek bir Damköhler sayısı, reaksiyonun daha kararlı ve verimli bir şekilde gerçekleşebileceğini gösterir.

Wang et al.'ın [191] çalışması, yanma süreçlerinin optimizasyonu ve yanma sistemlerinin tasarımı açısından değerli bilgiler sunar. Reaksiyonda kalma süresi ve sıcaklık ilişkisini anlamak, alev sönmesini önlemek ve yanma sistemlerinin güvenliğini ve verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir. Bu tür sayısal analizler, mühendislerin ve araştırmacıların daha stabil ve güvenli yanma sistemleri geliştirmelerine yardımcı olabilir.

2.2.3.2. Dinamik Yanma Kararsızlıkları

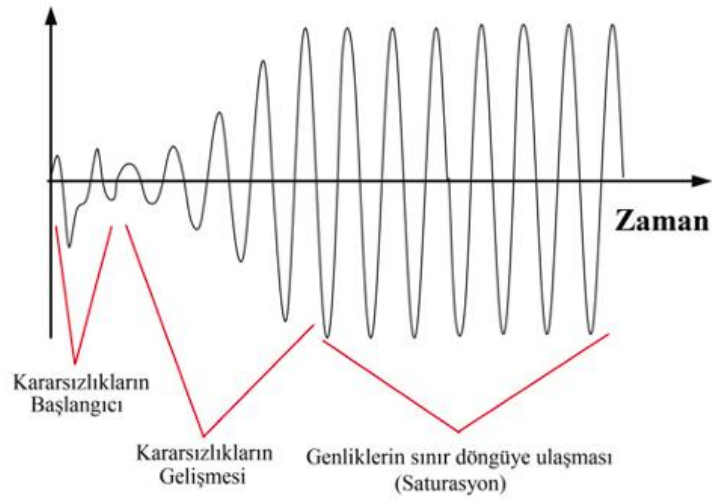
Son 60 yıl boyunca, yanma sistemlerinden kaynaklanan ses dalgaları önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Uçak motorları, endüstriyel yakıcılar ve dizel motorlar gibi çeşitli yanma sistemlerinden çıkan gürültüyü azaltma çabası, araştırmacıları farklı yanma akış türleriyle ilgili gürültü oluşumu üzerine çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir [192]. Yanma kaynaklı ses dalgalarının alev ile olan etkileşimi, termo-akustik kararsızlıklara yol açabilme potansiyeli nedeniyle özellikle dikkat çekicidir [193]. Roket ve gaz türbin motorları, yanma kararsızlıklarının sıkça rastlandığı alanlar olarak bilinir [194-196]. Yanma sırasında gösterilen daimî olmayan alev davranışları, yeni ses dalgalarının üretilmesine ve bu ses dalgalarının radyal yönde yayılmasına neden olur. Açık ortamda meydana gelen yanma olaylarında, ses dalgaları herhangi bir yansıma olmaksızın dış ortam tarafından sönmünebilir (Şekil 2.3'a). Ancak, modern yanma sistemlerinde kullanılan yanma odaları gibi kapalı ortamlar, ses dalgalarının karmaşık yapılarla etkileşime girmesi sonucunda daha kompleks sönmüne ve yansıma olaylarına yol açan yapılar olarak tasarlanmıştır (Şekil 2.3 b).



Şekil 2.3. Alevin açık (sol) ve kapalı (sağ) ortamda yayılması.

Alev tarafından üretilen daimî olmayan ısı salımları, yanma odası geometrisiyle etkileşime girerek, yüksek genlikli basınç dalgalanmaları oluşturabilir. Talei ve arkadaşları, gerçekleştirdikleri sayısal çalışmada, laminar alev akışlarında güçlü ses dalgalarının oluşabileceğini ortaya koymuşlardır [193]. Bu bulgu, yanma odasının şekli ve boyutunun, yanma sürecinden kaynaklanan akustik fenomenler üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Yanma süreci sırasında oluşan ses dalgaları, ısı salımı ve yakıt/hava karışımındaki bozukluklarla etkileşime girerek bir geri besleme döngüsü oluşturabilir. Bu döngü, yanma odasındaki akustik koşullara bağlı olarak, yanma kararsızlıklarına yol açabilir. Ses dalgaları, yanma odası duvarlarından yeterince yansıtılmaz ve sönümlenmezse, belirli bir genliğe kadar büyüyebilir ve nihayetinde doyuma ulaşabilir. Bu durum, ses dalgalarının gelişimi ve doyuma ulaşma sürecini açıklayan Şekil 2.4 'te detaylı bir şekilde gösterilmiştir [197]. Bu fenomen, yanma odası tasarımı ve işletme koşullarının yanma kararsızlıklarını yönetmede ne kadar önemli olduğunu vurgular. Ses dalgalarının kontrol altında tutulması, yanma sürecinin daha stabil ve verimli hale getirilmesine olanak tanırken, yanma odası tasarımındaki akustik özelliklerin dikkatli bir şekilde planlanması gerektiğini gösterir.



Şekil 2.4. Ses dalgalarının gelişerek doygunluğa ulaşması

2.2.4. Ön Karışımli Sistemlerde Yanma Kararsızlığı Çeşitleri

2.2.4.1. Ön Karışımli Sistemlerdeki Kütle Kuvveti Kararsızlıkları

Akışkanlar içerisinde, bir sıvının yoğunluğu diğerine göre daha düşük olduğunda, daha düşük yoğunluklu sıvı, çevreleyen daha yüksek yoğunluklu sıvı içinde yükselme eğilimi gösterir. Bu prensip, alevlerin yukarı doğru ilerlemesi durumunda da geçerlidir. Alev içerisinde, yanmış gazların (v_{∞}) ve henüz yanmamış gazların (v_0) hızları arasındaki fark, yer çekiminin etkisi altında bir kararsızlık oluşturur. Bu kararsızlık, alev içerisindeki farklı yoğunluklar ve hızlar nedeniyle ortaya çıkar ve alevin enine boyunca bir karakteristik uzunluğu belirler. Bu karakteristik uzunluk, $v_0 \cdot v_{\infty}/g$ denklemi ile ifade edilir, burada g yerçekimi ivmesidir. Alev hızının azalmasıyla, kararsızlıkların arttığı gözlemlenmiştir [198].

Bu bağlamda, alev ve çevresindeki akışkan arasındaki dinamik etkileşim, alevin davranışını ve yanma sürecinin stabilitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Yerçekimi etkisi altında, farklı hızlara ve yoğunluklara sahip gazlar arasındaki etkileşim, alevin şekli ve yayılma hızı üzerinde belirleyici bir rol oynar. Bu etkileşimlerin matematiksel olarak modellenmesi, yanma sürecinin daha iyi anlaşılmasını ve kontrol edilmesini sağlar. Ayrıca, bu tür kararsızlıkların anlaşılması, yanma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonu açısından önemli bilgiler sunar, böylece daha verimli ve stabil yanma süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunur.

2.2.4.2. Ön Karışımli Sistemlerdeki Hidrodinamik Kararsızlıklar

Hidrodinamik kararsızlıklar üzerine yapılan çalışmalarda Darrieus ve Landau'nun teorileri önemli bir temel oluşturur. Bu analiz, alevin kendi iç dinamiklerinden kaynaklanan kuvvetleri göz ardı eder ve alevi, sabit hızda ilerleyen ve çevresinden daha yoğun bir ortam olarak modellemeye dayanır. Bu yaklaşım, alev boyunca meydana gelen termal genleşmelerin kararsızlık analizinde incelenmesini sağlar. Başlangıçta hareketsiz bir ortamda genişleyen küresel bir alevin incelemesi, alev tabakasının zamanla büyümesinin, hidrodinamik dengesizliğin başlamasını geciktirdiğini gösterir.

Hidrodinamik kararsızlıkların erken araştırmaları, bu dengesizliklerin türbülansın kaotik karakteristiği olarak düşünülmesine yol açmıştır. Bu bakış açısı, ön karışımli alevlerin kendiliğinden türbülanslı yapısının hidrodinamik kararsızlıklarla ilişkilendirilmesine neden olmuştur. Ancak, kararsızlık denklemleri üzerine yapılan sayısal çalışmalar, alev boyunca meydana gelen küçük yoğunluk değişikliklerinin hidrodinamik kararsızlıklara yol açtığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, büyük alevlerde hidrodinamik dengesizliğin baskın fenomen olması beklenirken, gerçekte yaygın olarak gözlemlenen fenomenlerin alev tabakasının sırtlarında oluşan cusp (sivri uç) yapıları olduğunu göstermiştir [198].

Darrieus-Landau kararsızlığı, alevlerin yayılma dinamikleri üzerine derin bir anlayış sağlar ve yanma teorisinde önemli bir konsepttir. Alevin kendiliğinden türbülans oluşturabilmesi, yanma dinamiklerindeki karmaşıklığı ve çeşitliliği artırır. Bu fenomenlerin anlaşılması, daha etkili yanma sistemlerinin tasarımı ve kararsızlık kontrol yöntemlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

2.2.4.3. Ön Karışımli Sistemlerdeki Difüzyiv-Termal Kararsızlıklar

Ses altı, ön karışımli ve ön karışımli alevlerde, kütle ve ısıнын difüzyonu nedeniyle termal kararsızlıkların meydana geldiği gözlemlenmiştir. Özellikle düşük Lewis sayısı (Le) koşullarında bu kararsızlıklar, akışın tamamen laminar olduğu durumlarda hücresel alev yapılarına yol açar. Düşük Lewis sayısı, yakıtın yoğunluğunun düşük olduğu fakir karışımlar veya yoğunluğun yüksek olduğu zengin karışımlar için geçerlidir. Bu tür kararsızlıklar, alevin yok olma eğilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Lewis sayısı, termal difüzyonun kütle difüzyonuna oranını ifade eder ve bir maddenin yanma davranışı üzerindeki etkileri açısından önemlidir. Düşük Lewis sayısı, ısı

difüzyonunun kütle difüzyonundan daha hızlı veya daha yavaş olduğu durumları belirtir ve bu, alevin stabilitesi üzerinde belirleyici bir rol oynar. Özellikle, düşük Lewis sayısı koşullarında, yanma sırasında ısı ve kütle transferi arasındaki dengesizlik, alevin stabilitesini bozabilir ve çeşitli kararsızlık formlarına yol açabilir.

Bu termal kararsızlıkların varlığı ve etkileri, adyabatik alev hızı ve Markstein uzunluğunun hesaplanması ile daha iyi anlaşılabilir. Adyabatik alev hızı, ideal koşullar altında, yanma reaksiyonunun yayılma hızını ifade ederken, Markstein uzunluğu, alevin kararsızlığa karşı gösterdiği tepkinin bir ölçüsüdür. Markstein uzunluğu, alevin şekil değişikliklerine karşı ne kadar dirençli olduğunu gösterir ve bu, termal kararsızlıkların alev üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılır.

Bu bilgiler, yanma sistemlerinin tasarımı ve optimizasyonunda, özellikle de alevin stabilitesinin korunması ve kontrol edilmesinde önemli bir rol oynar. Düşük Lewis sayısında meydana gelen kararsızlıkların anlaşılması ve yönetilmesi, daha verimli ve stabil yanma süreçlerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir [198].

2.2.4.3. Termo-Akustik Kararsızlıklar

Gaz türbin yakıcılarında akustik salınımlar nedeniyle ortaya çıkan kararsızlıklar, yanma sistemlerindeki en yaygın sorunlardan biridir. Bu kararsızlıklar, rezonans etkileşimi ve akıştaki ısı salınımları nedeniyle meydana gelir. Sistem duvarlarında oluşan büyük genlikli titreşimler, alev geri tepmesi ve sönmesi gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir. Yanma işlemi sırasında üretilen sıcaklık dalgaları ile birlikte hareket eden entropi dalgaları, yakıcı içerisindeki konvektif modları içerir ve entropi dalgalanmalarıyla birlikte yukarı doğru yayılan basınç salınımları, dinamik basınç değişimlerini artırır. Bu durum, termo-akustik kararsızlık olarak bilinen ve yakıcıya zarar verebilecek etkileri ortaya çıkarır.

Rayleigh mekanizması, bu tür kararsızlıkların, ısı yayılımı ve basınç dalgalanmalarının aynı fazda olması durumunda meydana geldiğini belirtir. Bu, termo-akustik kararsızlıkların anlaşılmasında önemli bir adımı temsil eder ve akustik salınımlar ile ısı yayılımının aynı faza geldiğinde kararsızlıkların neden ortaya çıktığını açıklar. Rayleigh kriterine göre, bir yanma kararsızlığının anlaşılabilmesi için aşağıdaki kriterlerin incelenmesi gerekir:

Faz Uyumu: Isı salınımı ve basınç dalgalanmalarının fazlarının uyumlu olup olmadığına bakılmalıdır. Fazların uyumlu olduğu durumlar, kararsızlığın artmasına yol açar.

Isı Salınımı: Yanma sırasında ne kadar ısı salındığı ve bu ısıнын nasıl dağıldığı incelenmelidir. Isı salınımının yoğunluğu ve dağılımı, kararsızlıkları tetikleyebilir.

Akustik Dalga Yayılımı: Yakıcı içerisindeki akustik dalga yayılımı ve bu dalgaların sönümlenmesi veya güçlenmesi de önemlidir. Akustik dalgaların güçlenmesi, kararsızlık riskini artırır.

Termo-akustik kararsızlıkların kontrol altına alınması ve yönetilmesi, gaz türbin sistemlerinin güvenliği ve verimliliği için hayati öneme sahiptir. Rayleigh kriteri, bu kararsızlıkların anlaşılması ve üzerinde çalışılması için temel bir rehber sağlar. Aktif ve pasif kontrol yöntemleri, bu kararsızlıkların etkilerini azaltmak ve sistem performansını optimize etmek için kullanılabilir [199].

2.2.4.4. Kararsızlıkların Oluşum Mekanizması

Yanma kararsızlıklarının oluşumu, yüksek genlikli basınç ve hız salınımları ürettikleri için genellikle ciddi sorunlara yol açar. Gaz türbinlerinde itici güç dalgalanmaları, şiddetli titreşimlerle sistemin kontrolünün zorlaşması, ısı transferinde iyileşme ve yakıcı duvarlarında termal gerilmelerin artması, salınımlı mekanik yüklerin sistem komponentlerinde metal yorgunluğuna neden olması, alev sönmesi ve geri tepme gibi olumsuz durumlar bu sorunlara örneklerdir. Bu kararsızlıkların tetiklenme mekanizmaları ve önlenme yolları üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Yanma kararsızlıklarının kendiliğinden oluştuğu şartlarına anlaşılması için, kararsız bir yakıcı sistemi düşünülmelidir. Reaktantların tepkimeye girmesiyle birlikte ortaya çıkan yanma ürünleri, basınç ve ısı salınımları arasındaki faz farkı 90 derecenin altında olduğunda akustik alana enerji aktarır. Isı salınımlarının yanma odası akustiği ile etkileşimi, pozitif geri besleme ile sonuçlanan dalgalanmalar yaratır; yani Rayleigh kriteri karşılandığında yanma kararsızlıkları meydana gelir. Kararsızlıkların sönümlenebilmesi için, yanma odasında meydana gelen enerji kayıplarının (viskoz enerji yitimi, ısı transferi, akustik enerjinin ısınım ve taşınım ile yakıcı dışına aktarılması vb.) akustik alana aktarılan enerjiden fazla olması gereklidir. Sönümlenmeyen salınımlar, belli bir doygunluk seviyesine veya sınır döngü genliğine erişene kadar eksponansiyel olarak

artar. Doygunluğa ulaşan salınımların durumu, akustik alana aktarılan enerji ile akustik alan sınırlarından kaybedilen enerjinin birbirine eşitlendiği bir denge noktasıdır [199].

Yanma kararsızlığının oluşumunu engellemek veya kontrol altında tutmak için akustik sönümlemenin önemi büyüktür. Kararsız bir moddan enerjinin üç ana yolla uzaklaştırılması mümkündür: (1) viskoz veya ısı transferi aracılığıyla akustik enerjinin girdabımsı veya entropi çalkantılarına dönüştürülmesi, (2) taşınım ve/veya radyasyon yoluyla akustik enerjinin yanma odasının dışına aktarılması, (3) akustik modlar arasındaki enerji transferi [199].

Kararsızlıklar, genellikle yanıcıların doğal akustik modları ile ilişkili frekans aralıklarında meydana gelir. Yanma kararsızlıkları, sistem karakteristiklerine ve işletme koşullarına bağlı olarak, akustik salınımlar ile yanma süreci arasında oluşan geri besleme mekanizması tarafından tetiklenir. Şekil 2.8, yanma kararsızlığına yol açan bir geri besleme döngüsünü göstermektedir [200]. Akış hızı veya diğer termodinamik değişkenlerdeki dalgalanmalar, ısı salınım oranında dalgalanmalara sebep olur. Bu dalgalanmalar, akustik salınımları tetikler ve bu akustik salınımlar, hız ve termodinamik değişkenlerin dalgalanmasına neden olur, böylece geri besleme döngüsü tamamlanır. Akustik salınımlara eklenen veya onlardan alınan enerjinin miktarı, salınımların genliğinin azalmasına, sabit kalmasına veya artmasına yol açabilir [199].

Alev ile girdap, sınır tabaka ve yüzey kırışması etkileşimleri ısı salınımlarında dalgalanmalara neden olurken; eşdeğerlik oranındaki değişimler, yanma sürecinde daimî olmayan bozukluklara yol açar. Yanma kararsızlıklarına neden olan bu tür bozuklukların belirlenmesi, yanma kararsızlıklarını etkili bir şekilde sönümleyecek sistemlerin tasarlanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir [201]. Bu, yanma kararsızlıklarını yönetme stratejilerinin geliştirilmesinde ve daha stabil yanma sistemlerinin tasarımında önemli bir adımdır.

Yanma kararsızlıklarına neden olan geri besleme döngüsünde üç ana bileşen vardır. Bunlar:

1. **Akış veya Yakıt/Hava Karışım Oranındaki Dalgalanmalar:** Yanma sürecindeki akış hızı veya yakıt/hava oranındaki değişiklikler.
2. **Isı Salınımı Dalgalanmaları:** Bu değişiklikler ısı salınımında dalgalanmalara neden olur.
3. **Akustik Dalgalanmalar:** Isı salınımındaki dalgalanmalar, akustik dalgalanmaları (ses ve basınç dalgalanmaları) tetikler.

Bu bileşenler birbirini etkileyerek bir geri besleme döngüsü oluşturur ve yanma kararsızlıklarının devam etmesine yol açar [201].

2.2.4.5. Kararsızlıkların Kontrol Yöntemleri

Sürekli yanma sistemlerinde, özellikle yakıt fakir koşullar için tasarlanmış ön karışımli yanma sistemlerinde, termo-akustik kararsızlıklar, ısı salımı dinamikleri ile akustik salınımlar (basınç dalgalanmaları) arasındaki iki yönlü etkileşimden kaynaklanmaktadır. Bu kararsızlıkların kontrol altına alınması, bazı durumlarda mümkün olabilmektedir. Pasif kontrol yöntemleri, sistemin işletme koşullarının veya termo-akustik özelliklerinin değiştirilmesi, alevin bir engel veya akustik sönümleyicilerle kontrol altına alınması, alev stabilizasyon metodunun veya pozisyonunun değiştirilmesi gibi yaklaşımları içerir. Ancak, bu yöntemler değişen işletme şartlarına esnek bir şekilde uyum sağlayamadığı için kullanımları kısıtlıdır.

Pasif sönümleyici elemanlar, düşük bakım maliyetleri ve yüksek dayanıklılıkları sayesinde konvansiyonel yakıcılarda yaygın olarak kullanılsa da Helmholtz rezonatörleri, delikli kaplamalar, akış bölme komponentleri ve yarım/çeyrek dalga tüpleri gibi pasif kontrol yöntemleri, yüksek frekanslı kararsızlıkların baskılanmasında etkili olmalarına rağmen düşük frekanslı kararsızlıkları sönümlemede genellikle yetersiz kalmaktadırlar. Bu sınırlılıklar nedeniyle, geniş bir çalışma şartları aralığında etkili olabilecek aktif kontrol yöntemleri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

Aktif kontrol stratejileri, yanma dinamiklerini yönlendiren mekanizmaların doğru bir şekilde modellenmesini ve akustik ile yanma dinamikleri arasındaki karmaşık ilişkinin iyi anlaşılmasını gerektirir. Aktif kontrol, geri besleme mekanizmaları kullanarak yanma odasındaki akustik ve termo-akustik koşulları gerçek zamanlı olarak ayarlayarak kararsızlıkları önlemeyi veya sönümlemeyi amaçlar [202, 203]. Bu yaklaşım, özellikle

yanma odası tasarımında esneklik ve performans iyileştirmeleri sağlayarak daha stabil ve verimli yanma sistemlerinin geliştirilmesine olanak tanır.

2.2.5. Pasif Kontrol Yöntemleri

2.2.5.1. Helmholtz Rezonatörü

Helmholtz rezonatörleri, gaz türbinleri ve roket motorları gibi yanma sistemlerinde termo-akustik kararsızlıklarla mücadelede kullanılır. Isı salınımı ve basınç dalgalanmalarının birleştirilmesinden kaynaklanan bu kararsızlıklar, yapısal hasara ve verimliliğin azalmasına neden olabilir. Araştırmalar, boşluk hacmi, boyun uzunluğu ve çapındaki değişikliklere sahip Helmholtz rezonatörlerinin bu dengesizlikleri sönümlemede çok önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Çalışmalar, silindirik, küresel ve konik gibi farklı rezonatör şekillerini, sönümleme efektleri sağlamada en etkili olduğunu kanıtlayan küresel rezonatörlerle karşılaştırmıştır. Ek olarak, birden fazla küçük delik kullanan dağıtılmış Helmholtz rezonatörleri kavramı, gürültü sönümleme bant genişliğini genişletmek için araştırılmıştır. Helmholtz rezonatörlerinin tasarım parametrelerini optimize ederek, 30 dB'ye kadar termo-akustik kararsızlıkların önemli ölçüde bastırılması sağlanabilir [204, 205]

Güç üretimi, tahrik ve ısıtma sistemleri, fakir ön karışımli sürekli yanma koşullarında çalıştıklarında, termo-akustik kararsızlıklar gibi sorunlara özellikle duyarlı hale gelirler. Bu tür kararsızlıkları sönümlemek veya baskılamak amacıyla kullanılan pasif kontrol yöntemlerinden biri Helmholtz rezonatörüdür. Helmholtz rezonatörü, belirli bir frekansta akustik enerjiyi emerek yanma sistemlerindeki istenmeyen basınç dalgalanmalarını azaltmak için tasarlanmış bir cihazdır. Bu cihaz, akustik dalgaların rezonans frekansında sönümlenmesini sağlayarak, sistemin akustik karakteristiklerini iyileştirir ve termo-akustik kararsızlıkların etkisini azaltır.

Helmholtz rezonatörünün bir gaz türbin yanma odası üzerindeki uygulaması, rezonatör yanma odasının belirli noktalarına entegre edilerek, yanma sırasında oluşabilecek istenmeyen akustik salınımların etkin bir şekilde sönümlenmesi amaçlanmıştır. Rezonatörün boyutları ve konumu, hedeflenen sönümleme frekansına göre özel olarak tasarlanır. Bu şekilde, yanma odasının akustik özelliklerine uygun bir şekilde, kararsızlıklara neden olan akustik modlar hedef alınarak sönümlenir. Helmholtz

rezonatörleri, düşük bakım gereksinimleri ve yüksek dayanıklılıkları sayesinde, termo-akustik kararsızlıkla mücadelede etkili ve güvenilir bir pasif kontrol yöntemi olarak kabul edilir.

Helmholtz rezonatörleri, yüksek genlikli ses dalgalarının sönümlenmesinde kullanılan sistemlerdir. Bu rezonatörler, küçük ve açık bir boyun kısmı, bir boşluk ve deforme olabilen bir spiral yapıdan oluşur. Yanma odasının çalışma sıcaklığına göre, boşluğun hacmi, boyun kısmının uzunluğu ve spiral yapının çapı gibi özellikler değişiklik gösterir. Gaz türbin motorlarının çalışması esnasında üretilen yanma dinamikleri ve ses dalgaları, yanma odası etrafına dikkatli bir şekilde yerleştirilmiş rezonatörler tarafından emilir, böylece yapısal hasarlara yol açabilecek termo-akustik kararsızlıkların sönümlenmesine yardımcı olunur.

Helmholtz rezonatörünün basit bir kanal içindeki akustik dalgaları sönümlemektedir. Özellikle, gaz türbin motorlarında, kritik frekansları sönümleme konusunda büyük faydalar sağladığı gözlemlenmiştir. Yanma odasında meydana gelen dalgalanmaların genellikle %50-75'i sönümlenebilir şekilde tasarlanmıştır. Ancak, gaz türbin motorunun farklı yükler altında çalışması sırasında yanma odası sıcaklığının değişkenliği nedeniyle Helmholtz rezonatörü kritik frekans değerlerinde sönümlemede yetersiz kalabilir. Bu nedenle, yanma odası etrafına ekstra Helmholtz rezonatörleri yerleştirilerek farklı frekanslardaki yanma dinamikleri sönümlenir. Ancak, fazladan rezonatörlerin yerleştirilmesi her yanma odası tasarımında uygulanabilir olmayabilir. Ayrıca, çok sayıda parçanın dar bir alana entegrasyonu hem teknik olarak zorlayıcıdır hem de maliyetleri artırabilir.

Bu durum, yanma sistemlerinde termo-akustik kararsızlıkların yönetilmesi için pasif yöntemlerin yanı sıra, esnek ve uyumlu aktif kontrol stratejilerinin de önemini vurgular. Aktif kontrol yöntemleri, sistem şartlarına göre dinamik olarak ayarlanabilir ve geniş bir frekans aralığında etkili olabilir, bu sayede yanma odası tasarımı ve işletmesi sırasında karşılaşılan çeşitli zorluklara daha iyi yanıt verebilir.

Helmholtz rezonatörünün rezonans frekansı, geometrik özelliklerine bağlı olarak değişir. Denklem 2.10'da rezonans frekansının matematiksel ifadesi gösterilmektedir.

$$\text{Rezonans Frekansı: } f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l \cdot v}} \quad (2.10)$$

S, Rezonatörün kesit alanı; V, boşluk hacmi; l, boyun uzunluğu; c, ses hızını ifade etmektedir. Akustik dalgalanmaların frekansına göre rezonatörün geometrik boyutları uygun şekilde ayarlanabilir. Fakat dikkat edilmesi gereken diğer bir husus, ses hızının sıcaklığa bağlı olarak değişmesidir. Denklem 2.11'da ses hızının sıcaklığa bağlı formülasyonu gösterilmektedir.

$$\text{Ses Hızı: } c = \sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T}{M}} \quad (2.11)$$

Burada, κ , Adyabatik indeksi; R, molar gaz sabiti; T, yanma odası gas sıcaklığı; M, mol ağırlığını ifade etmektedir. Denklemlerden de anlaşılacağı üzere, gaz sıcaklığı, frekans değerlerindeki değişiklikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Gaz sıcaklığındaki değişiklikler, Helmholtz rezonatörünün sönümleme frekansını değiştirir, bu da termo-akustik dalgaların kritik frekans aralıklarını kapsayamama riskini beraberinde getirir. Eğer rezonatörler, bu kritik frekans aralıklarını kapsayamazsa, görevlerini etkin bir şekilde yerine getiremezler. Bu tür durumlarla karşılaşmamak için, yanma odası gaz sıcaklığına bağlı olarak farklı frekans aralıklarını kapsayabilecek şekilde, yanma odası duvarlarına farklı boyutlarda rezonatörler yerleştirilir. Bu yaklaşım, yanma sistemlerinin çeşitli operasyonel koşullar altında karşılaşılabileceği termo-akustik kararsızlıkların etkin bir şekilde sönümlenmesini sağlamak için kullanılır.

Ancak, çoklu rezonatörlerin kullanımı, sistem üzerinde karmaşık etkiler oluşturabilir ve bu durum, sistem tasarımı ve bakımını zorlaştırabilir. Bu sorunları aşmak için, boşluk hacminin ayarlanabilir ve hareketli olduğu mekanizmalar içeren aktüatörler gibi alternatif çözümler geliştirilmiştir. Bu tür mekanizmalar, gaz sıcaklığı ve diğer operasyonel parametrelerdeki değişikliklere dinamik olarak uyum sağlayabilir ve böylece farklı frekans aralıklarındaki termo-akustik kararsızlıkların sönümlenmesini sağlar. Aktüatörler ile donatılmış sistemler, rezonatörlerin sabit sönümleme frekanslarının ötesine geçerek, yanma sistemlerinin esnekliğini ve güvenilirliğini artırır. Bu, özellikle değişken operasyonel şartlarda çalışan yanma sistemleri için kritik önem taşır.

2.2.5.2. Delikli, Yarıklı veya Gözenekli Kaplamalar

Delikli, yarıklı veya gözenekli kaplamalar, yanma sistemlerini stabil hale getirmek için sıkça kullanılan başka bir akustik sönümleyici türüdür [207, 208.]. Bu yapılar, aslında Helmholtz rezonatörünün bir varyasyonu olarak düşünülebilir ve rezonans frekansına yakın değerlerde yüksek derecede sönümleme sağlarlar. bu tür sönümleyicilerin bir örneği olarak, Wren 54 marka bir turboprop motorunun yanma odasındaki delikli kaplamalara bakmak gerekir. Pratikte, delikli kaplamalar aracılığıyla geçirilen soğutma havası, yüksek sıcaklığın malzemeye zarar vermesini önleme işlevi de görür. Kullanıldıkları yerlere göre, bu malzemelerin özellikleri çeşitlilik gösterir. Seramik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı, daha karmaşık ve hafif akustik sönümleyici tasarımların yapılabilmesine olanak tanır [209].

Bu tür sönümleyiciler, yanma sistemlerinde termo-akustik kararsızlıkların ve gürültünün azaltılmasında kritik bir rol oynar. Seramik matrisli kompozitler gibi gelişmiş malzemelerin kullanımı, sönümleyicilerin sıcaklık ve aşınma gibi zorlu çalışma koşullarına dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, bu malzemelerin hafif olması, özellikle havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalar için avantaj sağlar. Delikli, yarıklı veya gözenekli kaplamaların tasarımı ve malzeme seçimi, sönümleme etkinliğini ve sistem üzerindeki termal etkileri optimize etmek için önemlidir. Bu yaklaşımlar, yanma sistemlerinin performansını artırırken, güvenlik ve dayanıklılık standartlarını korumak için esas alınmaktadır.

Çeyrek ve yarım dalga tüpleri, rezonans frekansında etkili sönümleme sağlamak için kullanılan başka bir akustik sönümleyici türüdür [210, 211]. Bu tür sönümleyiciler, belirli bir frekansta ses dalgalarının rezonansını kullanarak, yanma sistemlerinde istenmeyen akustik enerjiyi etkin bir şekilde absorbe eder. Çeyrek ve yarım dalga tüplerinin kesitleri düşünüldüğünde bu sistemler, belirli bir ses dalgası boyunun çeyrek veya yarımı kadar uzunlukta tasarlanır, böylece rezonans frekansında maksimum sönümleme sağlarlar.

Helmholtz rezonatörü ile karşılaştırıldığında, çeyrek dalga tüplerinde özel bir akustik boşluk bulunmaz; bunun yerine, tüpün açık ucu atmosfere açılır ve bu açık uç, akustik dalgaların tüp içerisinde rezonans oluşturmalarını sağlar. Yarım dalga tüpleri ise, bir ucu kapalı diğer ucu açık olacak şekilde tasarlanır ve dış ortam, akustik boşluk olarak işlev

görür [212]. Bu iki tür sönümleyici, rezonans frekanslarında enerjiyi emmek ve yanma sistemlerinde istenmeyen ses dalgalarını azaltmak için farklı fiziksel prensiplere dayanır.

Çeyrek ve yarım dalga tüpleri, belirli frekanslardaki akustik enerjiyi hedef alarak sönümleme yaparlar. Bu türler, özellikle belirli frekans aralıklarında sorun yaratan akustik salınımları azaltmada oldukça etkilidir. Yarım dalga tüplerinin kullanımı, akustik enerjinin dış ortamda etkili bir şekilde sönümlenmesini sağlarken, çeyrek dalga tüpleri daha çok belirli bir rezonans frekansındaki enerjiyi hedef alır. Her iki türün de tasarımı ve uygulaması, yanma sistemlerinin akustik karakteristiklerine ve karşılaşılan spesifik akustik sorunlara göre özelleştirilebilir.

Delikli kaplamaların yanı sıra, yarıklı veya gözenekli kaplamalar da benzer şekilde basınç genliklerini sönümleme veya engellemede kullanılıyor. Yanma sistemlerinde rezonans frekansını etkili bir şekilde sağlamak için, sönümleyicilerin geometrik boyutlarına, şekline, akustik kaynağın karakteristiklerine ve sönümleyicinin yerleştirildiği konuma göre farklı matematiksel eşitlikler kullanılarak özel tasarımlar geliştirilir. Yarık genişliği, yarık aralığı, düzeltme faktörü, delik çapı, delik veya yarık sayısı, akustik dalgaların geliş açısı, ses basıncı gibi birçok parametre, sönümleyicinin performansını doğrudan etkileyen faktörler arasındadır.

Kim et al. tarafından yapılan deneysel bir çalışmada, silikon karbit (SiC) gözenekli malzemeler kullanılarak basınç dalgalanmalarının nasıl sönümlenebileceği araştırılmıştır. Araştırmacılar, laboratuvar ölçeğinde bir gaz türbin yakıcısını kullanmış. Çalışma, alev kararsızlıklarının sönümlemesinde sünger benzeri gözenekli bir ortamın ve akustik boşluğun etkilerini incelemiştir [213]. Gözenekli malzemelerin kullanımı, yanma odasındaki basınç dalgalanmalarını etkili bir şekilde azaltabilir, böylece termo-akustik kararsızlıkların önlenmesine yardımcı olur.

Bu tür tasarımlar, yanma sistemlerinin akustik davranışlarını iyileştirmek ve kararsızlıkları azaltmak için önemli bir yöntem sunar. Gözenekli veya yarıklı kaplamalar, yanma odası içindeki istenmeyen akustik enerjinin sönümlemesine yardımcı olurken, aynı zamanda yanma verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak için de faydalıdır. Bu teknikler, mühendislerin ve araştırmacıların, daha güvenli ve verimli yanma sistemleri tasarlamalarına olanak tanır.

2.2.5.1.1. Akış Bölme Elemanları

Yanma odasına yerleştirilen akış bölme elemanları, istenmeyen basınç dalgalanmalarını azaltmak için etkili bir yöntemdir. Bu elemanlar, tam bir standart forma sahip olmamakla birlikte, sönümlenmesi gereken yanma kararsızlıklarının özelliklerine göre özelleştirilebilir. Akış bölme elemanlarının kullanımı, yanma odası içerisindeki akışın düzenlenmesine ve böylece termo-akustik kararsızlıkların azaltılmasına yardımcı olur.

Katı yakıtlı roket motorlarında kullanılan akış bölme elemanları ele alındığında, bu elemanlar, roket motorlarının yanma odalarında oluşabilecek yüksek genlikli basınç dalgalanmaları ve akustik enerjinin kontrol altına alınması amacıyla tasarlanmıştır. Katı yakıtlı roketlerde, yanma süreci sırasında oluşan kararsızlıklar, motorun performansı üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir; bu yüzden akış bölme elemanlarının kullanımı, bu tür problemlerin önlenmesinde kritik önem taşır[214].

Akış bölme elemanları, yanma odası içindeki akış dinamiklerini iyileştirerek, alev ve akışın etkileşimini düzenler ve böylece yanma sürecinin daha stabil olmasını sağlar. Bu, özellikle yüksek hızlı yanma sistemlerinde, termo-akustik kararsızlıkların önlenmesi ve motorun güvenli bir şekilde çalışmasının sağlanması açısından önemlidir. Akış bölme elemanlarının tasarımı ve yerleştirilmesi, yanma odasının geometrisi ve çalışma koşulları göz önünde bulundurularak yapılır, bu sayede yanma odasının akustik ve aerodinamik karakteristikleri üzerinde maksimum kontrol sağlanır.

Akış bölme elemanları, Apollo uzay aracının F1 motorunda başarıyla kullanılarak, rokette oluşan basınç dalgalanmalarını önlemekte etkili oldukları gösterilmiştir. Bu komponentlerin geometrik yapıları—şekil, genişlik ve uzunluk—alev kararsızlıklarının önlenmesinde kritik bir rol oynar. Yanma odasındaki basınç dağılımlarını dikkate alarak, akış bölme komponentlerinin formu belirlenir [215]. Sıvı yakıtlı roket motorlarında enjektöre eklenen akış bölme komponentlerinin ve bu komponentlerin farklı tasarımlarının da aynı işlev için kullanılmaktadır [216].

Bu akış bölme elemanları, yanma odası içindeki akışı yönlendirerek alevin daha stabil bir şekilde yanmasını sağlar ve bu sayede basınç dalgalanmalarını azaltır. Yanma odasındaki bu dalgalanmalar, motor performansı üzerinde olumsuz etkilere neden olabileceği gibi, aşırı durumlarda motorun hasar görmesine veya arızalanmasına yol açabilir. Bu nedenle,

akış bölme komponentlerinin tasarımı ve yerleştirilmesi, motor tasarımının temel bir parçası olarak kabul edilir.

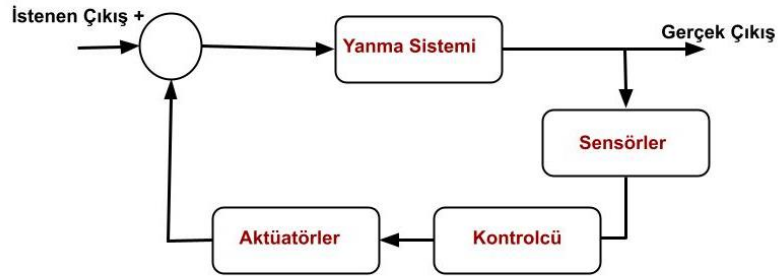
Sıvı yakıtlı roket motorlarında, enjektörler aracılığıyla yakıtın ve oksitleyicinin yanma odasına püskürtülmesi, yanma sürecinin başlangıç noktasını oluşturur. Akış bölme elemanlarının enjektörlere entegrasyonu, yanma sürecini daha düzenli hale getirerek, yanma verimliliğini artırabilir ve termo-akustik kararsızlıkların önlenmesine yardımcı olabilir. Farklı formdaki tasarımlar, motorun çalışma koşullarına ve spesifik ihtiyaçlarına göre özelleştirilebilir, böylece her motor tipi için en uygun sönümleme ve akış kontrolü sağlanabilir.

2.2.6. Aktif Kontrol Yöntemleri

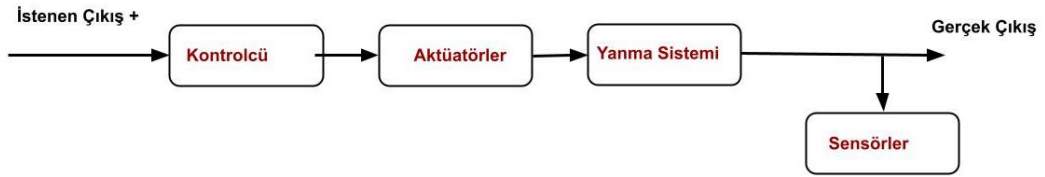
Yanma sistemlerinin kararlılığını sağlamak amacıyla kullanılan pasif kontrol yöntemleri, geniş çalışma aralıklarına sahip yakıcılarda yeterli sönümleme sağlayamayabilir. Bu durum, daha gelişmiş ve dinamik kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurur. Aktif kontrol yöntemleri, enerji salınımlarının kontrol altına alınması veya sınır tabakadaki ısı kayıplarının artırılması gibi stratejiler kullanılarak, yanma sistemlerinin daha stabil çalışmasını sağlar. Bu yöntemlerde, hoparlörler, yakıt valfleri ve benzeri aktüatörler yardımıyla doğrudan müdahalede bulunulur.

Aktif kontrol sistemleri, açık veya kapalı çevrim konfigürasyonlarında uygulanabilir. Şekil 2.5, bu iki kontrol yönteminin diyagramlarını göstermektedir. Açık çevrim kontrol sistemlerinde, istenilen çıkışı elde etmek için kontrol elemanlarına önceden belirlenen referans kontrol işaretleri verilir. Bu tür sistemler, yanma davranışının detaylı bir şekilde bilindiği durumlar için uygun olup, belirli bir ön ayara göre çalışırlar. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ise, gerçek çıkış değerleri, mikrofonlar, basınç sensörleri, fotodiyotlar, fotomultiplierler gibi sensörlerle ölçülür. Elde edilen gerçek çıkış değerleri, istenilen çıkış değerleri ile karşılaştırılarak, aradaki farkı minimize edecek şekilde kontrol sinyalleri aktüatörlere iletilir. Kapalı çevrim sistemleri, maliyetli olmalarına rağmen, yanma davranışının tam olarak bilinmediği veya alev kararsızlıklarının sönümlenmesi gereken durumlar için oldukça etkilidir. Bu yöntemler, uygulandıkları yanma sistemlerinde basınç dalgalanmalarının belirgin bir şekilde azaltılmasını sağlar [217].

Aktif kontrol sistemlerinin uygulanması, yanma sistemlerinin daha esnek ve adaptif hale gelmesini sağlayarak, çeşitli operasyonel koşullar altında kararsızlık sorunlarının üstesinden gelmelerine yardımcı olur. Bu, özellikle modern enerji üretim ve tahrik sistemlerinin karşılaştığı zorlukları aşmak için kritik bir stratejidir.



(a) Kapalı Çevrim Kontrol Diyagramı



(b) Açık Çevrim Kontrol Diyagramı

Şekil 2.5. Kapalı ve açık çevrim aktif kontrol yöntemleri

Yanma sistemlerinin modellenmesi ve analizi, daimî olmayan ısı salınımı dinamiklerinin ve kararsızlığa yol açan mekanizmaların anlaşılmasıyla başlar. Bu süreçlerin karmaşıklığı, uygun basitleştirmeler ve yaklaşımlar kullanılarak modellenabilir hale getirilir. Özellikle, alev-girdap etkileşimlerinin önemli olduğu türbülanslı şartlarda alev dinamiklerinin detaylı incelenmesi büyük bir zorluktur. Aktif kontrol stratejilerinin son yıllarda önem kazanması ve geniş bir kullanım alanı bulması, yanma sistemlerinde karşılaşılan bu zorlukların üstesinden gelmede önemli bir rol oynamaktadır. Bu stratejiler, basınç ve ısı salınımı dalgalanmaları arasındaki faz farkını artırarak yanma kararsızlıklarını sönmölemeyi amaçlar.

Aktif kontrol yöntemlerinin esas amacı, yanma kararsızlıklarını sönmölemek olmakla birlikte, tam yanmanın sağlanması, NO_x gibi kirletici emisyonların azaltılması, alevlenebilirlik limitlerinin genişletilmesi ve hacimsel ısı salınımı oranının artırılması

gibi çoklu performans kriterlerini de gerçekleştirmektir. Bu hedeflere ulaşmak için bütün sistemin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi ve sentezlenmesi gerekir. Yanma odasının çeşitli noktalarında yer alan çeşitli tipteki ve sayıdaki aktüatörlerin doğru bir şekilde kullanılması, bu çok yönlü hedeflerin başarılmasında kritik öneme sahiptir [218].

Yanma sistemlerinde uygulanan aktif kontrol stratejileri hem operasyonel verimliliği artırmak hem de çevresel etkileri minimize etmek için geliştirilmeye devam ediyor. Geliştirilen zaman geciktirici sistemler ve diğer kontrol mekanizmaları, bu süreçte önemli araçlar olarak öne çıkıyor. Yanma teknolojilerindeki bu ilerlemeler, enerji üretiminden taşımacılığa kadar geniş bir yelpazede uygulamaların daha verimli ve çevre dostu hale gelmesine olanak tanıyor.

2.2.7. Akustik Odada yanma ve Kullanılan CH₄ ve H₂ Özellikleri

Yakıtlar, enerji üretimi için hayati öneme sahiptir ve katı, sıvı, gaz olmak üzere üç ana forma ayrılır. Günlük yaşamda ve endüstride yaygın olarak kullanılan hidrokarbon bazlı yakıtlar arasında doğal gaz (özellikle metan), kömür ve benzin (oktan) gibi maddeler bulunmaktadır [219]. Hidrokarbonlar, içerisinde bulunan hidrojen (H) ve karbon (C) elementleri nedeniyle bu ismi almıştır ve kimyasal yapıları genellikle alkanlar ya da parafinler olarak bilinen C_nH_{2n+2} formülüne sahiptir. Bu formülde, hidrojen ve karbon atomları arasında tekli bağlar mevcuttur ve bu yapı, yakıtların kimyasal özelliklerini belirleyen temel faktördür. Ayrıca, Tablo 2.2'de belirtilen yakıtların içeriği, genellikle belirtilen parafinin %90 ve üzeri bir oranını oluşturur [220]. Bu bilgiler, metan (CH₄) ve hidrojen (H₂) gibi yakıtların enerji içerikleri ve yanma özellikleri açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Tablo 2.2. Yakıtlar ve içerdiği hidrokarbonlar

Kullanılan Yakıt	Hidrokarbon	Kimyasal Formülü
Doğal Gaz	Metan	CH ₄
Benzin	Oktan	C ₈ H ₁₈
Motorin	Dodekan	C ₁₂ H ₂₆
Jet Yakıtı	Kerosen	C ₁₄ H ₃₀

Yakıtların yanma süreçleri, çevresel etkileri ve enerji verimlilikleri üzerinde yapılan çalışmalar, sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesi açısından büyük bir önem taşır. Hidrokarbonlar yanma sırasında çeşitli yan ürünler üretir ve bu süreçte serbest bıraktıkları enerji, birçok uygulamada temel bir enerji kaynağı olarak kullanılır. Bu nedenle, yakıtların kimyasal yapısını ve yanma özelliklerini detaylı olarak anlamak, enerji sistemlerinin etkin bir şekilde tasarlanması ve yönetilmesi için elzemdir.

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan her yakıtın kendine özgü yanma özellikleri bulunur; bu özellikler arasında tutuşma sıcaklığı özellikle önemlidir. Tutuşma sıcaklığı, bir yakıtın kendiliğinden yanmaya başladığı sıcaklık değerini ifade eder ve bu değer, yakıtın güvenli kullanımı ve yanma verimliliği açısından kritik bir parametredir. Örneğin, atmosferik basınç altında bazı yaygın yakıtların tutuşma sıcaklıkları şöyledir:

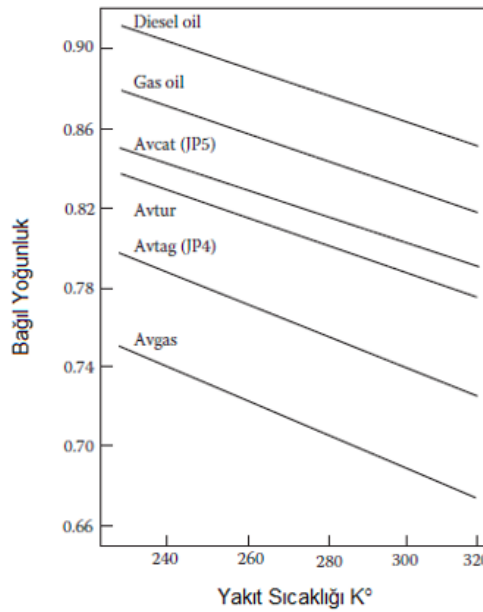
- Benzin: 260 °C
- Hidrojen: 580 °C
- Metan: 630 °C
- Karbonmonoksit: 610 °C

Bu tutuşma sıcaklıkları, farklı yakıtların yanma sistemlerinde ne kadar kolay veya zor tutuşabileceğini gösterir. Örneğin, hidrojenin yüksek tutuşma sıcaklığı, onun daha yüksek sıcaklıklarda yanma eğilimi olduğunu belirtir ve bu özellik, hidrojenin kullanımında dikkate alınması gereken önemli bir faktördür.

Hidrokarbonlar arasında parafinlerin dışında alternatif çeşitler de bulunur; bunlar arasında olefinler, naftenler ve aromatikler sayılabilir. Bu farklı hidrokarbon tipleri, kimyasal yapıları ve kullanım alanlarına göre çeşitlilik gösterir [219].

Yakıtların başka bir önemli özelliği, bağıl yoğunluğudur. Bu özellik, yakıtların kütlesini hesaplamada kritik bir role sahiptir. Taşıtlarda yakıt depoları genellikle hacim olarak ölçülür ve tasarlanır; bu nedenle, yakıtın yoğunluğu depoya konulacak yakıtın kütlesini belirler. Örneğin, tipik bir gaz türbin yakıcısında kullanılan yakıtların sıcaklığa bağlı olarak bağıl yoğunluk değişimleri, yakıt seçimi ve tasarımı için önemli bir parametredir ve bu değişimler, yakıtın fiziksel özelliklerinin yanma performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir [173].

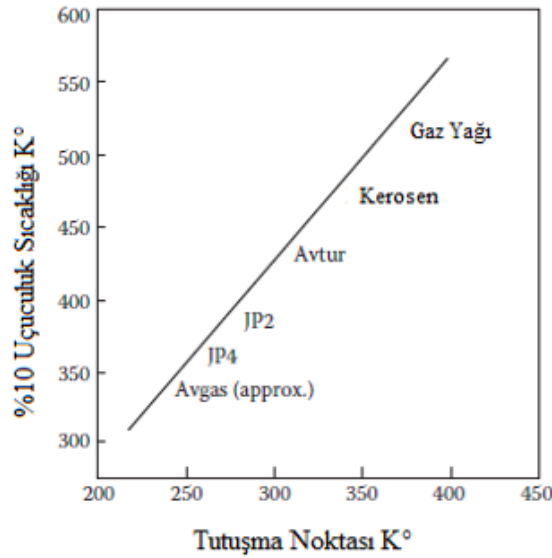
Bu tür fiziksel özellikler, endüstriyel uygulamalar ve enerji sistemleri tasarımında önemle dikkate alınmalıdır. Yanma verimliliği, emisyon kontrolü ve güvenlik standartlarını karşılamak üzere, yakıtların kimyasal ve fiziksel özelliklerinin detaylı olarak anlaşılması şarttır. Şekil 2.6, tipik gaz türbin yakıcılarında kullanılan yakıtların sıcaklığa göre bağıl yoğunluk değişimlerini görsel olarak sunmaktadır, bu da tasarımcı ve mühendisler için önemli bir referans kaynağıdır.



Şekil 2.6. Tipik gaz türbin yakıtlarının sıcaklık-bağıl yoğunluk grafiği [173]

Yakıtların özelliklerini anlamak, yanma teknolojileri ve enerji sistemlerinin tasarımı için kritiktir. Moleküler kütle ve buharlaşma basıncı gibi özellikler, yakıtların yanma verimliliği ve güvenliği üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek buharlaşma basıncı, yanma odasında yakıtın kolay buharlaşmasını sağlar, ancak düşük buhar basınçları, özellikle yüksek irtifalarda uçuş güvenliğini artırır. Ayrıca, uçuculuk, yanma sürecinin kararlılığını ve verimliliğini artırırken, yüksek irtifalarda yangın riskini yükseltebilir.

Yakıtların tutuşma noktaları ve uçuculuk sıcaklıkları arasındaki ilişki, yanma sistemlerinin tasarımında önemli bir faktördür. Bu özellikler, yakıtın güvenli ve etkin kullanımı için bir arada değerlendirilmelidir. Şekil 2.7'de sunulan veriler, yakıtların farklı kullanım koşullarına göre nasıl optimize edileceği konusunda rehberlik sağlar [173, 221].



Şekil 2.7. Uçuculuk – tutuşma sıcaklığı değişim eğrisi [173]

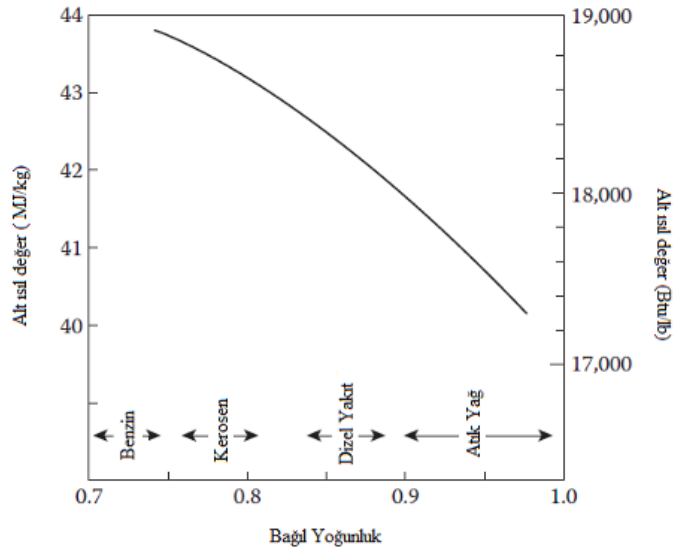
Yakıtların yanma sistemlerindeki performansını belirleyen kritik parametrelerden biri viskozitedir. Yüksek viskoziteli yakıtlar atomizasyon kalitesini düşürerek yanma verimliliğini olumsuz etkiler. Ayrıca, özgül ısı kapasitesi, özellikle uçaklarda motor ve gövde ısını emen bir soğutucu olarak kullanılır; bu nedenle yüksek özgül ısı kapasitesine sahip parafinler tercih edilir.

Bir diğer önemli özellik ise ısı değeri. Gaz türbinlerinde, CO₂ ve H₂O'nun buhar fazında olduğu durumlarda alt ısı değeri ön plana çıkar. Hafif yakıtlar, kimyasal bileşimlerine ve hidrojen/karbon oranına bağlı olarak en yüksek özgül enerji değerlerine sahiptir [221].

Yakıt sistemleri tasarımında ve gaz yakıtların karşılaştırılmasında kullanılan Wobbe endeksi, yakıtların enerji yoğunluğunu bağıl yoğunluğa oranlayarak, farklı yakıt tiplerinin yanma davranışlarını karşılaştırmada yardımcı olur. Formül şu şekildedir:

$$\text{Wobbe Endeksi} = \text{Enerji Yoğunluğu} / \text{Bağıl Yoğunluk} \quad (1.3)$$

Bu endeks, farklı yakıt tiplerinin enerji verimliliği ve akış karakteristikleri açısından nasıl performans gösterdiğini anlamak için kullanılır. Şekil 2.8'de sunulan farklı yakıt tiplerinin alt ısı değeri ve bağıl yoğunluklarının karşılaştırması, bu yakıtların yanma sistemlerindeki kullanımını optimize etmek için değerli bilgiler sunar [173].



Şekil 2.8 Farklı yakıtların alt ısı değeri/ bağıl yoğunluk oranı [173]

2.2.7.1. Metan (CH₄)

Metan (CH₄), hidrokarbonların en basiti olan renksiz ve kokusuz bir gazdır. Atmosferdeki varlığı, doğal süreçler ve insan faaliyetleri sonucunda artmaktadır ve %5 ila %15 konsantrasyon aralığında patlama riski taşır. Bu özellik, metanın enerji üretimi gibi uygulamalarda kullanımını riskli hale getirir. Ayrıca, metan bir sera gazı olarak, küresel ısınma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve bu durum çevre bilimcilerinin ilgisini çekmektedir.

Doğal gaz, enerji üretimi ve ev ısıtma için kullanılan ana kaynaklardan biridir ve içeriğinin %90'ından fazlası metan içerir. Biyogaz gibi yenilenebilir enerji kaynakları da önemli ölçüde metan içerir; tipik bir biyogaz karışımı hacimce yaklaşık %60 metan barındırabilir, bu da onu enerji üretimi için değerli bir kaynak yapar.

Metanın yanma süreci esas olarak karbondioksit (CO₂) ve su (H₂O) üretir, bu nedenle yanma süreci nispeten temiz kabul edilir. Ancak, atmosfere salınan CO₂, sera gazı emisyonlarını artırarak küresel ısınmaya katkıda bulunabilir. Metanın yanma özellikleri ve enerji üretimi ile ilgili bilgiler, metan kullanımını güvenli ve etkin bir şekilde optimize etmek ve çevresel etkilerini azaltmak için kritik öneme sahiptir. Saf metan gazının yanma özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir [222].

Tablo 2.3. Metan gaz yanma özellikleri [222]

Yoğunluk	0.718 kg/m ³	Alev Sıcaklığı	2206 C°
Alt Isıl Değer (m)	50.06 MJ/kg	Laminer Yanma Hızı	54 cm/s
Alt Isıl Değer (v)	35.91 MJ/m ³	Kimyasal Reaksiyon Süresi	2.10 ⁻⁵
Wobbe İndeksi	48.21 MJ/m ³	Teorik Hava İhtiyacı	17.35 kg/kg

2.2.7.2. Hidrojen (H₂)

Hidrojenin (H₂) alev yayılma hızının metana (CH₄) göre daha yüksek olması, hidrojenin yanma karakteristiğinin önemli bir özelliğidir. H₂/O₂ sisteminin hızlı reaksiyon kapasitesi, hidrojenin yanma odalarında hızlı bir şekilde yanıp enerji üretmesini sağlar. Hidrojenin yüksek difüzyon katsayısı ve alevin önünde ısının taşınması gibi özellikleri, yanma sürecinin hem verimliliğini hem de kontrolünü artırır. Bu, motor ve gaz türbinleri gibi yanma gerektiren sistemlerde hidrojenin daha verimli yanmasına olanak tanır.

Hidrojen, stokiyometrik yanma işlemi sonucunda oksijenle birleşerek sadece su (H₂O) oluşturur. CO₂ veya diğer zararlı emisyonları üretmeksizin yalnızca su üretmesi, hidrojeni sıfır emisyonlu enerji sistemleri için çekici kılar ve küresel iklim değişikliğiyle mücadelede potansiyel bir çözüm olarak öne çıkarır.

Van Den Schoor ve ekibi tarafından yapılan araştırmalar, metan/hidrojen karışımlarının yanma sınırlarını eşdeğerlik oranlarına göre belirlemekte ve bu karışımların yanma sistemlerindeki performansını anlamak ve optimize etmek için önemli bilgiler sağlamaktadır. Eşdeğerlik oranı, bir yanma sürecindeki yakıt ile oksidasyon maddesi (genellikle oksijen) arasındaki oranı ifade eder. Karışımların alt (lean limit) ve üst (rich limit) yanma sınırları, karışımın yanabilir en düşük ve en yüksek yakıt konsantrasyonlarını belirtir. Bu sınırların anlaşılması, karışımların güvenli ve etkin yanması için kritik öneme sahiptir ve hidrojenin enerji sektöründeki kullanımının genişletilmesine yönelik rehberlik sağlar [223].

Tablo 2.4. Metan/hidrojen gaz karışımlarının yanma limitleri [223]

Yakıt Karışımı		Yanıcılık Değeri	
CH_4	H_2	Alt Değer	Üst Değer
100%	0%	0.4380	1.7870
90%	10%	0.3965	1.8430
80%	20%	0.3550	1.8990
70%	30%	0.3165	2.0135
60%	40%	0.2780	2.1280
50%	50%	0.2480	2.3195
40%	60%	0.2180	2.5110

Hidrojenin yanma özelliklerine ilişkin çalışmalar, enerji sistemlerinin tasarımı ve işletilmesinde dikkate alınması gereken önemli parametreleri ortaya koyar. Hidrojen eklenmesi, yanıcılık limitlerini artırarak bu gazın kullanım potansiyelini genişletir. Ancak, hidrojenin yanma davranışı üzerindeki etkileri tam olarak anlamak için, gazın tüm özellikleri ve kimyasal etkileşimleri detaylıca incelenmelidir.

Özellikle, hidrojen oranının artmasıyla metan-hidrojen karışımlarının laminar yanma hızı artar, bu da yanma sürecinde kararsızlıklara neden olabilir. Bu kararsızlıklar, yanma sistemlerinin güvenli ve verimli tasarımı için kritik öneme sahiptir. Hidrojenin yanma sistemlerinde optimize edilmesi hem emisyon azaltma stratejileri hem de enerji verimliliği için önemli bir araştırma alanıdır [175].

Hidrojen ilavesi, yanma hızını ve sıcaklıkları artırarak termal verimliliği yükseltir, fakat yanma kararsızlıkları ve geri tepme riskini de artırabilir. Geri tepme, alevin yanlış yöne hareket ederek yanma sistemine zarar vermesidir. Özellikle, %40 hidrojen içeren metan-hidrojen karışımı, saf metana kıyasla belirli frekanslarda akustik salınım ve geri tepme sinyal genliklerinde artışa neden olur. Bu frekans çakışmaları, alevin ve ısı yayılım dalgalarının akustik modlarla etkileşimi sonucu yanma kararsızlığına ve alevin geri tepmesine yol açabilir.

Bu etkilerin kontrolü, güvenli ve verimli yanma sistemleri için kritik önem taşır. Akustik zorlamalı sistemlerde, hidrojenin yanma davranışını anlamak ve yönetmek, sistem performansı ve güvenliği için hayati önemlidir. Bu bilgiler, daha iyi enerji verimliliği ve operasyonel güvenlik sağlayacak yanma sistemleri geliştirilmesine yardımcı olur [224].

Hidrojenin yanma kararlılığını etkileyen temel özellikleri, enerji sistemlerindeki kullanımını önemli ölçüde etkiler:

- **Hafiflik:** Hidrojen, metana kıyasla çok daha hafif bir gazdır. Bu özellik, hidrojenin hava ile hızlı karışmasını ve homojen bir karışım oluşturmalarını sağlar.
- **Yüksek Kütlesel Isıl Değer:** Kütlesel bazda, hidrojenin ısı değeri metandan çok daha yüksektir, bu da hidrojenin daha fazla enerji içerdiği ve yakıldığında daha yüksek enerji salınımı yaptığı anlamına gelir.
- **Alev Sıcaklığı:** Hidrojen alevlerinin sıcaklığı, metaninkine göre daha yüksektir, bu da daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmasını ve enerji açığa çıkmasını sağlar.
- **Laminer Yanma Hızı:** Hidrojenin laminer yanma hızı, metaninkinden yaklaşık 14 kat daha fazladır. Bu, hidrojen alevinin hızlı hareket ettiği ve geniş bir yanma alanı oluşturduğu anlamına gelir, ancak yanma kararsızlıklarına yol açabilir.

Bu özellikler, özellikle yüksek sıcaklıklı yanma gerektiren uygulamalarda hidrojenin etkin kullanımını sağlar. Ancak, hidrojenin yüksek laminer yanma hızı ve alev sıcaklığı gibi özellikleri yanma odasında kararsızlıklara neden olabilir ve dikkatle kontrol edilmesi gerekir. Yanma odası tasarımı, yakıt karışım oranları ve hava akış hızı gibi faktörler optimize edilerek ve gerekirse stabilizasyon için ek kontroller kullanılarak bu kararsızlıklar yönetilmelidir. Hidrojenin sıfır karbon emisyonu potansiyeliyle birleştiğinde, enerji üretiminde sürdürülebilirlik adına önemli bir adım olarak görülebilir [222].

Tablo 2.5. Hidrojen gazı yanma özellikleri [222].

Yoğunluk	0.09 kg/m ³	Alev Sıcaklığı	2376 C°
Alt Isıl Değer (m)	119.97 MJ/kg	Laminer Yanma Hızı	770 cm/s
Alt Isıl Değer (v)	10.78 MJ/m ³	Kimyasal Reaksiyon Süresi	2.10 ⁻⁷
Wobbe İndeksi	40.09 MJ/m ³	Teorik Hava İhtiyacı	34.53 kg/kg

2.2.8. Baca Gazı Emisyonları

Baca gazı emisyon değerleri hem enerji alanında hem de çevre sorunları üzerine çalışmalar yapan bilim insanları için önemli bir araştırma konusudur. Bu emisyonlar, insan sağlığına doğrudan zararlı olabildikleri gibi, dolaylı olarak küresel ısınmaya katkıda

bulunarak diğer canlı türlerinin zarar görmesi ve sonuç olarak insan yaşamını etkilemektedir. Gaz türbin yakıcılarında ve enerji üretim süreçlerinde emisyon değerlerinin azaltılması, son yıllarda odaklanılan ana konulardan biri haline gelmiştir [225].

Emisyon azaltma yöntemleri arasında, daha temiz yakıt kullanımı, yanma teknolojilerinde iyileştirmeler, karbon yakalama ve saklama teknikleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerin etkinliği, emisyon ölçüm cihazlarıyla düzenli olarak kaydedilen değerler üzerinden değerlendirilebilir. Yanma verimliliğinin hesaplanmasında, sisteme giren yakıt içerisindeki karbon kütlesinin çıkıştaki karbondioksit kütlesi ile karşılaştırılması yaygın bir yöntemdir. Bu kıyaslama, yanma sürecinin ne kadar verimli olduğunun belirlenmesine olanak tanır [226].

Girişteki yakıtta bulunan karbon miktarının, yanma sonucu oluşan karbondioksit dönüşüm oranı, yanma sürecinin verimliliğini gösteren bir göstergedir. Yanma sürecindeki karbonun mümkün olduğunca tamamen karbondioksit dönüşmesi, yanmanın daha verimli olduğunu ifade eder. Bu dönüşüm oranı, aynı zamanda yanma sürecindeki tamamlanmamış yanmanın ve yanma sırasında açığa çıkan zararlı emisyonların azaltılmasına katkı sağlar.

Yanma süreçlerindeki emisyon değerlerini azaltmak hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemek hem de enerji verimliliğini artırmak için kritik bir adımdır. Bu nedenle, baca gazı emisyonları üzerine yapılan araştırmalar, gelecekte daha temiz ve daha verimli enerji üretim teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu çalışmalar, çevre üzerindeki olumsuz etkileri minimize etmeye ve enerji sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik önemli bilgiler sunar [227].

2.2.8.1. Karbondioksit (CO₂)

Son yıllarda, ABD Çevre Koruma Ajansı (EPA), "mükemmel" bir yanma ürünü olan karbondioksiti kirlilik endişesi olarak görmeye başlamıştır. Karbondioksit insan sağlığını doğrudan etkilememektedir. Dünyanın ısısı ve küresel ısınma problemine sebep olmaktadır [228].

Gaz türbin yakıcılarında ve diğer yanma süreçlerinde karşılaşılan en önemli emisyonlardan biri karbondioksit (CO₂)'dir. CO₂ emisyonlarının önemli bulunmasının

temel sebepleri arasında, direkt zehirleyici olmamasına rağmen sera gazı etkisiyle küresel ısınmanın ana nedenlerinden biri olarak görülmesi yer alır. Ayrıca, CO₂, hidrokarbonların teorik yanması sonucunda zorunlu olarak açığa çıkan bir yanma ürünüdür. Yanma işleminin temel amacı, enerji elde etmek için karbonları CO₂'ye dönüştürmektir. Bu, karbon içerikli herhangi bir yakıtın yanması sonucunda farklı miktarlarda CO₂ emisyonunun mutlaka açığa çıkacağı anlamına gelir.

Bu nedenle, sera gazı etkisini azaltmak ve küresel ısınmayla mücadele etmek amacıyla CO₂ emisyonlarını azaltmaya yönelik önemli araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalardan bazıları, ısı değeri yüksek olan hidrojeni yakıt karışımlarına ekleyerek CO₂ emisyonlarını azaltmayı hedeflemektedir. Hidrojenin yanması, zararsız olan suyu (H₂O) ortaya çıkarır, bu da karbon emisyonlarıyla mücadelede umut vericidir. Yakıt karışımlarının hidrojen ile zenginleştirilmesi dışında, oksijenle zenginleştirme işlemi de CO₂ emisyonlarının azaltılması ve çevreye salınımının engellenmesi amacını taşımaktadır.

Avrupa Birliği gibi uluslararası kuruluşlar, Horizon 2020 programı kapsamında karbon yakalama ve depolama projelerini desteklemektedir. Oksijenle zenginleştirilmiş yanma, sisteme giren azot miktarını azaltarak, yanma sonu emisyonlarda CO₂ oranını artırmayı hedefler. Oksi-yakıt yanması teknolojisinde, hava yerine saf oksijen kullanılarak yanma gerçekleştirilir ve sisteme azot girmeden, teorik olarak sadece CO₂ ve H₂O emisyonu oluşur. Bu teknoloji, baca gazlarından CO₂'nin yakalanıp depolanmasını ve böylece sıfır emisyonla enerji üretimi sürecini mümkün kılar [229].

2.2.8.2. Karbonmonoksit (CO)

Eksik yanma sonucunda ortaya çıkan karbonmonoksit (CO) emisyonu, zehirleyici özellikleri ile bilinir ve tam yanma sürecinin tamamlanamadığının bir göstergesidir. Bu durum, yanma reaksiyonu için gerekli olan oksijen miktarının yetersiz olması nedeniyle meydana gelir. Yanma sırasında CO₂'nin ayrışması da CO emisyonlarının bir diğer oluşum mekanizmasıdır. Karbonmonoksit, kan dolaşımındaki oksijen akışını azaltır ve özellikle kalp hastalığı olan kişiler için tehlike oluşturmaktadır. Bu tür emisyonlar, özellikle düşük yakıt/hava oranlarında veya yakıt ve havanın yetersiz karıştığı durumlarda artış gösterir [228].

CO emisyonları, yanma sürecinin verimliliği açısından önemli bir sorundur. Enerji üretiminde kullanılan yakıtların etkin bir şekilde yanmaması hem yakıt israfına yol açar hem de yüksek seviyede zararlı emisyonların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu nedenle, CO emisyonlarını azaltmak için çeşitli yöntemler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır:

Ön Karışım Mekanizmaları: Yakıt ve hava karışımının yanma odasına girmeden önce iyi bir şekilde karıştırılması, yanma sürecinin daha tam ve verimli olmasını sağlar. Bu, CO emisyonlarını önemli ölçüde azaltabilir.

Hidrojen İlaveli Yakıt Karışımları: Hidrojen, yanma sırasında yüksek bir yanma hızına sahip olduğundan, yakıt karışımlarına eklenmesi, CO emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olabilir. Hidrojenin yanması sırasında sadece su (H_2O) açığa çıkar, bu da yanma sürecinin daha temiz olmasını sağlar.

Bu yöntemler, CO emisyonlarının azaltılması ve enerji üretim süreçlerinin daha verimli hale getirilmesi için kullanılmaktadır. Yüksek CO emisyonları, bir yanma sisteminin verimli çalışmadığının ve enerji kaynaklarının etkin kullanılmadığının bir işareti olarak görülebilir. Bu nedenle, CO emisyonlarını azaltmaya yönelik çalışmalar hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmalar, yanma teknolojilerinin geliştirilmesine ve daha temiz yanma süreçlerinin tasarlanmasına katkıda bulunarak hem çevre koruma hem de enerji tasarrufu hedeflerine ulaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır [173].

2.2.8.3. Hidrokarbonlar (HC)

Hidrokarbon emisyonları, motordaki yakıt molekülleri yanmadığında veya kısmen yandığında ortaya çıkar. Hidrokarbonlar, azot oksitlerin ve güneş ışığının varlığında reaksiyona girerek, kirli havanın önemli bir bileşeni olan yer ozonunu oluşturmaktadırlar. Ozon gözleri tahriş etmekte, akciğerlere zarar vermekte ve solunum problemlerini şiddetlendirmektedir. Bazı egzoz hidrokarbonları da toksiktir ve kansere yol açma potansiyeli vardır [228].

2.2.8.4. NO_x Emisyonları

Bir motordaki yüksek basınç ve sıcaklık koşulları altında, havadaki nitrojen ve oksijen atomları, topluca NO_x olarak bilinen çeşitli nitrojen oksitleri oluşturmak üzere reaksiyona

girmektedir. Hidrokarbonlar gibi nitrojen oksitler, ozon oluşumunun öncüleridir. Ayrıca asit yağmurlarının oluşumuna da sebep olmaktadır [228].

Gaz türbin yakıcıları ve diğer yüksek sıcaklıkta çalışan yanma sistemlerinde NO_x emisyonları, önemli bir çevresel ve operasyonel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. NO_x emisyonları, nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) olmak üzere iki ana bileşenden oluşur ve yanma sonucu oluşan NO, daha sonra NO₂'ye oksitlenir. Bu emisyonların oluşumunda üç temel mekanizma bulunmaktadır:

1. Termal NO_x Oluşumu

Tanımı: Termal NO_x, yüksek adyabatik alev sıcaklıklarının tetiklediği bir mekanizmadır ve 1850 K° civarında azotun oksidasyonu ile oluşur. Bu süreç ısıyla tetiklenen bir reaksiyonu içerir.

Artış Sebepleri: Oksijenle zenginleştirme işlemleri sonucunda adyabatik alev sıcaklıklarının artması, termal NO_x emisyonlarının katlanarak artmasına neden olabilir [230].

2. Ani-NO_x Oluşumu

Tanımı: Ani-NO_x, termal NO_x'e zıt olarak düşük sıcaklıklarda oluşabilir ve genellikle zengin yakıt karışımlarında görülür. Yakıt-hava karışımı içerisindeki azot miktarının çok yüksek ya da çok düşük olması bu mekanizmanın tetiklenmesine sebep olur.

Özellikleri: Oksijence zenginleştirme süreçlerinde hava kısılarak yerine oksijen eklenir ve bu, azot miktarının azalmasına yol açar. Bu azalma, oksijence zenginleştirilmiş yanmalarda ani-NO_x oluşumunu tetikleyebilir [229].

3. Yakıt-NO_x Oluşumu

Tanımı: Fosil yakıtların ve bazı sentez gaz karışımlarının organik bileşenlerinde bulunan azot, yanma sonucunda oksidasyona uğrayarak NO_x emisyonlarına dönüşür.

Etkileri: Yakıt-NO_x'in oluşumu, yakıt karışımının içerisindeki azot miktarına bağlı olarak değişir ve özellikle yüksek azot içeren yakıtlarda bu tür emisyonların oluşum seviyesi artar[65].

Bu emisyonların kontrolü ve azaltılması hem çevresel regülasyonlara uyum sağlamak hem de halk sağlığını korumak açısından büyük önem taşır. NO_x emisyonlarının azaltılması için uygulanan yöntemler arasında düşük NO_x yanıcılar, seçici katalitik indirgeme (SCR) sistemleri ve yanma hava/yakıt oranının optimize edilmesi gibi teknikler bulunmaktadır. Bu stratejiler, NO_x emisyonlarını etkili bir şekilde azaltmaya yardımcı olurken, yanma verimliliğini korumayı ve enerji üretim maliyetlerini dengede tutmayı amaçlar.

2.2.9. Verimlilik

Termal verimlilik, içten yanmalı motorlar, buhar türbinleri, kazanlar ve ısı pompaları gibi enerji dönüştürme cihazlarında önemli bir parametredir ve faydalı çıkışa dönüştürülen giriş ısısının yüzdesini temsil eder [231]. Termal verimliliği artırmak, özellikle enerji verimliliği ve sürdürülebilirliğe artan odaklanma ile enerji tüketimini, maliyetleri ve çevresel etkiyi azaltmak için çok önemlidir [232]. Yüksek termal verimlilik elde etmek, termal enerjiyi etkili bir şekilde yönetmek ve genel enerji tüketimini ve emisyonları azaltmak için endüstriyel süreçlerde anahtardır [233]. Özellikle, termal verimlilikteki ilerlemeler sanayileşme ve ekonomik büyümede çok önemli olmuştur ve modern kömür yakıtlı enerji santralleri, tarihsel buhar motorlarına göre önemli bir gelişme olan yaklaşık %47 verimliliklere ulaşmıştır [234].

Isıl verim (η_{th}), içten yanmalı motorlar, ısı makineleri ve ısı pompaları gibi termodinamik çevrim gerçekleştiren makinelerin performansını ölçen boyutsuz bir büyüklüktür. Bu makineler, sisteme verilen ısı (Q_{in}) ile genellikle mekanik enerji (W_{out}) veya başka bir enerji biçimi (Q_{out}) elde etmeye çalışır. Genel anlamda ısı verim şu şekilde ifade edilir:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Alınan İş veya Isı}}{\text{Verilen Isı}}$$

Termodinamiğin birinci ve ikinci yasalarına göre, bu değer 1'den büyük olması yani alınan işin verilen işten fazla olması mümkün değildir. Bu nedenle:

$$0 \leq \eta_{th} \leq 1.00$$

İdeal sistemlerde (tersinir veya mükemmel sistemler) bu değer 1'e eşit olabilir. Ancak, gerçek hayatta ideal sistemlere rastlanmaz. Sürtünme ve ısı kayıpları gibi faktörler

nedeniyle, ısı verim daima 1'den küçük olur. Günümüzde kombine ısı makinelerinde %70'i (0.7) aşan verimlere sahip makineler bulunmaktadır.

Isıl enerjinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü ısı makinelerinde ısı verim şu şekilde tanımlanır:

$$\eta_{th} = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$$

Giren ve çıkanlar ısı olarak değerlendirildiğinde ise:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$

Maliyetler

Metan elde etmenin maliyetleri, üretim yöntemine ve ilgili faktörlere bağlı olarak değişebilir. Araştırmalar, biyometan üretim maliyetlerinin, elektroliz ile birleştirildiğinde katalitik ve biyolojik metanasyon işlemleri için sırasıyla 13,95 ila 17,30 €/Ct/kWh arasında değişebileceğini göstermektedir [273]. Ek olarak, metanın (SC-CH₄) sosyal maliyetinin, farklı modellere ve emisyon senaryolarına dayalı varyasyonlarla birlikte, yüksek emisyon senaryoları altında ton CH₄ başına 933 ABD doları civarında olduğu tahmin edilmektedir [274]. Ayrıca, sığır ve et koyunları için yetiştirme hedeflerine metan ölçümlerinin dahil edilmesi, özellikle metan özelliklerini yem alımı için vekiller olarak düşünüldüğünde, yem maliyetlerini düşürmede ve verimliliği artırmada potansiyel faydalarla karlılığı etkileyebilir [275]. Bu bulgular, metan üretiminde yer alan çeşitli maliyet hususlarını ve maliyetleri en aza indirmek için üretim süreçlerini optimize etmenin önemini vurgulamaktadır.

Neale R. Neelameggham ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada bildirildiği gibi, hidrojen elde etmenin maliyeti yaklaşık 1,20 \$/kg ile 12,00 \$/kg arasında değişmektedir [276]. Bu maliyet spektrumu öncelikle enerji dönüşüm maliyetlerinden ve bu dönüşümlerle ilişkili ekonomiden kaynaklanmaktadır. Analizde vurgulanan uygun maliyetli yöntemlerden biri, CO₂ içermeyen ve günümüzde mevcut olan yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak kolayca üretilen hidrokarbonlardan 'turuncu' hidrojen üretimidir. Bileşiklerden veya bileşik karışımlarından elemental hidrojeni çıkarma işlemi,

toplam üretim maliyetlerine önemli ölçüde katkıda bulunan enerji harcaması gerektirir. İlgili termodinamik ve ekonomiyi anlayarak, hidrojen elde etme maliyetinin enerji dönüşüm süreçleriyle ve üretimi için yenilenebilir kaynakları kullanmanın fizibilitesi ile karmaşık bir şekilde bağlantılı olduğu ortaya çıkıyor.

2.3. Manyetik Alan

Mıknatıslar genellikle hareket halindeki elektrik yükünün bir sonucu olan manyetik alan üretirler. Kalıcı mıknatıslarda geleneksel bir elektrik akımı yoktur. Ancak, mıknatıs materyali içindeki elektronların dönüşleri ve yörüngesel hareketleri ("Ampere Akımları" olarak adlandırılır), materyal içindeki mıknatıslanmanın ve materyal dışındaki manyetik alanın ana sebebidir. Bu manyetik alanlar, akım taşıyan iletkenlere ve kalıcı mıknatıslara bir kuvvet uygular [235].

Manyetik kuvvet ve elektrik kuvveti, çekme ve itme özellikleri bakımından benzerdir. Farklı mıknatısların benzer kutupları ve benzer elektrik yükleri birbirini iterken, farklı mıknatısların zıt kutupları ve zıt elektrik yükleri birbirini çeker. Öte yandan, elektrik yükleri izole edilebilirken, manyetik kutuplar her zaman çift halinde bulunur [236].

Manyetik materyaller, duyarlılıklarına (hassasiyet veya alıcılık) ve geçirgenliklerine (gözeneklilik) göre üç kategoriye ayrılır: diyamanyetikler, paramanyetikler ve ferromanyetikler. Bakır, gümüş ve altın gibi diyamanyetikler düşük ve negatif duyarlılığa sahip olup genellikle süperiletken olarak kullanılırlar. Alüminyum, platin ve mangan gibi paramanyetikler düşük fakat pozitif duyarlılığa sahiptir. Demir, kobalt ve nikel gibi ferromanyetikler yüksek ve pozitif duyarlılığa sahip olup, daha yüksek manyetik indüksiyon ve akı üretecektir. Ferromanyetikler en yaygın tanınan manyetik materyallerdir [235].

Kalıcı mıknatıslarda manyetik alan, kalıtsal bir materyal özelliğidir. Ancak, manyetik alanlar ayrıca solenoidler veya elektromıknatıslar tarafından da üretilebilir. Bir solenoid genellikle, bir helis deseninde bir izolator üzerine sarılmış yalıtılmış bir elektrik iletken teli olan bakırdan yapılır. Diğer taraftan, bir elektromıknatıs yumuşak bir ferromanyetik materyal olan demiri izolator olarak kullanır. Ferromanyetik çekirdek, aynı manyetik alan için daha yüksek bir manyetik indüksiyon üretir. Birim uzunluk başına sarım sayısını

arttırmak, bobin akımını arttırmaktan daha etkili bir şekilde daha yüksek bir manyetik alan üretmede daha etkilidir [235].

Bir silindirik solenoid veya bir elektromıknatıs çevresindeki manyetik alan çizgileri her zaman kuzey kutuptan (alan kaynağı) güney kutba (alan çukuru) doğru hareket eder [235]. Bobini izolatör etrafında sıkı bir şekilde sarılması, kalıcı bir mıknatısınkine benzeyen düzgün bir manyetik alan deseni üretecektir [236].

Manyetik alan etkisi birçok iyi uygulamada kullanılmıştır. Bu uygulamalardan bazıları borulardaki kireç oluşumunu önleme, sıvılardan katı parçacıkları filtreleme ve kütle spektrometrelerinde kütleyle bağlı olarak yüklü parçacıkları (genellikle iyonları) ayırmadır. Yakıtın ve oksitleyicinin moleküler düzeni ve moleküler enerjisi, manyetik bir alanın uygulanmasıyla etkilenebilir [237, 238, 62, 63, 64].

Bir döngü sürecinin herhangi bir aşamasında manyetik alan etkisi uygulanabilir. Ancak, manyetik etkinin indüksiyon aşamasında uygulanması, diğer döngü süreçlerinde de devam edebilir. İtten yanmalı motorların yanması ve emisyonları üzerinde manyetik etki, motorun tasarımına ve kullanılan yakıt türüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Kombiler, gaz türbinleri ve difüzyon alevleri gibi diğer uygulamalarda manyetik alanın yanma ve emisyonlar üzerindeki etkisi farklılık gösterebilir.

Manyetik alan, manyetik kuvvetten etkilenen bir mıknatısın etrafındaki alan (boşluk) olarak tanımlanır. Fizikte manyetik alan, hareketli elektrik yüklerinde bir kuvvetin ortaya çıkmasına neden olan elektrik yükünün (elektrik akımı) hareket ettirilmesiyle oluşan bir alandır.

Manyetik malzemelerin paramanyetik, ferromanyetizma ve diyamanyetizma olmak üzere üç özelliği vardır. Paramanyetik, hiçbir manyetik özelliği olmayan bir özelliktir. Manyetik malzeme, kalıcı bir dipol momenti olan atom veya iyonlardan oluşur. Ferromanyetizma, güçlü manyetik özelliklere sahip bir malzeme özelliğidir. Manyetik alan tarafından ısındığında ferromanyetizma malzemesi, malzemedeki manyetik alan kuvvetinin çok büyük olmasına neden olmaktadır. Ferromanyetizma örnekleri demir, kobalt, nikel, disprosyum ve gadolinyumdur. Diyamanyetizma paramanyetiktir ancak küçük manyetik özelliklere sahiptir [239].

Manyetik alan, mıknatısın etrafındaki boşluğa manyetik bir nesne yerleştirildiğinde nesnenin manyetik kuvvete maruz kaldığı boşluktur. Manyetik kuvvet genellikle manyetik alan veya manyetik kuvvet çizgisi adı verilen hayali çizgilerle temsil edilmektedir. Bu manyetik alan çizgileri, kuzey kutbundan çıkan ve mıknatısın güney kutbuna giren yönlerle sahiptir.

Manyetik alanın üç kuralı vardır, bunlar:

- Manyetik alan çizgileri asla birbirini kesmez (çaprazlamaz).
- Manyetik alan çizgileri daima kuzey kutbundan çıkar ve güney kutbuna girer ve kapalı bir eğri oluşturmaktadır.
- Belirli bir konumdaki manyetik alan çizgileri yoğunsa, o konumdaki manyetik alan güçlüdür, ya da belirli bir konumdaki manyetik alan çizgileri birbirinden çok uzaksa, o zaman bu konumdaki manyetik alan zayıftır.

Manyetik malzemelerin veya elektrik yüklü parçacıkların manyetik alan miktarı, manyetik indüksiyon (B) miktarı ile temsil edilir. Manyetik alanın yönünü belirlemek için Şekil 2.3.1'de belirtilen sağ el kuralı kullanılmaktadır. Başparmağın yönü elektrik akımının yönünü (I) gösterirken, parmakların yönü manyetik alanın (B) yönünü gösterir [240].

2.3.1. Mıknatıslar

Ferro veya ferromanyetik davranışa sahip olan malzemeler manyetik alan oluşturmada önemli bir yer tutmaktadır. Bu malzemeler modern teknolojinin gelişmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Olağanüstü manyetik özellikler, düşük maliyet ve demirin bulunabilirliği, yıllardan beri büyük miktarlarda elektrik üretmeyi mümkün kılmıştır. Hayati bir işlevi yerine getirmek için kalıcı mıknatısların kullanımı, sadece elektrik santralleriyle sınırlı değildir, iletişim, bilgisayarlar, elektrikli makineler ve ev aletleri gibi ürünler içinde kullanılmaktadır [241].

2.3.1.1. Neodimyum mıknatıslar

Neodim, 1885 yılında keşfedilen kimyasal bir elementtir. Bu element (atom numarası 60), gümüşü beyaz metalik bir renge sahiptir ve periyodik tabloda lantanitler grubuna ait olup havada hızla oksitlenmektedir [242]. Neodimyum-demir-bor mıknatıslar 1980'lerde General Motors ve Hitachi tarafından geliştirilmiştir. Daha az miktarlarda bile yüksek

manyetik kuvvet sağladığından, nadir toprak elementlerinden oluşan güçlü kalıcı mıknatısların üretiminde giderek daha belirgin bir rol üstlenmektedir[243].

2.3.2. Manyetizmanın Hidrokarbon Yakıtına Etkisi

Hidrokarbonlu yakıtlarda Hidrojen, para ve ortho olarak iki farklı izomerik formda oluşur. Hidrojenin, ortho durumu para durumuna göre yanma verimi açısından daha etkilidir. ortho durumu yakıt hattı boyunca manyetik alan etkisiyle elde edilebilmektedir [244]. Yakıtta güçlü bir manyetik alan uygulandığında, hidrokarbon yönünü değiştirir ve para formundan ortho formuna geçiş yapar. Ortho formunda, moleküller arası kuvvetlerde önemli azalma meydana gelir ve hidrojenler arasındaki boşluklarda artışa neden olur. Yakıtın oksijenle etkileşiminin manyetik işleminden geçirilmesi nedeniyle yakıtın oksijen ile etkileşimi artmakta ve yakıt haznede tamamen yanmaktadır [245]. Bu alanda yapılan birkaç çalışmada manyetik alanın yakıt emisyonları üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

2.3.2.1. Manyetik Alanda Yakıtın Performans, Manyetohidrodinamik (MHD)

Manyetohidrodinamik (MHD), akışkan dinamiklerini elektromanyetizma ile birleştiren, astrofiziksel plazma ve mühendislik sistemlerindeki çeşitli fenomenlere uygulanabilen bir alandır. MHD'de, iletken bir sıvı manyetik alanda hareket ettiğinde, indüklenen elektrik alanları ve akımlar manyetik alanla etkileşime girerek sıvı akışını önemli ölçüde etkiler [246]. MHD, dinamo teorisinde, çıkıntılar ve parlamalar gibi güneş fenomenlerinde ve yığılma diskleri ve görelî jetler gibi kozmik yapılarda uygulamalar bulur [247]. Ayrıca, MHD sistemleri, manyetohidrodinamik pompalar kullanılarak akışkan sistemlerdeki bileşenleri ayırmak gibi pratik amaçlar için tasarlanabilir [248]. Ek olarak, manyetohidrodinamik enerji üretim sistemleri gibi yenilikçi uygulamalar, manyetik akışkanların manyetik alanlarla etkileşimi yoluyla ısı enerjisinin doğrudan elektriğe dönüştürülmesini göstermektedir [249].

Manyetohidrodinamik (MHD) yanma ve yakıt yönetiminde önemli bir rol oynar. Araştırmalar, manyetik alanların sıvı akışını etkileyerek ve yakıt yakma verimliliğini artırarak yanma süreçlerini değiştirebileceğini göstermektedir. Çalışmalar, yayılan alevlerde MHD kontrolünün önemli manyetik alanlar aracılığıyla elde edilebileceğini ve

1-2 Tesla aralığının yanma koşullarını iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir [250]. Kalıcı mıknatıslar tarafından üretilenler gibi yüksek manyetik alan gradyanlarının uygulanması, oksijen çekilmesini iyileştirebilir ve kurum partikül aglomerasyonunu azaltabilir, sonuçta yanma verimliliğini artırabilir [251]. Ek olarak, Manyetizer Yakıt Enerjizerinden olanlar gibi güçlü manyetik alanların kullanılması, yanma odalarında yakıtın neredeyse tamamen yanmasına neden olabilir, potansiyel olarak motor gücünü artırabilir ve yakıt tüketimini azaltabilir [252]. Yanma süreçlerinin aktif kontrolü için bir yöntem sunan bir oda içindeki yanma bölgelerini manyetik olarak yönetmek de mümkündür.

2.3.2.1.1. Manyetohidrodinamik (MHD) Mekanizması ve Maxwell Denklemleri

Manyetohidrodinamik (MHD) teorik çerçevesi ve işletme prensipleri, özellikle etkileşim mekanizmasına odaklanmaktadır. Bu makale, harici bir manyetik alanın uygulanmasının hidrokarbon moleküllerinde polarizasyonu tetikleyebileceği fenomeni açıklar, bu da nedenle dış elektronların hidrokarbon zinciri boyunca göçünü başlatır. Bahsedilen hareket, önceki var olan hidrokarbon kümelemesinin parçalanmasına neden olan elektronların yükseltilmiş elementer kuantum numaralarına doğru itilmesine neden olan bir fenomeni tetikler. Araştırma ayrıca hidrojenin orto ve para izomerlerinin yakıt molekülleri ile ambiyans oksijen arasındaki etkileşim üzerindeki etkisini incelemektedir. Ayrıca, bu, manyetohidrodinamikte (MHD) manyetik alan ile akışkan akışı arasındaki ilişkiyi açıklar, bu da Lorentz kuvvetinin etkisi nedeniyle akışkan hareketin yavaşlamasına ve nihayetinde tamamen durmasına yol açar [253].

Denklemlerin Çıkarımı aşağıda ayrıntılı açıklanmıştır;

Manyetohidrodinamik (MHD), akışkanlar ve elektromanyetik alanlar arasındaki etkileşimi inceleyen bir alandır. Elektriksel olarak iletken bir sıvının akışı ile bu sıvıya uygulanan bir elektromanyetik alan arasındaki etkileşim MHD olarak adlandırılır [17]. Manyetik alan ve akış alanı arasındaki bağlantı iki temel etkiye dayanır:

1. İletken bir malzemenin manyetik bir alan içerisindeki hareketi elektrik akımına neden olur.
2. Elektrik akımı ve manyetik alanın etkileşimi sonucu Lorentz kuvveti oluşur [17].

Maxwell Denklemleri: Elektromanyetik alanlar Maxwell denklemleri ile ifade edilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (2.14)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.15)$$

Bu ifadelerde $\mathbf{B}$, $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{D}$, q ve $\mathbf{J}$ sırasıyla manyetik alan, elektrik alan, manyetik indüksiyon alanı, elektrik indüksiyon alanı, elektrik yükü yoğunluğu ve elektrik akımı yoğunluğunu ifade eder. $\mathbf{H}$ ve $\mathbf{D}$ indüksiyon alanları aşağıdaki gibidir:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (2.16)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.17)$$

Burada, μ manyetik geçirgenlik ve ϵ elektrik geçirgenliğini ifade eder.

Ohm Yasası: Manyetik alandaki hız alanı için Ohm yasası:

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B}) \quad (2.18)$$

Burada, σ ortamın elektriksel iletkenliğini ifade eder. Akış alanı ve manyetik alan arasındaki bağlantı Maxwell denklemlerinden türetilebilir ve Ohm yasası manyetik indüksiyon denklemi ile aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{U} \quad (2.19)$$

Lorentz Kuvveti: Akım yoğunluğu ve manyetik alan ile üretilen Lorentz kuvveti:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.20)$$

Momentum Denklemi: Lorentz kuvvetini içeren momentum denklemi:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (2.21)$$

Joule Isıtma Oranı:

$$Q = \frac{1}{\sigma} \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \quad (2.22)$$

Enerji Denklemi: Enerji denklemi, Joule ısıtma hızı dahil olmak üzere:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}(\rho E + p)) \\ &= \nabla \cdot \left(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{D}_j + (\bar{\tau}_{eff} \cdot \mathbf{U}) \right) + S + \frac{1}{\sigma} \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Bu ifadede, p, h, k, D ve S sırasıyla basınç, entalpi, iletkenlik, difüzyon akısı ve kimyasal reaksiyon kaynağı terimini ifade eder. Enerji EEE şu şekilde ifade edilir:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.24)$$

Elektrik akımının sıfır olduğu varsayılarak, 2 boyutlu sabit durum akış alanı için elektrik akımı yoğunluğu ifadesi (Ohm yasası) şu şekilde basitleştirilir:

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{U} \times \mathbf{B}) = \sigma(u_x B_y - u_y B_x) \vec{k} \quad (2.25)$$

Lorentz Kuvveti: Bu ifadenin Lorentz kuvveti denkleminde yerine yazılmasıyla:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = -\sigma B_y (u_x B_y - u_y B_x) \vec{i} + \sigma B_x (u_x B_y - u_y B_x) \vec{j} \quad (2.26)$$

X ve Y Yönlerindeki Lorentz Kuvveti Bileşenleri:

$$F_x = -\sigma B_y (u_x B_y - u_y B_x) \quad (2.27)$$

$$F_y = \sigma B_x (u_x B_y - u_y B_x) \quad (2.28)$$

Joule Isıtma Oranı: Basitleştirilmiş elektrik akımı yoğunluğu ifadesinden yararlanılarak:

$$Q = \frac{1}{\sigma} \mathbf{J} \cdot \mathbf{J} = \sigma (u_x B_y - u_y B_x)^2 \quad (2.29)$$

Momentum Denkleminin Kararlı Durum Formu:

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \rho F_x \quad (2.30)$$

$$\frac{\partial \rho vu}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \rho g + \rho F_y \quad (2.31)$$

Burada,

$$\tau_{xx} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2.32)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (2.33)$$

$$\tau_{yy} = \frac{2}{3} \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (2.34)$$

Sonuç olarak, manyetik alan indüksiyon denklemi aşağıdaki gibi basitleştirilmiştir;

$$(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{U} \quad (2.35)$$

Sonucu elde edilir [254].

Bu denklemler, manyetik alanların yanma süreçleri üzerindeki etkilerini anlamak için temel araçlardır. Özellikle Lorentz kuvveti ve Joule ısıtma oranı, yanma verimliliğini ve emisyonları nasıl etkileyebileceğini anlamak için kritik öneme sahiptir.

Hidrokarbon yakıtlar moleküler bileşiklerdir. Bu moleküller, içerisinde çekirdek ve elektronların bulunduğu bir dizi atomdan meydana gelirler. Dolayısıyla moleküllerde hem pozitif hem de negatif elektrik yükleri bulunmaktadır. Hidrokarbonlar, dışarıdan uygulanacak bir manyetik alan etkisiyle polarize edilebilir. Böyle bir manyetik alan etkisi hidrokarbon zincirindeki dış elektronların hareketlenmesine neden olur ve elektronları daha yüksek temel kuantum sayısına sahip durumlara hareket ettiren bir moment yaratır.

Böylece değerlik elektronları koparılır. Bu şartlar altında Van der Waals'ın bağlarının zayıflar ve ardından mevcut hidrokarbon kümelerinin ayrılırlar. Bu durum ile yakıt ve oksijen molekülleri arasında aktif kenetlenme başlar ve yanma sürecinin daha iyi tamamlanmasını sağlar.

Hidrokarbon yakıtın yanma sürecinde, ilk aşamada yanan hidrojenin dış kabuğudur. Hidrojen, orto hidrojen ve para hidrojen olmak üzere iki farklı biçimde bulunur. Hidrojenin orto ve para varyantları, iki protonun nükleer spininin göreceli oryantasyonunda farklılık gösterir. Para durumunda, protonların spini anti-paraleldir, diğer yönden orto molekülünde ise spinler paralel durumdadırlar. Bu spin yönleri, molekülün davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahiptirler. Orto hidrojenin kararsız ve para durumundan daha reaktif olduğu görülmüştür. Bu durumun yakıtların sahip olduğu tüm molekülleri havadaki oksijenle birleşmesi açısından önemlidir. Aksi takdirde yakıt moleküllerinin bir kısmı yanmamış gaz olarak atmosfere atılır bu da çevre açısından olumsuzluk yaratır. Mıknatıslanma ile yaratılan manyetik kuvvet sonucu para durumunda oluşan moleküller aktif orto duruma yönelir. Böylece yakıt molekülleri arasındaki bağları zayıflatır.

Dik yönde eklenen mıknatıs Faraday yasasına göre elektron üzerine etki edecektir. Böylece, manyetizmaya maruz kalan bir diamanyetik iyon pozitif iyonlaşma sergiler ve bu da hidrokarbonların negatif yüklü oksijen çekmesine ve bağlanmasına yardımcı olur. Termodinamik bakış açısıyla inceleyecek olursak, yakıt tüketimi tamamen yanma entalpisine bağlıdır. Bir reaksiyonun entalpisi, reaktanların ve ürünlerin bağlanma enerjisi kullanılarak hesaplanabilir. Manyetik alandan dolayı hidrokarbon moleküllerinin bağlanma enerjisini değiştirebiliyorsa, yakıt tüketim oranıda değişebilir. Dolayısıyla, bağlama enerjisindeki azalma, entalpiyi doğrudan etkiler ve bu da yakıt tüketim oranına yansır. Yakıt molekülleri arasındaki bağların zayıflaması, oksijen molekülleri ile daha fazla bağ oluşumuna yardımcı olarak yanma veriminde bir artış sağlar [256].

2.3.2.1.2. Serbest Radikallere Etki Eden Manyetik Alanın Teorik Analizi

Maddeler, dış manyetik alanların etkisi altındaki manyetik özelliklerine göre üç ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar: diyamanyetik, paramanyetik ve ferromanyetik malzemeler şeklindedir.

Diyamanyetik Maddeler

Diyamanyetik maddeler, dış manyetik alana uygulandığında zıt yönde hafifçe itilen maddelerdir. Bu maddeler manyetik alan etkisi altında net bir manyetik moment oluşturmazlar çünkü elektron çiftlerinin manyetik momentleri birbirini dengeler.

Örneği: Bakır, gümüş, altın gibi metaller.

Paramanyetik Maddeler

Paramanyetik maddeler, dış manyetik alana maruz kaldıklarında bu alana doğru hafifçe çekilen maddelerdir. Bu maddeler, tek sayıda elektron içerirler ve bu yalnız elektronlar net bir manyetik moment oluşturur.

Örneği: Alüminyum, platin ve oksijen gazı.

Ferromanyetik Maddeler

Ferromanyetik maddeler, dış manyetik alana güçlü bir şekilde çekilen maddelerdir. Bu maddeler, elektron spinlerinin hizalanması sonucu büyük bir net manyetik moment oluştururlar.

Örneği: Demir, kobalt, nikel.

Kuantum kimyasında, kimyasal reaksiyonların sahip oldukları reaksiyon parçacıklarının elektron spin durumlarına bağlı olduğu bilinmektedir. Serbest radikallerde yalnız elektronlar vardır ve manyetik momentler elektron spini tarafından oluşturulur [257]. Dolayısıyla, serbest radikaller paramanyetik maddelerdir. Elektron spin rezonansı ilk olarak 1944 yılında tanımlanmış ve paramanyetik malzemelerin incelenmesine başarıyla uygulanmıştır. Bir manyetik alan teorik olarak elektron spini de dahil olmak üzere pik bölünme sayısındaki bir değişikliklerle herhangi bir kimyasal reaksiyonu etkileyebilir [258].

Maddelerin Manyetik Kategorileri

Elektron Spin Rezonansı (ESR)

Elektron spin rezonansı (ESR) ya da elektron paramanyetik rezonans (EPR), manyetik özellikleri incelemek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, paramanyetik maddelerdeki elektron spinlerinin manyetik alanla etkileşimini inceler.

Gradyan Manyetik Kuvvetin Etkisi

Serbest Radikalin Manyetik Momenti (μ_s):

$$\mu_s = g_s \mu_B \sqrt{S \cdot (S + 1)} \quad (2.36)$$

Burada;

μ_B : Bohr magnetronu, elektronun manyetik momentini temsil eden bir sabittir.

S: Spin kuantum sayısı, elektronun spin durumunu temsil eder.

g_s : Spin g-faktörü, elektronun manyetik momentinin manyetik alana tepkisini temsil eder.

Curie Yasası ile Manyetik Duyarlılık (χ)

Manyetik duyarlılık, bir maddenin manyetik alana tepkisini ölçen bir parametredir.

Curie Yasası

$$\chi_i = \frac{N_A \cdot g_e^2 \cdot \mu_B^2 S \cdot (S + 1) \cdot \mu_0}{3 \cdot k \cdot T \cdot m_i} \quad (2.37)$$

Burada;

N_A : Avogadro sayısı, bir moldeki parçacık sayısını temsil eder.

k: Boltzmann sabiti, termal enerji ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi temsil eder.

T: Sıcaklık (Kelvin).

m: Maddenin kütlesi; μ_0 : vakum geçirgenliği, manyetik alanın vakumda yayılma kapasitesini temsil eder.

Gradyan Manyetik Kuvveti (F_i)

Gradyan manyetik alan, manyetik alanın bir bölgedeki değişimini temsil eder. Bu kuvvet, manyetik alan gradyanı nedeniyle maddelere etki eder.

Gradyan Manyetik Alanın Kuvveti

$$F_i = \left(\frac{1}{2} \cdot \mu_0\right) \cdot \rho \cdot Y_{ixi} \cdot (B^2) \quad (2.38)$$

Burada;

ρ : Yoğunluk (kg/m³).

∇B^2 : Manyetik indüksiyon yoğunluğunun kare gradyanı, manyetik alanın uzaydaki değişimini temsil eder.

χ_i : Maddenin hacim manyetik duyarlılığı.

Manyetik ve Yerçekimsel Kaldırma Kuvvetleri

Bu kuvvetler, manyetik alan ve yerçekimi alanı altında maddenin hareketini etkiler.

Manyetik Alan Kaldırma Kuvveti (π_m)

$$\pi_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot (X - X_0) \cdot \nabla B^2 \quad (2.29)$$

Burada;

χ : Maddenin manyetik duyarlılığı.

χ_0 : Referans manyetik duyarlılık.

μ_0 : Vakum geçirgenliği.

Yerçekimsel Kaldırma Kuvveti (π_g)

$$\pi_g = (\rho - \rho_0) \cdot g \quad (2.40)$$

Burada; ρ_f : Sıcak (alev) gazların yoğunluğu (kg/m³)

ρ : Ortamın yoğunluğu (kg/m³).

g : Yerçekimi ivmesi (N/kg).

Manyetik Alan Grashof Sayısı (G_{rM})

Bu sayı, manyetik alan kaldırma kuvvetleri tarafından yönlendirilen konveksiyonun gücünü ölçer.

Grashof Sayısı

$$G_{rM} = \frac{(X_f - X_0) \cdot \nabla B^2 \cdot L_f^3}{2\mu_0 \cdot \rho \cdot u^2} \quad (2.41)$$

Sonuç olarak;

$$g_m = \frac{(X_f - X_0) \cdot \nabla B^2}{2\mu_0 \cdot (\rho_0 - \rho_f)} \quad (2.42)$$

Burada;

L: Alev uzunluğu.

v: Kinematik viskozite.

Elde edilir.

Jet difüzyon alevleri için, hem kaldırma kuvveti (manyetik veya yerçekimi alanı nedeniyle ortaya çıkabilir) nedeniyle ivme hem de brülör portundan çıkan gaz nedeniyle zorlanmış hareketle ilişkili kuvvetler (momentum kuvveti) hesaba katılmalıdır. Froude sayısı (Fr) ilk jet momentum kuvvetinin kaldırma kuvvetine oranı olarak tanımlanır ve bir alevin kaldırma kuvveti mi yoksa momentum kontrollü mü olduğunu tespit etmek için kullanılır.

$$F_r = \frac{vF^2}{g \cdot d} \quad (2.43)$$

Burada;

v - yüklü bir parçacığın hızıdır.

Bileşen gazlar arasındaki yoğunluk farkları nedeniyle alev üzerinde etkili olan kaldırma kuvveti aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır. Daha sonra kaldırma kuvveti, alev

üzerindeki göreceli etki açısından manyeto kaldırma kuvveti ile karşılaştırılır. Bu, alanın yanma özelliklerini geliştirmeye yardımcı olup olmadığının belirlenmesini kolaylaştırır. Kaldırma kuvveti Boussinesq yaklaşımı ile tanımlanır ve genellikle Boussinesq yaklaşımı olarak adlandırılır.

$$F_b = (\rho_f - \rho_{air}) \cdot g \quad (2.44)$$

Burada;

ρ_{air} - ortam havasının yoğunluğu (kg/m^3).

Uygulamada ve simülasyonda, serbest bir radikal üzerindeki yerçekimi kuvveti ve manyetik alan kaldırma kuvveti, çarpışma enerjisi ve manyetik alan kuvveti altında ihmal edilebilir. Bir alevin kaldırma kuvveti göz ardı edilemez. Bir difüzyon alevi için, alevlerdeki kaldırma kuvveti atalet etkilerine göre manyetik kuvvetten kaynaklanır ve alevin uzunluğu ve genişliği kaldırma kuvveti ile ilgilidir.

Çeşitli alanlardaki uygulamalı araştırmaların genişlemesiyle birlikte, manyetik alanlar ile gaz yanması ve patlamaları arasındaki etkileşimlerin doğası ve mekanizmasının derinlemesine incelenmemesinden kaynaklanan çeşitli sorunlar yavaş yavaş ortaya çıkmıştır. Hedeflenen temel araştırma ve doğru teorik açıklama eksikliği nedeniyle, çeşitli uygulama alanlarında manyetik alanların yanma ve patlama üzerindeki etkileri üzerine yapılan birçok deneysel çalışma birbiriyle ilişkisiz hale gelmiş ve araştırma sonuçları uygulama alanları arasında referans olarak kullanılamamıştır. Bu durum, yıllar içinde çeşitli alanlardaki uygulama araştırmalarında yavaş ilerlemeye yol açmış ve sonuç olarak büyük bir teknolojik atılım gerçekleştirilememiştir.

Bu nedenle, ana odak noktası olarak gaz yanması ve patlamasında serbest radikallerin reaksiyon mekanizması ile sistematik deneyler ve temel teorik araştırmalar yapmak, serbest radikallerin ve oksijenin etki prensibini ve dış manyetik alana maruz kalan paramanyetik gaz yanması ve patlamasının anahtar maddelerini belirlemek ve yeni yöntemler oluşturmak ve çeşitli enerji alanlarında yanıcı gazların kullanım verimliliğini etkili bir şekilde artırmak ve gaz patlamasının zararlarını etkili bir şekilde önlemek için yeni bir teorik temel sağlamak büyük önem taşımaktadır.

3. BÖLÜM

DENEY SİSTEMİ

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerin tamamı, Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'ndeki Yanma Laboratuvarı'nda yer alan deney düzeneğinde yapılmıştır. Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi'ndeki Yanma Laboratuvarı'ndaki deney düzeneği, yanma süreçlerini ayrıntılı bir şekilde incelemek için oldukça donanımlı bir yapıya sahiptir. Kullanılan deney düzeneğinin temel bileşenleri ve işlevleri aşağıda ayrıntılı şekilde verilmiştir.

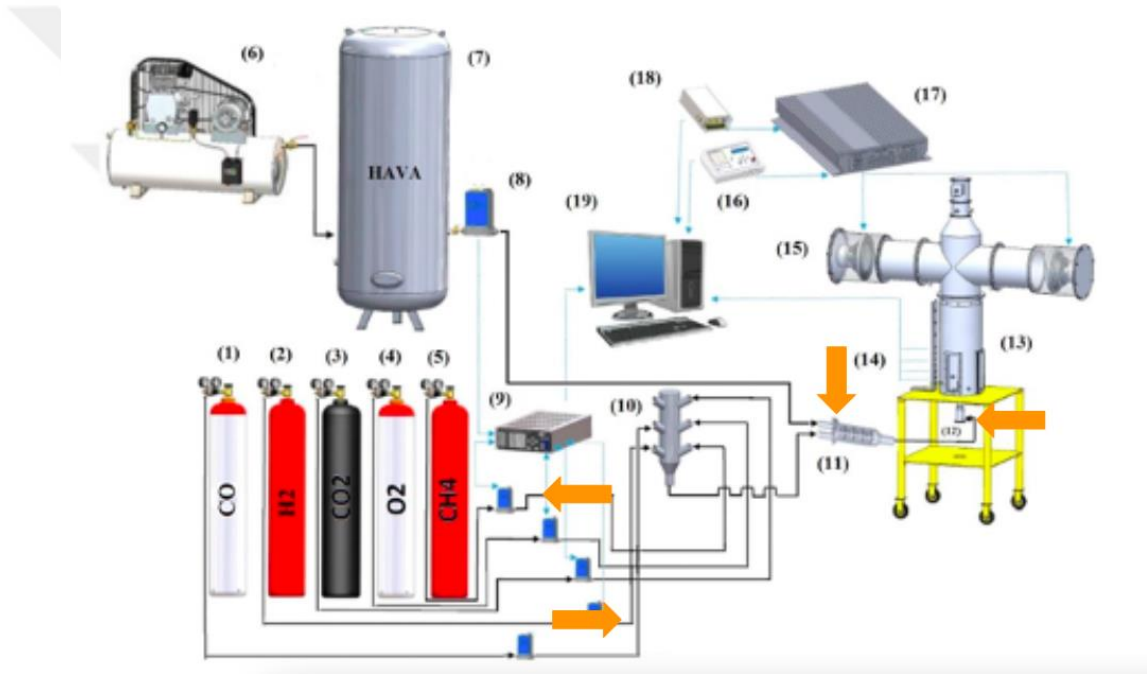
3.1. Deney Sistemi Tanıtımı

Deneysel çalışma, yanma laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, laboratuvar düzeni Şekil 3.1'de tanımlanmıştır. Deneyler sırasında kullanılan H₂, CO ve CH₄ gibi gaz yakıtlar, tüpler aracılığıyla sağlanmış; CO₂ ise seyreltici olarak işlev görmüştür. Oksijen zenginleştirme için kullanılan oksijen tankı, güvenlik amacıyla yakıt tanklarından belirli bir mesafede konumlandırılmıştır. Gazlar, tüplerden çıktıktan sonra kütle akış kontrolcülerine yönlendirilmiştir. Bu kontrolcüler, (8) numaralı vakum sistem kontrolcüsüne bağlı olarak çalışmaktadır. Yanma odasına gönderilmesi gereken gaz hacimleri, stokiyometrik yanma denklemleri temel alınarak hesaplanmış ve vakum sistem kontrolcüsüne manuel olarak girilmiştir. Bu düzenleme sayesinde, kütle akış kontrolcülerini tanklardaki gazların deney sistemine girişini anlık olarak ayarlamaktadır.

Gazlar, (10) numaralı kollektörde bir araya gelmekte ve buradan (11) numaralı karıştırıcıya iletilmektedir. Karıştırıcı, yakıt ve havanın etkili bir ön karışımını sağlar. Elde edilen karışım, (12) numaralı brülörde yanma işlemine tabi tutularak (13) numaralı yanma odasında yanmaktadır. Yanma süreci sırasında yerleştirilen çeşitli ölçüm ekipmanları aracılığıyla basınç, sıcaklık ve ışık şiddeti gibi parametreler anlık olarak ölçülmekte ve bilgisayar üzerinden kaydedilmektedir.

Yanma akustik odası ayrıca, dışarıdan uygulanan akustik zorlamalar altında yanma kararsızlıklarının incelenebilmesi özelliğine sahiptir. Gerekli frekanslar, (16) numaralı sinyal jeneratörü kullanılarak üretilir, (17) numaralı yükseltici ile güçlendirilir ve (15) numaralı hoparlörler aracılığıyla yanma odasının her iki tarafına iletilir. Bu zorlama frekansları altında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler düzenli olarak bilgisayar üzerinden izlenmektedir.

Şekil 3.1’de deney düzeneği ve neodyum mıknatısların yerleştirildiği konumlar turuncu ok işareti ile gösterilmiştir.



- | | |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1.CO Tankı | 11. Ön Karıştırıcı |
| 2.H ₂ Tankı | 12.Yakıcı |
| 3.CO ₂ Tankı | 13. Yanma Odası |
| 4. O ₂ Tankı | 14. Piezorezistif Basınç Ölçerler |
| 5. CH ₄ Tankı | 15. Hoparlörler |
| 6.Kompresör | 16. Sinyal Jeneratörü |
| 7.Hava Tankı | 17.Ses Gücü Yükseltici |
| 8.Kütle Akış Kontrolcüler | 18.Osiloskop |
| 9.Vakum Sistem Kontrolcüsü | 19.Bilgisayar |
| 10.Kollektör | |

Şekil 3.1. Deney Sistemindeki Elemanlar Aşağıda Açıklanmıştır.

Şekil 3.2, deney sisteminin ön görünümünü detaylandırmaktadır. Deney dışı durumlar göz önünde bulundurularak, herhangi bir yanlışlıkla tepkimeye girip patlama riskini önlemek amacıyla, O₂ dahil diğer tanklardaki yakıtlar, deney sistemi ile aynı ortamda

güvenli bir şekilde saklanmıştır. Bu düzenleme, olası reaktif karışımların kontrolsüz bir şekilde birleşmesini ve bunun sonucunda oluşabilecek patlamaları engellemeyi hedeflemektedir.



Şekil 3.2. Deney sistemi ön görünüşü

3.1.1. Hava Tedarik Sistemi

Deney düzeneğinde hava tedarik sistemi iki ana bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar hava kompresörü ve harici hava tankıdır. Aşağıda alt sistemler ayrıntılı şekilde tanıtılmışlardır.

3.1.1.1. Hava Kompresörü

Yanma işlemi için kritik bir unsuru teşkil eden hava, deney düzeneklerimize bir hava kompresörü aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu kompresör, gücünü üç fazlı bir elektrik motorundan almaktadır ve 650 litre/dakika emiş kapasitesine ile 4 kW güç kapasitesine sahiptir. Kompresörün maksimum hava sağlama kapasitesi $0,65 \text{ m}^3/\text{dk}$ olup, bu kapasite yanma deneyleri için gerekenden fazlasını karşılamaktadır. Şekil 3.3'te gösterilen kompresör, stabil hava akışı sağlamak amacıyla 500 litre hacminde bir harici hava tankına bağlıdır. Bu düzenleme, deneyler sırasında kesintisiz ve güvenilir bir hava akışı temin etmek için önemlidir.



Şekil 3.3. Hava kompresörü ve tankı

3.1.1.2. Harici Hava Tankı

Deney düzeneklerimizde, kompresörün dahili tankına ek olarak, 1000 litre hacminde bir harici hava tankı mevcuttur. Bu tank, Şekil 3.4'te gösterilmiştir ve kompresör arızası ya da stabil hava sağlama ihtiyacı gibi durumlarda deney sistemine sürekli hava akışının sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Harici hava tankının varlığı, deney süreçlerinin kesintiye uğramadan devam edebilmesi için kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.4. Harici hava tankı

Konumlandırma ve Ses İzolasyonu, kompresörün yarattığı aşırı gürültüyü minimize etmek ve deney odasının sessiz kalmasını sağlamak için, kompresör ve tank özel bir kabin içerisine yerleştirilmiştir. Bu kabin şekilde verilmiş, hava tankı ve kompresörün bulunduğu dış mekânda konumlandırılmış olup, hava, kabin içerisinden çıkan borular vasıtasıyla sisteme tedarik edilmektedir.



Şekil 3.5. Kompresör ve harici tank kabini

Güvenlik Özellikleri, Harici hava tankı üzerinde yer alan basınç göstergesi, tank içerisindeki hava basıncını sürekli olarak gözlemlemek ve kontrol altında tutmak imkânı sağlar. Ayrıca, kazaları önlemek amacıyla tank üzerinde bir hava tahliye sistemi bulunmaktadır. Bu sistem, basıncın emniyetli seviyelerin üzerine çıkması durumunda fazla havanın dışarı atılmasını sağlayarak güvenliğini arttırmaktadır. Bu düzenlemeler, deneyler sırasında olası risklerin azaltılmasına katkı sağlamaktadır.

3.1.1.3. Hava Filtresi ve Basınç Regülatörü

Fonksiyon ve yerleşti, deney düzeneklerinde, hava tedarik hattının sonunda, kütle akış kontrolcüsüne hava girişi öncesinde bir hava filtresi ve basınç regülatörü konumlandırılmıştır. Şekil 3.6'da gösterilen bu filtre, atmosferden tedarik edilen havadaki kir, yağ ve diğer zararlı partiküllerin sistem içerisine girmesini önleyerek, deney düzeneğinin korunmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.6. Hava filtresi ve basınç regülatörü

Hava Filtresinin Önemi, filtre sayesinde, deney sistemine giren hava temizlenmiş olup, bu da sistem parçalarının daha uzun ömürlü olmasını ve daha az bakım gerektirmesini sağlar. Kir ve yağ partikülleri, hassas deney ekipmanlarında arızalara ve performans düşüklüklerine neden olabileceği için bu temizleme işlemi hayati önem taşır.

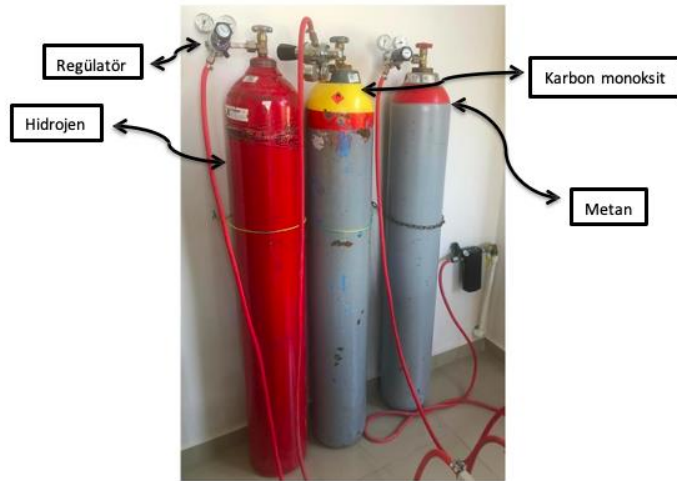
Basınç Regülatörü İşlevi, filtrenin çıkışında yer alan basınç regülatörü ise, tanktan gelen yaklaşık 10 barlık basıncı, kütle akış kontrolcülerinin zarar görmemesi için 3 bar seviyesine düşürmektedir. Bu basınç düşürme işlemi, ekipmanın hasar görmesini engelleyerek sistemin güvenliğini ve stabilitesini artırır. Regülatörün bu görevi, deneyin doğru ve güvenli bir şekilde yürütülmesinde kritik bir rol oynamaktadır.

3.1.2. Yakıt Tedarik Sistemi

Yakıt tedarik sistemi, yanma kararsızlığı deneyleri için hayati önem taşımaktadır. Aşağıda, bu sistemde kullanılan gaz yakıtların özellikleri ve konfigürasyonları detaylandırılmıştır:

Metan Gazı

- Tank Kapasitesi ve Basıncı: 50 litre hacmindeki silindirik bir tüpte, 200 bar basınç altında.
- Gaz Miktarı: Toplam 12,6 m³ metan gazı içermektedir.
- Saflık: %99,5 saflıkta metan gazı kullanılmaktadır.



Şekil 3.7. Yakıt tankları ve basınç regülatörleri

Hidrojen Gazı

- Tank Kapasitesi ve Basıncı: Yine 50 litre hacmindeki bir tüpte, 200 bar basınç altında.
- Gaz Miktarı: Toplam 8,35 m³ hidrojen gazı bulunmaktadır.
- Saflık: Metan kadar yüksek bir saflık seviyesine sahiptir.

Karbon Monoksit (CO) Gazı

- Tank Kapasitesi ve Basıncı: 40 litre hacmindeki silindirik bir tankta, 200 bar basınç altında.

- Gaz Miktarı: 7,8 m³ CO gazı içermektedir.
- Saflık: %99,99 saflıkta.

Karbon Dioksit (CO₂) Gazı

- Kullanım Amacı: Seyreltici olarak kullanılmaktadır.
- Tank Kapasitesi ve Basıncı: 50 bar basınç altında.
- Gaz Miktarı: 35 kg CO₂ gazı içermektedir.
- Saflık: %99,9 saflıkta.

Oksijen (O₂) Gazı

- Tank Kapasitesi ve Basıncı: 230 bar basınç altında.
- Gaz Miktarı: Toplam 12,05 m³ oksijen içermektedir.



Şekil 3.8. Oksijen tankı

Bu sistem, metan ve diğer gaz yakıtların karıştırılması ve oksijence zengin bir ortamda yanma kararsızlıklarının incelenmesi amacıyla tasarlanmıştır. Gazların yüksek saflık seviyeleri ve kontrol altında tutulan basınç değerleri, deneylerin doğruluk ve güvenilirliğini artırmaktadır.

3.1.2.1. Kütle Akış Kontrolcüleri

Yakıt Tedarik Sistemi ve Kontrol Mekanizmaları

Tez alışması kapsamında, farklı yakıt kompozisyonlarının oluşturulabilmesi için, brülöre girecek gazların hacimsel miktarının belirlenmesi amacıyla kütle akış kontrolcüleri kullanılmıştır. Bu kontrolcüler, şekil'3.9da gösterilen gaz akış hatları içerisinde yer almaktadır.



şekil 3.9. Gaz akış hatları

3.1.2.2. Basınç Düzenlemesi ve Gaz Akışı

Yakıt tanklarından çıkan gazlar, öncelikle bir regülatör vasıtasıyla basınçları 1,5 bar altına düşürülerek işlem güvenliğini artırır. Düşürülen basınçta gazlar, kütle akış kontrolcüleri (şekil 3.10'da gösterilmiştir)  zerinden geçerken monometreler ve şamandırallı debimetreler ile izlenir ve sonrasında kollektöre ilerler.



şekil 3.10. Kütle akış kontrolcüsü

Kütle Akış Kontrolcülerinin Özellikleri, kullanılan kütle akış kontrolcülerinin, 600 ile 30,000 sccm arasında değişen hacimsel debilerde gaz temini sağlamak üzere ayarlanabilmektedir. Hava tedarik hattında bulunan kontrolcü ise, 300 slm (standart litre/minüt) hacimsel debiye kadar hava miktarını sisteme aktarabilir. Bu, teorik olarak yanma için gereken havanın yakıtlara kıyasla hacimsel olarak çok daha yüksek olmasını göz önünde bulundurarak seçilmiştir.

3.1.2.3. Kontrol Sistemi ve Ayarlanabilirlik

Şekil 3.11'de yer alan vakum sistem kontrolcüsü, altı farklı gazın akışını kontrol edebilecek kapasiteye sahiptir. Kontrolcü üzerinde bulunan ayar tuşları ile gaz yoğunluklarına göre düzeltme faktörleri girilir, böylece hesaplanan hacimsel debiler kaydedilir ve deney sürecinde istenilen debilerde hassas bir gaz temini sağlanır. Bu sistem, yanma deneylerindeki değişken parametreleri efektif bir şekilde yönetebilmek için kritik bir öneme sahiptir.



Şekil 3.11. Vakum sistem kontrolcüsü

3.1.3. Deneylerde Kullanılan Gazların Yoğunluk ve Düzeltme Faktörleri

Tablo 3.1, deneylerde kullanılan çeşitli gazların yoğunlukları ve düzeltme faktörlerini içermektedir. Düzeltme faktörü, farklı gaz tiplerinin yoğunluklarına göre hacimsel akış hızlarını ayarlamak için kullanılan bir parametredir. Bu faktör, kütle akış kontrolcülerinin Azot (N_2) gazı referans alınarak kalibre edilmesi sonucu elde edilir. N_2 için düzeltme faktörü 1 olarak belirlenmiştir, bu standart tüm ölçümlerin bu değere göre ayarlandığını gösterir [259].

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan gazların yoğunluk ve düzeltme faktörü değerleri [259]

Gaz	Yoğunluk (g/L)	Düzeltilme Faktörü (k)
Metan	0.718	0.72
Hidrojen	0.09	1.01
Karbon Monoksit	1.251	1
Karbon Dioksit	1.964	0.70
Hava	1.293	1
Oksijen	1.427	0.993

Düzeltilme faktörleri, kütle akış kontrolcüsüne bağlı olarak değişen gazların özgül yoğunluklarına göre hacimsel akış hızlarını düzenlemek amacıyla kullanılır. Bu sayede, deneyler sırasında farklı gazlar arasında istenen oranlarda karışım sağlanabilir. Örneğin, metanın veya hidrojenin farklı yoğunluk değerlerine göre akış hızlarının düzeltilmesi gerekebilir.

3.1.3.1. Teknik Detaylar ve Kalibrasyon

Kalibrasyon işlemi, tüm gazların azot referans alınarak ölçülmesini sağlar. Bu, tüm gazların azot ile karşılaştırıldığında nasıl bir akış hızı sergileyeceğini standartlaştırır. Düzeltilme faktörünün kullanımı, deneylerin tekrarlanabilirliği ve doğruluğu açısından önem taşır çünkü her gazın yoğunluğu ve akış özellikleri farklıdır.

Bu düzenlemeler sayesinde, deneylerde kullanılan gazların hacimsel debileri doğru bir şekilde ayarlanabilir, böylece yanma reaksiyonları için optimal koşullar sağlanmış olur. Bu verilerin doğru kullanılması, deney sonuçlarının güvenilirliğini ve geçerliliğini artırır [259].

3.1.4. Yakıt ve Seyrelticilerin Akış ve Karışım Süreci

3.1.4.1. Yakıt Akışı ve Karışım Dinamikleri

Deney düzeneklerinde, farklı yakıtlar ve seyrelticiler ile oksijen, önceden belirlenen ve kütle akış kontrolcülerinde hesaplanan debilerde ilerlemektedir. Bu gazlar, Şekil 3.12'de gösterilen yakıt kollektörüne yönlendirilir. Kollektörde, hava ile karışmadan önce, yakıtlar kendi aralarında bir ön karışım gerçekleştirmektedir.



Şekil 3.12. Yakıt kollektörü

Kollektör, farklı gazların ilk karışımını sağlayan kritik bir bileşendir. Bu birim, hava ile karıştırılmadan önce gazların homojen bir şekilde karışmasını sağlayarak, yanma odasına gönderilmeden önce istenen kimyasal oranların elde edilmesine yardımcı olur. Bu ön karışım süreci, yanma verimliliğini ve deneyin kontrolünü artırır.

Yakıt kollektörü, genellikle çoklu giriş portlarına sahip bir yapıda olup, her bir gaz için ayrı girişler mevcuttur. Bu sayede, farklı gazlar kollektör içerisinde etkili bir şekilde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir. Ayrıca, bu birimin tasarımı, gazların karışım oranlarını ve akış hızlarını deneyin gereksinimlerine göre ayarlamak için özel olarak düzenlenebilir.

Bu süreç, yanma odasına giren gaz karışımının kalitesini doğrudan etkiler. İyi bir ön karışım, yanma işlemi sırasında daha stabil ve kontrollü bir alev oluşumunu destekler, böylece yanma verimliliği artar ve yanma sırasında oluşabilecek istenmeyen emisyonların azaltılmasına katkıda bulunur. Bu aşamaların doğru şekilde yürütülmesi, deneyin başarıyla tamamlanmasında önemli bir faktördür.

3.1.5. Ön Karışım ve Ön Karışım Sız Yanma Sistemleri

3.1.5.1. Yanma Sistemlerinin Türleri ve Karşılaştırması

Yanma sistemlerinde iki ana tip yakıcı bulunmaktadır: ön karışım sız ve ön karışım lı. Bu iki sistem arasındaki temel fark, yakıt ve havanın karışım şeklidir.

1. Ön Karışimsız Yanma:

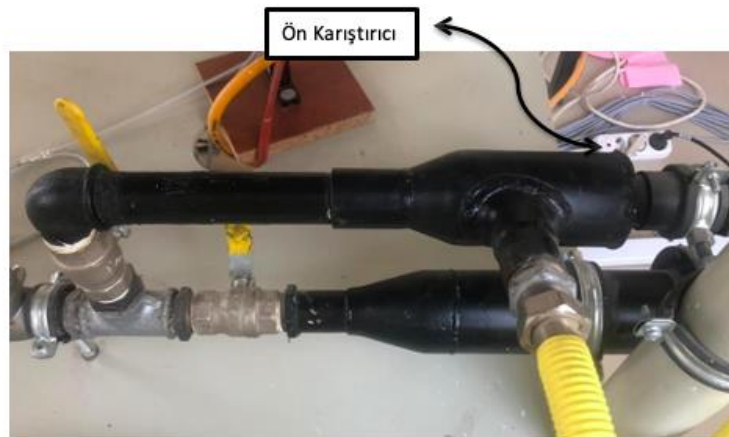
- Yakıt ve hava, yanma odasında karışır.
- Adyabatik alev sıcaklığı daha yüksektir.
- Bu yüksek sıcaklık, yakıcı duvarlarında dinamik basınç dalgalanmalarına ve yanma kararsızlıklarına yol açar.

2. Ön Karışimli Yanma:

- Yakıt ve hava, brülöre girmeden önce bir noktada homojen bir şekilde karışır.
- Adyabatik alev sıcaklığı daha düşük tutulur, bu da dinamik basınç dalgalanmalarını ve yanma kararsızlıklarını minimize eder.
- Düşük alev sıcaklığına rağmen, yanma odası çıkışındaki türbine giriş sıcaklığı ön karışimsız sistemle aynı seviyededir [260].

3.1.5.2. Ön Karıştırıcı Mekanizması

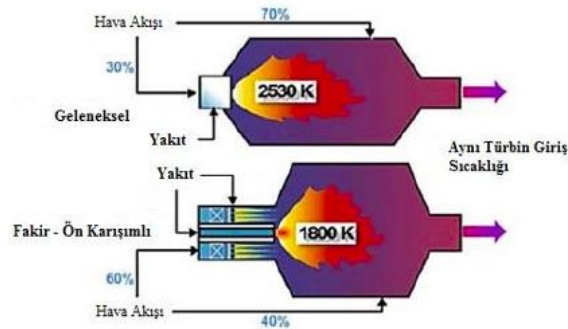
Şekil 3.13 'te gösterilen deneylerde kullanılan ön-karıştırıcı, karışımın homojenliğini sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu ön karıştırıcıya kollektörden gelen gazlar ve kompresörden sağlanan hava, farklı hatlardan gelmektedir. Sabit kanatçıklı ve delikli diskler kullanılarak bu gazlar ve hava, etkili bir şekilde karıştırılır ve homojen bir karışım elde edilir [260].



Şekil 3.13. Ön karıştırıcı

3.1.5.3. Görsel Karşılaştırmalar ve İşlevsellik

Şekil 3.14, geleneksel yanma mekanizması ile ön karışıklı bir yakıcının şematik gösterimini karşılaştırmaktadır. Bu karşılaştırma, ön karışıklı sistemlerin yanma kararsızlıklarını nasıl azalttığını ve yüksek verimlilikte yanmayı nasıl sağladığını açıkça göstermektedir. Ön karıştırıcılar, yanma sistemlerinde stabiliteyi artırarak daha verimli ve kontrollü yanma süreçleri sunar [260].



Şekil 3.14. Geleneksel yanma ve ön karışıklı yanmanın karşılaştırması [260]

3.1.6. Girdap Destekli Yakıcı Tanımı ve Özellikleri

Ön karışıklı yanma deneylerinde kullanılan brülör, yanma işleminin gerçekleştiği ana bileşendir. Şekil 3.15'te gösterilen bu yakıcı, maksimum 10 kW ısı güce sahip olup, yüksek sıcaklıklara dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Brülör, saf metan yanmasını stabil bir şekilde gerçekleştirebilirken, CO ve H₂ gibi gazlar içeren sentetik gaz ve biyogaz karışımlarını da farklı çalışma aralıklarında etkin bir şekilde yakabilir.



Şekil 3.15. Brülör

Yakıcı Tasarımı ve Üretimi, bu çeşitliliği sağlayabilmek için Yılmaz et al. tarafından termo-akustik yanma deneyi sistemlerinde kullanılan yakıcılardan esinlenerek yeni bir brülör tasarlanmış ve imal ettirilmiştir [261]. Bu tez çalışmasında tüm yanma deneyleri sabit 3 kW yakıcı gücü ile yapılmıştır, bu da deneylerin standartlaştırılmasını sağlar.

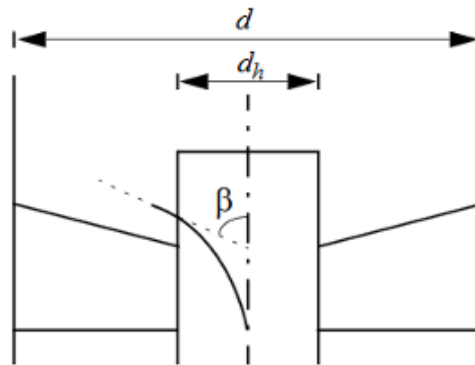
3.1.6.1. Girdap Üreteçleri ve İşlevleri

Yakıcının bir diğer önemli özelliği, çıkışında bulunan yuva sayesinde farklı girdap sayılarında girdap üreteçleri tarafından desteklenebilir olmasıdır. Bu girdap üreteçleri, kolayca değiştirilebilir yapıda imal edilmiştir. Namlu ucundaki üreteçler çıkarılabilir veya farklı girdap sayıları, çap oranları ve kanatçık açılarındaki üreteçlerle değiştirilebilir.

Girdap Üreteçlerinin Rolü, girdap üreteçleri, yakıt/hava karışımının daha homojen hale gelerek yanmasını sağlamak ve yanma kararsızlıklarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır [68]. Girdap sayıları, Denklem 3.1’de verilen ifade ile hesaplanmakta olup, bu ifadede d : dış çapı, d_h : iç çapı, β : kanatçıkların açısını temsil etmektedir [262]. Deneylerde kullanılan girdap üreticinin d_h/d oranı 0,5 ve kanatçık açıları ise $52,12^\circ$ olarak sabitlenmiştir. Denklem 3.1.deki hesaplamaya göre girdap sayısı tüm deneylerde 1 olarak kullanılmıştır.

$$S = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_h}{d}\right)^2} \right) \cdot \tan \beta \quad (3.1)$$

Şekil.3.16’de girdap üreticinin ölçülendirme kriterleri gösterilmiştir.



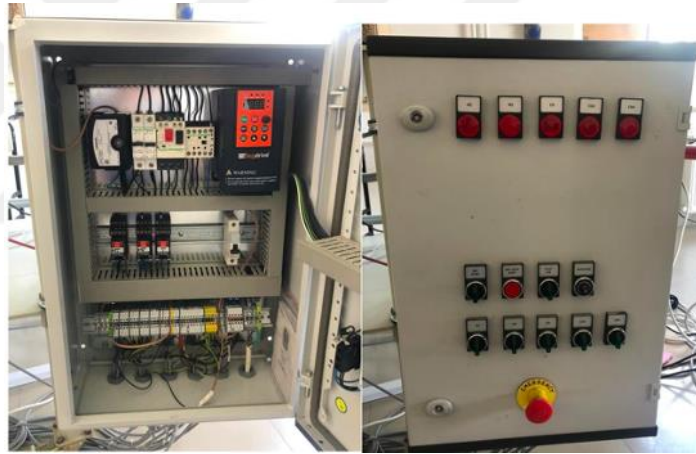
Şekil 3.16. Girdap üretici ölçülendirme kriterleri [262]

Bu yaklaşım, yanma sürecini optimize etmek ve yanma kararsızlıklarını minimize etmek için kritik bir strateji sunar, böylece daha stabil ve etkin bir yanma süreci elde edilmektedir.

3.1.7. Yakıcı Ateşleme Sistemi

3.1.7.1. Kontrol Panosunun Yapısı ve İşlevi

Yakıcının ilk ateşlemesi ve gaz geçişlerinin kontrolü için yanma odası yanında özel bir kontrol panosu kurulmuştur. Şekil 3.17’de gösterilen bu panel, iç ve dış yapılarını belirtir şekilde tasarlanmıştır. Bu panel aracılığıyla ateşleme işlemi otomatik olarak sağlanmakta, ayrıca panel içerisinde yer alan iyonizasyon çubuğu, yanma odası çevresindeki soğutucular ve gaz besleme hatlarını kontrol edebilen çeşitli ekipmanlar bulunmaktadır.



Şekil 3.17. Kontrol paneli iç ve dış görünüşü

3.1.7.2. Brülör Otomatığı ve Güvenlik Özellikleri

Panelde bulunan, Şekil 3.18’de gösterilen Siemens LME41.054C2 brülör otomatığı ile ateşleme işlemi gerçekleştirilmekte ve yakıcıya gaz temini sağlanmaktadır [263]. Brülör otomatığı, iyonizasyon çubuğunu da kontrol eder. Bu çubuk, alevin sönmesi veya geri tepme durumlarında cihazın durumunu algılar ve güvenlik amacıyla gaz temin hattını hızla kapatır. Bu özellik, ön karışimli yakıtların oksijenle karıştıktan sonra patlama riskini engeller. Brülör otomatığı, kolay bakım ve olası arızalar için çıkarılıp değiştirilebilir şekilde tasarlanmıştır.



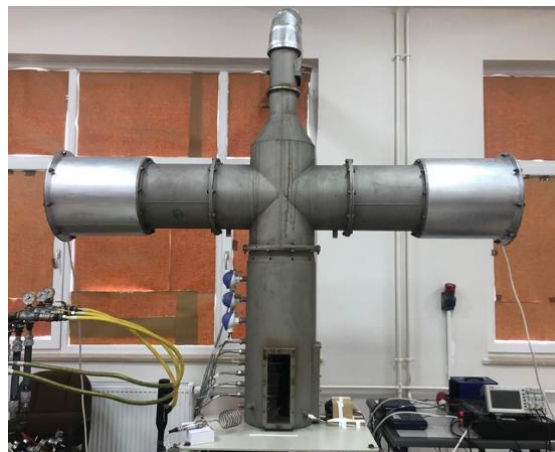
Şekil 3.18. Brülör otomatığı [263]

İlk Ateşleme ve Pilot Alev, ilk ateşleme sırasında, yakıtların hatlardan brülöre ulaşmasını beklerken, pilot alevin sağlanması için LPG tankından gelen gaz kullanılmaktadır. Bu pilot alev, yakıtların brülöre ulaşarak kararlı bir alev oluşturmasını sağladıktan sonra kapatılan LPG tankı aracılığıyla sağlanır. Bu süreç, yanma odasının başlangıç aşamasında güvenliği artırır ve stabil bir ateşleme sağlar.

Bu kontrol panosu ve ilgili bileşenlerin entegrasyonu, yanma deneylerinin güvenli ve etkin bir şekilde yürütülmesine olanak tanır, böylece deney sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği artırılmış olur.

3.1.8. Yanma Odası Tasarımı ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan yanma odası, 1650 mm uzunlukta olup dış çapı 330 mm, iç çapı ise 320 mm'dir. Şekil 3.19'de gösterilen yanma odası, ısıya dayanıklı paslanmaz çelikten üretilmiştir, bu malzeme yüksek sıcaklıklara karşı mukavemet sağlar.

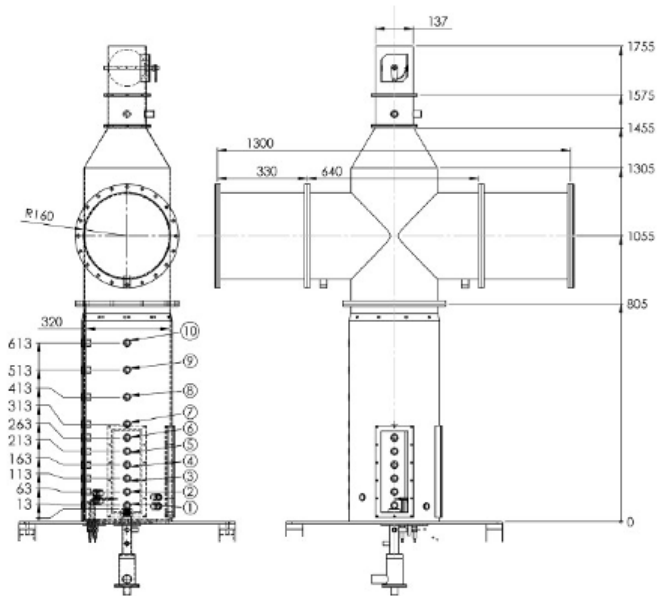


Şekil 3.19. Yanma akustik oda

Ölçüm Girişleri ve Gözlem Özellikleri, yanma odasının çevresinde, deney sırasında gereken verilerin alınabilmesi için çeşitli girişler bulunmaktadır. Bu girişlere, basınç ve sıcaklık değerlerinin anlık olarak ölçülebildiği donanımlar yerleştirilmiştir. Etrafta 10, bacadaysa 1 olmak üzere toplam 11 ölçüm yuvası bulunur ki bu yuvalar emisyon ölçümleri için kullanılmaktadır. Ayrıca yanma odasının ön ve yan kısımlarında, alevin gözle izlenebilmesi ve ışık şiddeti değerlerinin ölçülebilmesi amacıyla iki adet temperli cam yer almaktadır. Bu camlar, yanma esnasında oluşabilecek arızalara hızlı müdahale edebilme imkânı sağlayacak şekilde kolayca sökülüp takılabilir yapıda üretilmiştir.

Modüler Yapı ve Bakım Kolaylığı, yanma odası, tamamen sökülmeden yakıcı namlusunda takılı olan girdap üreteçlerinin değiştirilmesine ve bozulan iyonizasyon çubuklarının yenilenmesine olanak tanıyan modüler bir tasarıma sahiptir. Bu özellik, deneyler sırasında hızlı adaptasyon ve arıza giderme süreçlerini kolaylaştırır.

Kulakçıklar ve Akustik Zorlama, Şekil 3.20 'de verilen geometrik ölçülere göre, yanma odasının uzunlukları geçici bağlantı elemanları ile monte edilmiş kulakçıklar sayesinde uzatılmaktadır. Dıştan akustik zorlama frekansları altında yapılan deneyler, bu kulakçıklara yerleştirilen hoparlörler vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Kulakçıklar, hoparlörleri yanma bölgesinden uzaklaştırarak yüksek ısıdan dolayı deforme olmasını engellemektedir.



Şekil 3.20. Yanma odası teknik resmi [53]

Bu detaylar, yanma odasının tasarımının hem işlevsellik hem de güvenlik açısından nasıl optimize edildiğini gösterir, böylece deneyler sırasında verimlilik ve güvenlik maksimum düzeyde sağlanmaktadır.

3.1.8.1. Dıştan Akustik Zorlama Ekipmanları

Bu bölümde dıştan akustik zorlama frekanslarının sağlanabilmesi için kullanılan ekipmanlar açıklanmıştır.

Fonksiyon Jeneratörü

Sunulan tez çalışmasının literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılan ve özgünlüğünü oluşturan en önemli özellik, sistemini dıştan akustik zorlamalar altında çalıştırabilme yeteneğidir. Bu özellik, yanma dinamiklerini farklı akustik frekanslar altında incelemek için olanak tanır, bu da yanma süreçlerinin daha detaylı anlaşılmasına ve optimizasyonuna katkı sağlar.

Fonksiyon Jeneratörü ve İşlevi, çalışmada, 0,5 Hz'den 5 MHz'e kadar geniş bir aralıkta sinyal üretebilen bir fonksiyon jeneratörü kullanılmıştır. Şekil 3.21'de gösterilen bu jeneratör, sabit 5 V genlikte sinüs dalgaları üreterek sistemin farklı frekans değerlerinde zorlama altında çalışmasını sağlamaktadır. Bu geniş frekans aralığı, yanma odasındaki farklı yanma kararsızlıkları senaryolarını simüle etmek ve bunların üzerinde çalışmak için kritik önem taşır.



Şekil 3.21. Fonksiyon jeneratörü

Teknik Detaylar ve Etkiler, jeneratörün sağladığı sinüs dalgaları, yanma odasına akustik dalgalar şeklinde iletilir. Bu dalgalar, yanma odası içerisindeki gazların hareketini ve dolayısıyla alevin dinamiklerini etkiler. Akustik zorlama, özellikle yanma kararsızlıklarını tetikleyebilen veya bastırabilen bir faktör olarak işlev görür, bu da yanma verimliliği ve emisyonlar üzerinde doğrudan etkiye sahiptir.

Araştırma ve uygulamalar, bu tür bir ayarın kullanılması, araştırmacılara yanma sürecinin fiziksel ve kimyasal mekanizmalarını daha iyi anlama imkanı sunar. Akustik zorlama kullanımı, özellikle gaz türbinleri, jet motorları ve endüstriyel yanma sistemlerindeki performansı artırma potansiyeline sahiptir.

Kuvvetlendirici ve İşlevi

Tez çalışmasında kullanılan fonksiyon jeneratöründen elde edilen sinüs dalgalanmalarının, istenilen akustik zorlama şartlarını sağlamak için yeterli güce ulaşması gerekmektedir. Bu amaçla, Şekil 3.22'te gösterilen bir kuvvetlendirici kullanılmaktadır. Behringer Europower marka EP4000 serisi sinyal kuvvetlendirici, girişteki sinyalleri 20 Hz – 20 kHz frekans aralığında güçlendirerek yanma odasına iletilmek üzere yükseltmektedir.



Şekil 3.22. Kuvvetlendirici

Kuvvetlendirici Özellikleri, Behringer Europower EP4000, 88x483x402 mm boyutlarında olup, 4 kW güç kapasitesi ile çalışmaktadır. Bu kuvvetlendirici, fonksiyon jeneratöründen gelen düşük güçlü sinyalleri alıp, bu sinyalleri yanma odasındaki hoparlörler aracılığıyla uygulanacak akustik zorlama için gerekli seviyeye çıkarmaktadır.

Akustik Zorlama Süreci ve Yanma Odası Uygulamaları, Kuvvetlendirilmiş sinyaller, yanma odasındaki hoparlörler aracılığıyla doğrudan akustik zorlama olarak kullanılır. Bu

zorlama, yanma odası içerisindeki alev ve gaz dinamiklerini etkileyerek, yanma sürecinin kontrol altında tutulmasına ve yanma kararsızlıklarının incelenmesine olanak tanır. Akustik zorlama, özellikle yanma verimliliği ve emisyon kontrolü üzerinde önemli bir etki yapar ve bu sayede daha temiz yanma teknolojileri geliştirmek için kullanılır.

Kuvvetlendirici, yüksek güç ihtiyacı gerektiren akustik zorlama şartlarını sağlamada kritik bir role sahiptir ve fonksiyon jeneratörü ile birlikte çalışarak yanma odasında gerekli akustik dalgaların üretilmesini ve uygulanmasını mümkün kılar. Bu tür teknik donanımlar, tez çalışmasının akustik zorlama ile ilgili deneysel testlerinin başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdir.

3.1.8.2. Osiloskop İşlevi ve Yapısı

Deneylerde kullanılan osiloskop, Şekil 3.23'te gösterilmiştir. Osiloskop, kuvvetlendiriciden çıkan ve hoparlörlere iletilmek üzere olan ses dalgalanmalarının faz farklarını takip etmek için kullanılır. Bu cihaz, iki ayrı hoparlöre gönderilen ses frekansları arasındaki faz farklarını belirleyerek, bu farkların dinamik basınç dalgalanmaları üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.23. Osiloskop

Faz Farklarının Etkisi ve Yanma Dinamikleri, Hoparlörler arasındaki ses frekanslarında oluşan faz farkları, yanma odasındaki dinamik basınç dalgalanmalarının tutarlı sonuçlar vermemesine neden olabilir. Bu faz farkları, farklı yanma tiplerinde meydana gelebilecek alev kararsızlıklarını yorumlamada önemli bir rol oynar. Özellikle dinamik basınç dalgalanmaları, alev kararsızlıklarının anlaşılması ve kontrol edilmesinde temel bir kriter olarak kabul edilir.

Osiloskopun Kritik Rolü, Osiloskop, kuvvetlendiriciden hoparlörlere iletilen ses dalgalanmalarını görselleştirerek, bu dalgalanmaların faz ve frekanslarını doğru bir şekilde izlemeyi sağlar. Bu takip, dinamik basınç dalgalanmalarını ve alev kararsızlıklarını daha iyi anlamak için elzemdir. Ayrıca, osiloskop vasıtasıyla elde edilen veriler, deneyin yönlendirilmesi ve yanma odasında gerçekleştirilecek ayarlamalar için kritik bilgiler sağlar.

Deneylerdeki Kullanımı, Deneylerde osiloskop kullanımı, akustik zorlama şartları altında yapılan testlerde faz farklarını ve diğer önemli akustik parametreleri kontrol etmek için esastır. Bu kontrol, yanma odasında istenilen akustik koşulların sağlanmasına ve alev dinamiklerinin optimizasyonuna yardımcı olur. Osiloskop sayesinde, deneyler daha doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar üretebilmekte, yanma verimliliği ve güvenliği artırılmaktadır.

3.1.8.3. Akustik Zorlama için Hoparlör Kullanımı

Yanma akustik odasında alevi farklı frekanslarda zorlamak için, yakıcı kollarına monte edilmiş iki adet Pioneer marka hoparlör kullanılmıştır. Bu hoparlörler, sinyal jeneratöründen çıkan ve kuvvetlendirici tarafından güçlendirilen sinüs dalgalarını ses dalgası formuna dönüştürmektedir. Sonuç olarak, bu ses dalgaları alev üzerinde farklı frekanslarda zorlamalar yapmaktadır.

- Güç: Her bir hoparlör 1400 W gücünde çalışmaktadır.
- Hassasiyet: 95 dB hassasiyete sahiptir.
- Empedans: 4 ohm empedans değerine sahiptirler.
- Bobin Yapısı: Her hoparlör, iki adet alüminyum bobine sahiptir.
- Çap: Hoparlörlerin çapı 30,48 cm (12 inç) olarak belirtilmiştir.

Hoparlör Yerleşimi ve Etkisi, Hoparlörler, yanma odasının yan kollarına monte edilmiş, çıkarılabilir kapaklara sahip kulakçıklarda yer almaktadır. Şekil 3.24'te gösterilen bu yerleşim, hoparlörlerin yanma odasına yönelik etkilerini optimize etmek amacıyla tasarlanmıştır. Bu düzenleme, akustik dalgaların alev üzerindeki etkilerinin homojen ve kontrol edilebilir olmasını sağlar.



Şekil 3.24. Hoparlör

3.1.8.4. Akustik Zorlamanın Önemi

Akustik zorlama, alev dinamikleri üzerinde kontrol sağlamak ve potansiyel yanma kararsızlıklarını incelemek için kullanılır. Hoparlörlerden çıkan ses dalgaları, yanma odasındaki alevin davranışlarını etkileyerek, yanma süreçlerinin daha iyi anlaşılmasını ve geliştirilmesini sağlar. Ayrıca, bu teknik, yanma verimliliğini artırma ve emisyonları azaltma potansiyeline sahiptir.

Yüksek güçlü ve hassas hoparlörlerin kullanımı, yanma akustik odasında etkili bir akustik zorlama sağlayarak, deneylerin başarısında önemli bir rol oynar. Bu, özellikle yüksek enerji gerektiren yanma sistemleri ve endüstriyel uygulamalar için kritik önem taşıyan bir araştırma ve geliştirme aracıdır.

3.2. Ölçüm Ekipmanları

Deneylerde kullanılan ölçüm ekipmanları bu kısımda açıklanmıştır.

3.2.1. Alev Kararlılığı Ölçüm Ekipmanları

Genel Bakış, Metan içerikli yakıt karışımlarının yanma kararsızlıkları ve emisyon değerleri incelenirken kullanılan ekipmanlar, verilerin toplanması, depolanması ve analizi için kritik öneme sahiptir. Bu ekipmanlar dört ana grupta sınıflandırılabilir: Sıcaklık, ışık şiddeti, emisyon ve basınç ölçümleri.

3.2.1.1. Veri Toplama ve İşleme

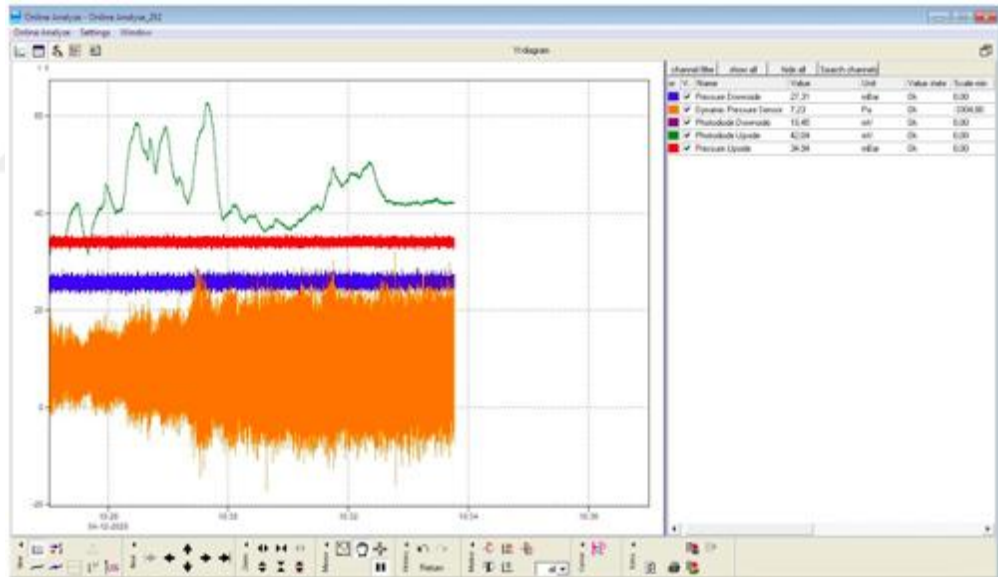
1. Veri Toplayıcılar:

Expert Key marka, 29 adet giriş kanallı veri toplayıcılar kullanılmaktadır. Bu cihazlar, yanma odası etrafında yer alan ölçüm ekipmanlarından gelen verileri toplar (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. Giriş kanallı veri toplayıcı

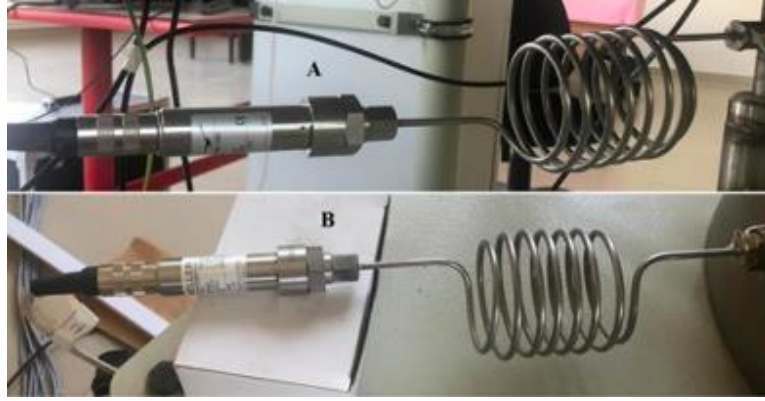
Toplanan veriler, ProfiSignal isimli yazılım ile bilgisayara aktarılarak grafiksel olarak işlenir.



Şekil 3.26. ProfiSignal ekran görünümü

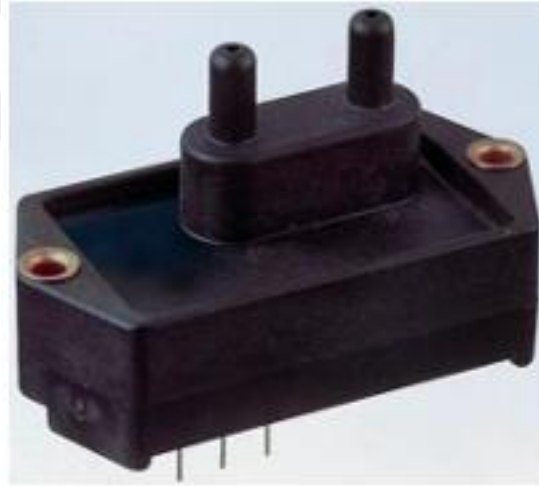
2. Basınç Ölçümleri:

Statik Basınç Ölçerler: Piezorezistif basınç ölçerler, alev bölgesinde ve yakıcı etrafında bulunarak statik basıncı ölçer. Keller marka bu ölçerler, 0 ila 10 bar arası hassasiyetle çalışır (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Piezorezistif basınç ölçerler a) Yakıcı, b) Alev

Dinamik Basınç Sensörleri: Honeywell marka dinamik basınç sensörleri, akustik zorlamalar altında alevde meydana gelen değişimleri tespit eder. Bu sensörler, ± 622 Pa hassasiyetle ölçüm yapar (Şekil 3.28).

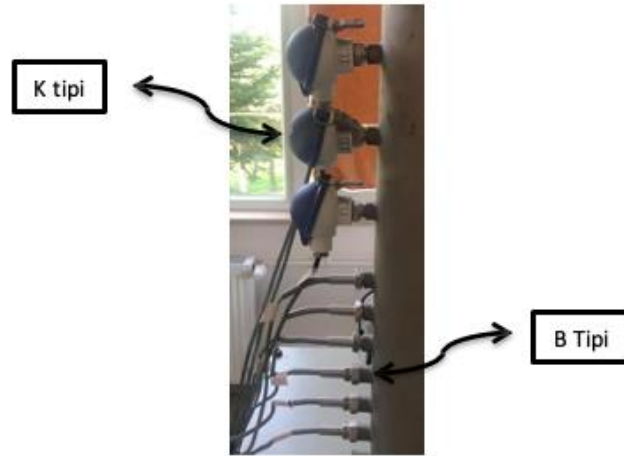


Şekil 3.28. Dinamik Basınç Sensörü

3. Sıcaklık Ölçümleri:

K Tipi Termal Çiftler: Krom-nikel alaşımlı, 1200 °C'ye kadar ölçüm yapabilen termal çiftlerdir.

B Tipi Termal Çiftler: 1800 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen termal çiftler, alev bölgesine yakın bölgelerde kullanılır (Şekil 3.30).



Şekil 3.29. Termal çiftler

4. Işık Şiddeti Ölçümleri:

Thorlabs marka PDA36A-EC serisi fotodiyotlar, yakıcı ve alevin ışık şiddetini anlık olarak ölçebilmekte ve yakıt karışımlarındaki değişimlerin ışık şiddetine etkisini inceleyebilmektedir (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Optik dedektör

5. Analiz ve Yorumlama

Bu ölçüm cihazları ve teknikleri, yanma süreçlerinin çeşitli yönlerini derinlemesine anlamak ve kontrol etmek için kullanılmaktadır. Özellikle yanma kararsızlıklarının ve emisyon değerlerinin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için bu ekipmanların sağladığı veriler büyük önem taşır. Ekipmanların veri toplama ve işleme kapasiteleri, deney sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini artırırken, çeşitli yanma fenomenlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlar.

6.Emisyon Ölçüm Ekipmanları

Deneylerde kullanılan emisyon ölçüm cihazı, Nova Plus marka olup, Şekil 3.31’de gösterilmiştir. Bu cihaz, yanma odasının farklı bölgelerinden ve baca kısmından alınan emisyon değerlerini ölçmede kullanılmaktadır.



Şekil 3.31. Emisyon cihazı

3.2.1.2. Kapasiteler ve Kalibrasyonlar

1. Ölçüm Aralığı:

Nova Plus emisyon ölçüm cihazı, O₂ (oksijen), CO₂ (karbon dioksit), CO (karbon monoksit), NO_x (azot oksitleri) ve SO₂ (kükürt dioksit) dahil olmak üzere bir dizi gazı ölçebilir. Emisyon cihazının ölçüm hatası aralıkları Tablo 3.2’de verilmiştir [264].

Tablo 3.2. Emisyon Cihazı Ölçüm Hata Oranları [264]

Ölçüm Hataları	
O ₂	±0,2%
CO ₂	±0,3%
CO	±10 ppm
NO _x	±5 ppm
SO ₂	±5 ppm

2. Kalibrasyon:

Doğal gaz yanması için kalibre edildiğinde, cihaz aynı zamanda yanma verimliliğini ve fazlalık hava yüzdesini tespit edebilmektedir. Bu kalibrasyon, yanma süreçlerini optimize etmek ve zararlı emisyonları azaltmak için çok önemlidir.

Yanma Çalışmalarındaki Önemi

1. Kapsamlı Emisyon Analizi:

Birden fazla gazı ölçme yeteneği sayesinde, cihaz çevresel uyumluluk ve yanma kimyasının daha iyi anlaşılması için gerekli olan kapsamlı bir emisyon analizi sağlar.

2. Verimlilik ve Güvenlik:

Yanma verimliliğini ve fazlalık havayı belirlemek, enerji verimini maksimize ederken emisyonları minimize etmek için yanma sürecinin hassas bir şekilde ayarlanmasına yardımcı olur. Bu kalibrasyon, özellikle verimlilik doğrudan operasyonel maliyetler ve çevresel etki üzerinde etkili olduğu endüstriyel uygulamalar için önemlidir.

3. Araştırma ve Geliştirme Uygulamaları:

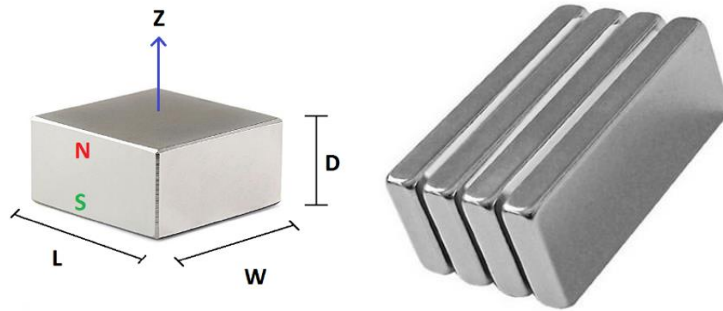
Akademik ve endüstriyel araştırma ortamlarında, bu tür bir cihaz, farklı yakıt karışımlarının ve yanma koşullarının emisyonlar üzerindeki etkilerini detaylı olarak incelemeyi sağlar. Bu hem daha verimli hem de daha az kirletici yakıt teknolojileri ve yanma sistemleri tasarımında yenilikler yapılmasına yol açabilir.

Nova Plus emisyon ölçüm cihazı, çeşitli emisyonları doğru ve güvenilir bir şekilde ölçerek deneysel düzenek için hayati bir rol oynamaktadır. Bu veriler, çevresel düzenlemelere uyum sağlamanın yanı sıra, yanma teknolojilerini geliştirmeyi amaçlayan araştırmalar için de hayati öneme sahiptir.

3.3. Deneysel Parametreler

Mevcut araştırma, girdap destekli ön karışimli bir brülör bağlamında gerçekleştirilmiştir. Deneyde sabit bir girdap sayısı (1) korunmuştur. Yakıt karışımını test etmek için 0,7'lik sabit bir eşdeğerlik oranı ve 3 kW'lık termal güç korunurken yağsız yanma koşulları kullanılmıştır. Mevcut araştırma, manyetik alan etkisi altında iki farklı alevdeki

değişikliklerin gözlemlenmesini içermektedir. Metan yanmasının alev özellikleri ve emisyonları, değişen akustik frekansların uygulandığı bir dizi deneyde incelenmiştir. Daha sonra, brülörün girişinin yanı sıra ön karıştırıcı ve metan besleme hattı MFC'nin çıkışlarında manyetik alan kuvvetlerinin üretimi başlatılmıştır. Daha sonra bu manyetik alan kuvvetlerinin yanma kararsızlığı ve emisyonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tablo 2'de emisyon ölçüm cihazının markası ve modeli verilmiştir. Saf metan kullanılarak yapılan deneylerin tamamlanmasının ardından, metana hacimsel olarak %30 H₂ eklenerek %70 CH₄ ve %30 H₂'den oluşan bir yakıt karışımı oluşturulmuştur. Manyetik alan yokluğunda yakıt kombinasyonunun performansını değerlendirmek için deneyler yapılmıştır. Daha sonra, özellikle brülör girişi, ön karıştırıcı ve metan besleme hattı MFC çıkışları hedef alınarak, saf metan ile yapılan testlerde manyetik alan manipülasyonu uygulanmıştır. Ayrıca, karışımda hidrojen bulunması nedeniyle manyetik alanın hidrojen besleme hattı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Manyetik alan olgusu, Şekil 3.32'de gösterildiği gibi dört adet sağlam neodimyum mıknatıs kullanılarak oluşturulmuştur. Mıknatıslar N35 kalite derecesine sahiptir ve her biri 33 ila 36 MGOe arasında değişen bir enerji üretim gücü sergilemektedir. N35 neodimyum mıknatısların boyutları 40 mm uzunluk, 20 mm genişlik ve 10 mm kalınlıktır. Mıknatıs gücü şu formülle hesaplanır Mıknatıs gücü şu formülle hesaplanır [265]



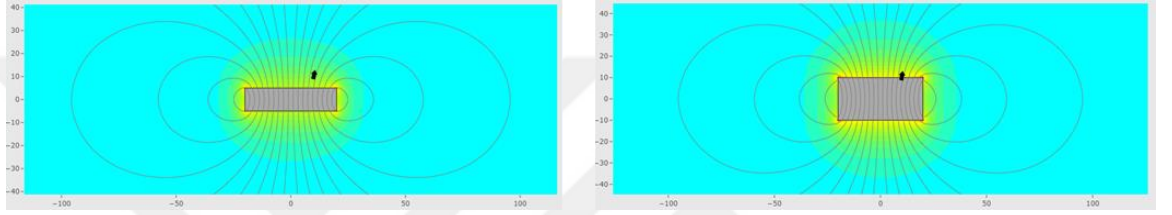
Şekil 3.32. N35 Neodim Mıknatıslar

- B_r = Mıknatıs geometrisinden bağımsız kalıcı alan ($B_r=1.25$ T)
- Z = Simetri ekseninde bir kutup yüzeyinden olan mesafe ($Z=0$ mm)
- L = Blok Uzunluğu (tam olarak 20 mm)
- W = Blok Genişliği (tam olarak 40 mm)
- D = Blok Kalınlığı (tam olarak 10 mm)

Mıknatıs gücü bu formülle hesaplanır..

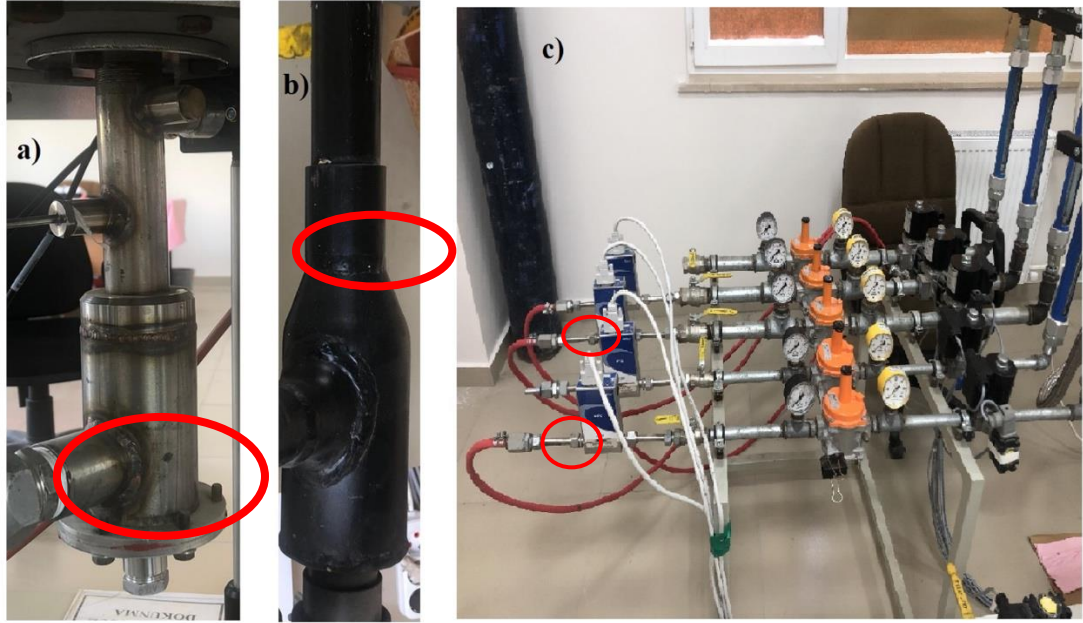
$$= \frac{Br}{\pi} \left[\arctan \left(\frac{LW}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}} \right) - \arctan \left(\frac{LW}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}} \right) \right] \quad (3.2)$$

B=2310.7, Bx=489.9, By=2258.2 gauss manyetik alan, x=10 mm, y=10 mm mesafede 402010 N35 mıknatısı tarafından oluşturuldu. Mıknatısın kalınlığı 2 katına çıkarıldığında sırasıyla; 4890, 753 ve 4923 gauss manyetik alanlar oluştu. Kalınlık arttıkça, manyetik alan gücünde orantılı bir artış görülür [57, 266].



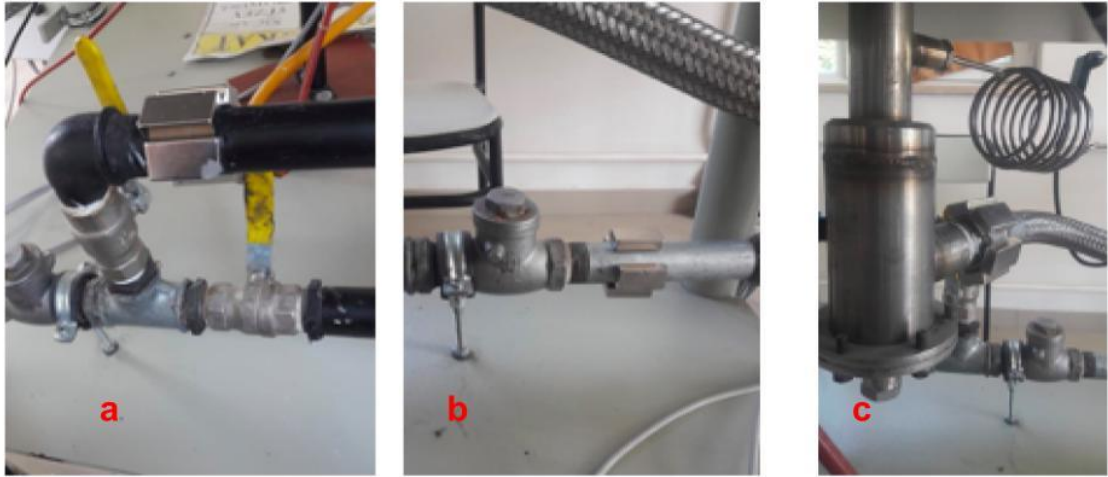
Şekil 3.33. **a)** N35 40x20x10 Manyetik Alanı **b)** N35 40x20x20 Manyetik Alanı

Şekil 3.34, yanma odasındaki manyetik alan etkisinin olduğu bölgeleri gösteren resimler sergiler. Başlangıçta, yakıcıların açıklığına dört neodim mıknatıs yerleştirilerek bir manyetik alan oluşturuldu. Ardından, Şekil 3.34.b'de görülen premikser test amaçlı olarak kullanıldı. Sonrasında, her yakıcının yakıtı, yakıt besleme hatlarındaki kütle akış kontrollerinin çıkışına konumlandırıldı, bu Bölüm 3.34.c'de gösterilmiştir. Neodim mıknatısların konumlandırıldığı alanlar Şekil 3.34'te kırmızı bir daire ile gösterilmiştir. Her bir bölgede gözlemlenen manyetik alan etkisini yorumlamak için dinamik basınç, ışık şiddeti, sıcaklık ve emisyon verileri üzerinde karşılaştırmalı bir analiz yapıldı.



Şekil 3.34. Manyetik Alan Bölgesi **a)** Yakıcı **b)** Premikser **c)** CH₄ ve H₂ MFC çıkışı

Aşağıda manyetik alan için kullanılan neodyum mıknatısların deney düzeneği üzerine yerleştirilmiş halleri mevcuttur. Manyetik alanlar deney düzeneğine aynı doğrultuda yerleştirilmiştir.



Şekil 3.35. Mıknatısların yerleşimi **a)** Premikser **b)** CH₄ ve H₂ MFC çıkışı **c)** Yakıcı

Kullanılan deneysel düzeneğe, CH₄ ve CH₄/H₂ alevlerinin dinamik istikrarsızlığını değerlendirmek için dış akustik zorlama koşullarının uygulanmasını içeriyordu. Bu araştırmanın sonuçları, yanma odasında iki farklı akustik rezonans frekansının varlığını ortaya koydu. Rezonans bölgeleri, alevin dinamik basınç genliklerinin önemli ölçüde

yükseldiği ve istikrarsızlık gösterme eğiliminde olduğu belirli konumları ifade eder. Frekanslar 95 Hz ve 175 Hz olarak keşfedildi. Çalışmanın deneysel parametreleri Tablo 3.3'te öz olarak belirtilmiştir.

Tablo 3.3. Deney Matriksi

Deney No	CH ₄ (%)	H ₂ (%)	Miknatisın konulduğu yer	Akustik Frekans (Hz)
1	100	0	Inlet of Burner	95
2	100	0	Inlet of Burner	175
3	100	0	Primexer	95
4	100	0	Primexer	175
5	100	0	Outlet of CH ₄ MFC	95
6	100	0	Outlet of CH ₄ MFC	175
7	70	30	Inlet of Burner	95
8	70	30	Inlet of Burner	175
9	70	30	Primexer	95
10	70	30	Primexer	175
11	70	30	Outlet of CH ₄ MFC	95
12	70	30	Outlet of CH ₄ MFC	175
13	70	30	Outlet of H ₂ MFC	95
14	70	30	Outlet of H ₂ MFC	175

Yapılan deneylerin her biri için ortalama 5 dk harcanmıştır. Yine her deneyden sonra, sistem kapatılır ve gaz akışı otomatik olarak kesilir. Daha sonra bir sonraki deneye başlamadan önce yaklaşık 5 dakika beklenmiştir, bu sürede yeterli zaman anlamına gelmektedir. Dolayısıyla deneyler arası 5 dk bekleme süresi ile stabilite sağlanmış olur. Bir sonraki deneyde yanma gerçekleştikten sonra, kararlı yanma sağlanana kadar veri alınmaz. Bu şekilde, önceki deneyden hat içinde kalan gazın diğer deneyi etkilemesi önlenir.

Deneysel sistemde kullanılan tüm cihazların kalibrasyon izlemesi yapılır. Çalışmaya başlamadan önce metan gazının kararlı yanması sağlanır ve sistem doğru sonuçlar verdiğinden emin olunduktan sonra deneyin diğer aşamalarına başlanır.

Sıcaklık verileri, yanma odasının dış portlarına sabitlenmiş termokupllardan alınır.

3.4. Deney Hata Analizi

Deney sırasında birçok ölçüm ekipmanı kullanılmaktadır. Bu ekipmanların ölçüm sapmaları Tablo 3.4’te verilmiştir. Yanma odası ve tüm ekipmanlar için toplam belirsizlik analizi yaklaşık olarak %1.39, termal güç ve akış hızı ise yaklaşık %1,4’tür [55].

Tablo 3.4. Ölçüm Ekipmanlarının Doğruluğu

Measurement Type	Brand	Model	Measurement Errors
Flue Gas Analyzer	MRU Instruments	Nova Plus RCU	CO(± 5) NO _x (± 5)
Mass Flow Controllers	MKS Technology and Products	GE50A	0.2% for 0–20% of full scale 1% for 20–100% of full scale
Dynamic Pressure Sensor	Honeywell	163PC01D75	$\pm \% 0,5$
Piezoresistive Pressure Transmitter	Keller	PR23 Series	$\pm \% 0,2$
Photodiode Sensor	Thorlabs	PDA36A-EC Series	$\pm \% 0,08$
Thermocouple	Elmo	B Type Pt%18Rh–Pt	$\pm \% 2$

Metot

Bu çalışmada, saf metan ve hidrojen zenginleştirilmiş metan alevinin stabilitesi üzerindeki elektromanyetik alanın etkisini incelemek amacıyla ön karışimli ve dönel yanma tekniklerini vasıtasıyla bir yanma sistemi kullanılmıştır. Deneylerde metan ve %70 CH₄ + %30 H₂ karışımı gazlar ile hava kompresörü kullanılarak, kütle akış kontrol cihazları aracılığıyla hassas yakıt enjeksiyonu sağlanmıştır. Yanma odasında, fotodiyotlar ve dinamik basınç sensörleri ile alev özellikleri ölçülmüş, bacagazı analizörü ile emisyon verileri toplanmıştır. Manyetik alan, 3500 gauss şiddetinde neodimyum mıknatıslar

kullanılarak brülör girişi, ön karıştırıcı ve yakıt hatlarında oluşturulmuştur. Akustik güçlendirme, yanma odasında 95 Hz ve 175 Hz frekanslarında akustik rezonans oluşturmak için hoparlörler ve bir sinyal jeneratörü ile sağlanmıştır. Sabit bir dönel sayı (1), eşdeğerlik oranı (0.7) ve termal güç (3 kW) korunarak farklı manyetik alan bölgelerinde ve akustik frekanslarda deneyler gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler, manyetik alanın ve akustik güçlendirmenin yanma stabilitesi ve emisyonlar üzerindeki etkilerini değerlendirmek için analiz edilmiştir. Manyetik alanın şiddeti yaklaşık 3500 Gausstur. Her bir deney 5 dk gibi bir zaman sürmektedir ve deneyler arasında 5 dk stabilite sağlanması için beklenilmiştir.



4. BÖLÜM

DENEYSEL SONUÇLAR

“Sentetik Yakıtların Yanma Kararsızlığına Elektromanyetik Alan Etkilerinin Deneysel İncelenmesi” başlıklı tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen veriler bu bölümde ele alınmıştır.

Giriş

Günlük hayatımızı sürdürebilmek için ihtiyacımız olan enerjiyi karşılamakta kullanılan yakıtların tutuşması için farklı ortam şartlarının sağlanması gerekmektedir. Bu şartlar arasında en önemlilerinden biri, yakıtın yanabilmesi için uygun yakıt/hava oranının sağlanmasıdır. Yakıt/hava oranı, yanmanın verimliliğini ve kararlılığını etkileyen kritik bir parametredir. Yanmanın gerçekleşebilmesi için yakıt ve oksijenin doğru oranlarda karışması gerekmektedir. Aksi takdirde, yanma verimi düşer ve istenmeyen emisyonlar artar.

Diğer bir metot ise yanmayı bazı özel ortamlarda desteklemek ve daha fazla enerji elde ederken daha az emisyon salınmasını sağlamaktır. Bu özel ortamlar arasında manyetik alanlar da bulunmaktadır. Manyetik alanlar, yanma sürecini etkileyerek alevin kararlılığını artırabilir, dinamik basınç dalgalanmalarını azaltabilir ve daha temiz bir yanma süreci sağlayabilir. Manyetik alanın yanma süreci üzerindeki etkileri, son yıllarda dikkat çeken bir araştırma konusu olmuştur. Manyetik alanların yanma dinamikleri üzerindeki potansiyel etkileri, yanma süreçlerinin daha verimli ve kontrollü bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunabilir.

Önceki yıllarda yapılan araştırmalarda %70 CH₄ ve %30 H₂ karışımının yanma kararsızlıkları hem yanma sürecinde hem de emisyonlarda önemli farklılıklar göstermektedir. Hidrojenin yüksek yanma hızı, düşük tutuşma enerjisi ve yüksek

difüzyon hızı, alev geri tepmesi ve kontrol zorluklarına neden olur. Sayısal simülasyonlar, yanma model sabiti A'nın değerinin 4'ten 1'e düşürülmesiyle daha gerçekçi sonuçlar vermiştir. %70 H₂ ve %30 CH₄ karışımında, model sabiti A'nın 1 olarak alınması durumunda sıcaklık dağılımı, NO_x, CO ve CO₂ emisyonları gibi parametreler deneysel verilerle uyum göstermiştir. Örneğin, NO_x emisyonları hacimsel %70 H₂ içeriğiyle önemli ölçüde artmış, CO emisyonları ise azalmıştır [7].

Bu tez çalışmasında, %100 metan ve %70 metan %30 hidrojen karıştırılmış sentetik yakıtların akustik zorlama altında manyetik alan ile desteklenerek yanma kararlılığı ve emisyon davranışları incelenmiştir. Metan, doğal gazın ana bileşeni olup yaygın olarak kullanılan bir fosil yakıttır. Hidrojen ise yanma sonucu yalnızca su buharı üreten temiz bir enerji kaynağıdır. Metan ve hidrojen karışımı, hem enerji yoğunluğu yüksek bir yakıt sağlar hem de karbon emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir.

Akustik zorlama, yanma odasında belirli frekanslarda basınç dalgalanmaları oluşturarak yanma sürecini etkileyen bir tekniktir. Akustik zorlamanın yanma süreci üzerindeki etkilerini incelemek, yanma kararlılığını ve verimliliğini artırmak için önemlidir. Bu çalışmada, akustik zorlamanın etkisi manyetik alan ile birleştirilerek incelenmiştir. Manyetik alanın yanma sürecine etkileri, dinamik basınç değişimleri, alev kararlılığı ve emisyon değerleri açısından değerlendirilmiştir.

Deneyler, manyetik alan olmadan ve manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, manyetik alan etkisi olmadan saf metan ve %70 metan-%30 hidrojen karışımı yakma deneyleri yapılmış ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Daha sonra, aynı deneyler manyetik alan altında tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, manyetik alanın yanma süreci üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Sonuçlar, manyetik alanın yanma sürecinde dinamik basınç genliklerini önemli ölçüde azalttığını ve yanma kararlılığını artıracak beklenmektedir. Ayrıca, manyetik alanın emisyon değerleri üzerinde de olumlu etkileri olacağı tahmin edilmektedir. Bu bulgular, manyetik alanların yanma süreçlerinin optimize edilmesi ve kontrol altına alınması konularında yeni yaklaşımlar sunması öngörülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, gelecekte yapılacak daha kapsamlı araştırmalar için temel oluşturmakta ve manyetik alanların yanma üzerindeki etkilerini daha detaylı bir şekilde ortaya koyarak yeni uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Metanın ve Metan İçerikli Sentetik Yakıtların Yanması

Metan yakıtının farklı eşdeğerlik oranlarında kararlı bir yanma gösterdiği bilinmektedir. Kararlı yanma aralığı, alevin geri tepme (flashback) ve sönme (blowoff) yaptığı sınırlar arasındaki eşdeğerlik oranlarıdır. Bu aralığı belirlemek için, kütle akış kontrolcüsü kullanılarak sisteme aktarılan hava miktarı ayarlanır. Sisteme giren yakıtla göre, yakıtın stokiometrik oranlarda yanabilmesi için gereken hava miktarı hesaplanır.

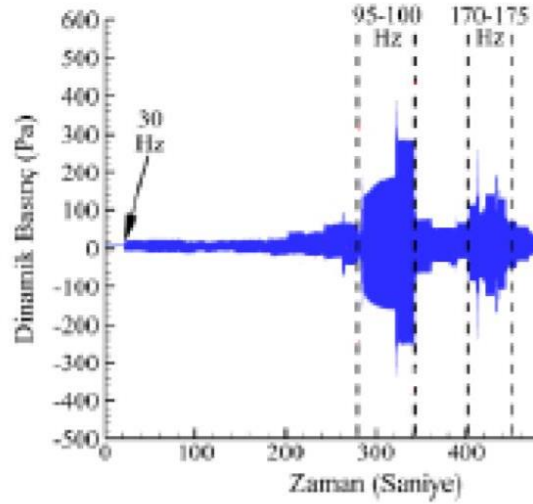
Bu hesaplanan hava miktarı ile tutuşma sağlandıktan sonra, yakıt/hava karışımındaki hava miktarı artırılarak eşdeğerlik oranı düşürülür ve karışım fakir hale getirilir. Karışım tamamen fakir hale gelip sönme gerçekleştiğinde, bu nokta sönme limiti olarak kaydedilir. Daha sonra, yakıt karışımındaki hava miktarı azaltılarak eşdeğerlik oranı artırılır ve karışım zengin hale getirilir. Bu durumda, havanın yetersiz kalıp alevin yok olduğu en yüksek eşdeğerlik oranı belirlenir ve geri tepme limiti olarak kaydedilir.

Metan İçerisine Farklı Gazlar İlave Edilmesi

Metan içerisine %30 H_2 gazı ilave edilerek kararsızlık ve emisyon davranışları incelenmiştir. Metan içerikli farklı yakıt karışımlarının yanma kararsızlığı ve emisyon davranışlarını incelemeden önce, içerisine ilave edilen H_2 yanma kararsızlıkları olan etkilerinin yorumlanabilmesi için öncelikle saf metan yakılarak kararsızlık değişimleri tespit edilmiştir.

Kararsızlık davranışlarını incelemek amacıyla dinamik basınç dalgalanmaları başta olmak üzere sıcak basınç ve ışık şiddeti verileri elde edilmiştir. Yanma deneylerinin yapıldığı esnada, yakıt kollunda bulunan hoparlör vasıtasıyla ortaya çıkan dalgalar, farklı frekanslardaki akustik ses dalgaları dinamik basınç dalgalanmalarına sebep olmuştur. Bu ses dalgaları özellikle 95 Hz ve 175 Hz değerlerinde hem dinamik basınç değişimlerine hem de ışık şiddetinde önemli değişimlere sebep olmuştur. Ortaya çıkan dinamik yanma süresi bu frekanslardaki dalgalanmalarla insana fark edilebilecek ve rahatsız olabilecek büyüklükte bir gürültü ortaya çıkmaktadır. Diğer frekans değerlerinde yanma üzerine önemli bir etki oluşturmazken, bu üç ana değer sistemin rezonans bölgeleri olarak

belirlenmiştir. Yanma odasında yapılan bir deney esnasında ortaya çıkan dinamik basınç dalgalanmaları ve rezonans bölgeleri Şekil 4.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Yanma akustik odanın rezonans bölgeleri

4.1. Dinamik Kararsızlıklar

Dinamik basınç dalgalanmalarının kullanılması, anlık değişimlerin incelenmesine olanak tanıdığı için kararsızlık verilerinin analizinde kullanılmaktadır. Dinamik kararsızlıktaki küçük dalgalanmalara bile yüksek hassasiyet gösteren bu verilerin kullanılmasıyla, değişen deneysel koşulların kararsızlık üzerindeki etkisini araştırmak mümkün hale gelmektedir.

Genlik ve Akustik Zorlamalar, Genlik, belirli frekanslarda akustik zorlamaya maruz kaldığında alev içinde kaydedilen en yüksek ve en düşük dinamik basınç değerleri arasındaki farkın büyüklüğü olarak tanımlanır. Literatür, genlikteki artışı ve ardından alevin sönmesini kararsızlığın göstergesi olarak yorumlamıştır [267]. Bu bağlamda, genlikteki değişikliklerin izlenmesi, yanma süreçlerindeki kararsızlıkların anlaşılmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Manyetik Alan Yoğunluğunun Etkisi, mevcut literatürde yapılan araştırmalara benzer şekilde, manyetik alan yoğunluğu, kararsızlık üzerindeki etkisini araştırmak için stratejik olarak çeşitli yerlere yerleştirilmiştir. Hosseinpour ve arkadaşları, ilgili bir çalışmada gözlemlendiği gibi, manyetik alanın etkisini incelemek için bir hidrojen mikro yakıcıda

hesaplmalı bir araştırma yürütmüştür. Bu araştırma, hacimce %30 H₂-%70 N₂'den oluşan bir yakıt karışımının hava ile birleştirildiğinde yanmasından kaynaklanan maksimum sıcaklık ve alev hızlarını tahmin etmeyi amaçlamıştır.

Manyetik alan uygulaması, benzin hattının üç farklı bölümünde gerçekleştirilmiştir. Nozulun ucuna manyetik alan uygulandığında alev uzunluğunda azalma olgusu görülmüştür. Bununla birlikte, gelişmiş ısı transferinin bir sonucu olarak maksimum sıcaklık düşmüştür. Ayrıca, deneysel kanıtlar, nozul çıkışına manyetik alan uygulanmasının yanma sürecini geliştirdiğini ve OH radikallerinin emisyonunu azalttığını göstermiştir [57].

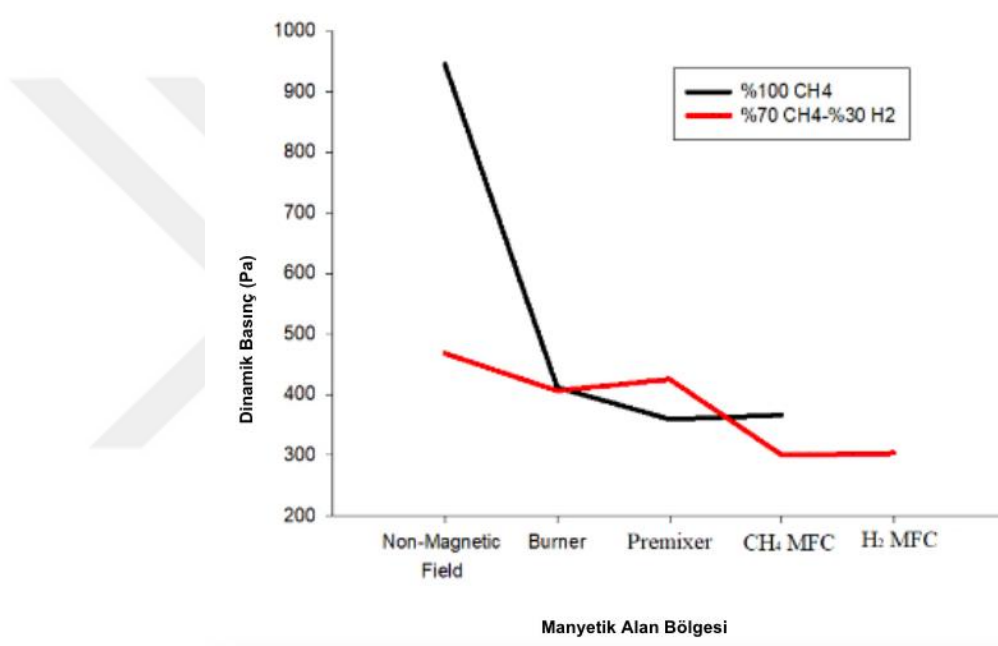
Deneysel Bulgular, şekil 4.1, 95 Hz'lik zorlayıcı bir akustik frekansa maruz kaldığında iki farklı yakıt karışımı tarafından görülen dinamik basınç dalgalanmalarını göstermektedir. Bu çalışmada, kesin bir karşılaştırma yapabilmek için ilk olarak manyetik alan etkisi olmaksızın saf metan alevlerinin kararsızlık verilerinin analizine odaklanılmıştır. Saf metan alevine 95 Hz uygulanması, 945 Pa'lık dinamik basınç genliği eşliğinde alevin sürekli yanmasıyla sonuçlanmıştır. Manyetik alan yokluğunda saf metanın yanmasını takiben, neodimyum mıknatıslar kullanılarak brülörün girişine bir manyetik alan eklenmiştir. Bu, 95 Hz'de 412 Pa'lık bir dinamik basınç genliğinin oluşmasına yol açmıştır. Daha sonra, brülör tarafından üretilen manyetik alan ayrılmış ve ön karıştırıcıya aktarılmıştır. Bu koşullar altında, alevin 359 Pa basınç genliği sergileyerek devam ettiği görülmüştür. Bir önceki örnekte, manyetik alanın büyüklüğü metan hattının ötesinde bulunan Manyetik Füzyon Odasının (MFC) çıkış bölgesinde belirlenmiştir. Bu örnekte alevin basınç genliği 366 Pa olarak kaydedilmiştir.

Yakıt olarak %30 H₂ hacim oranına sahip saf metan ve hidrojen gazı karışımı kullanıldığında, dinamik basınç 95 Hz'de 468 Pa olarak ölçülmüştür. Daha sonra, kombinasyon manyetik alan yoğunluğu uygulamasına tabi tutulmuştur. Brülörün girişine bir manyetik alan uygulandığında, basınç genliğinde 406 Pa değerine kadar bir azalma gözlenmiştir. Manyetik alan şiddeti üç farklı noktada test edilmiştir: ön karıştırıcı, metan MFC'nin çıkışı ve hidrojen MFC'nin çıkışları. Ölçülen değerler sırasıyla 425 Pa, 300 Pa ve 303 Pa olmuştur.

Yukarıdaki bulgular, manyetik alan yoğunluğunun dinamik basınç dalgalanmaları üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, yanma süreçlerinin

optimizasyonunda manyetik alan kullanımının potansiyel faydalarını göstermektedir. Gelecekteki çalışmalar, farklı yakıt karışımları ve manyetik alan yoğunluklarının etkilerini daha ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, yanma süreçlerinin daha verimli ve kararlı hale getirilmesine katkıda bulunabilir.

Şekil 4.2’de X eksen, mıknatısın deney düzeneğindeki konumunu temsil etmekte ve hangi noktaya yerleştirildiğini göstermektedir. Y eksen ise dinamik basıncı temsil etmektedir.



Şekil 4.2. 95Hz Frekans Altında Dinamik Basıncı Dalgalanması

Şekil 4.2. 95 Hz Frekans Altında Dinamik Basıncı Dalgalanması (X eksenı mıknatısın deney düzeneğindeki konumunu temsil etmekte ve hangi noktaya yerleştirildiğini göstermektedir. Y eksenı ise dinamik basıncı temsil etmektedir).

Grafikteki bulguları daha ayrıntılı inceleyecek olursak, %100 metan (CH₄) ile %70 metan-%30 hidrojen (CH₄-H₂) karışımının dinamik basınç profillerinin manyetik alanın varlığına ve farklı bölgelerine göre farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir.

Non-Magnetic Field (Manyetik Alan Olmayan Bölge):

- %100 CH₄: Dinamik basınç oldukça yüksek seviyede başlamaktadır ve diğer bölgelere kıyasla en yüksek değeri göstermektedir.

- %70 CH₄-%30 H₂: Başlangıçta daha düşük bir dinamik basınca sahip olup, manyetik alanın varlığı ile birlikte belirgin bir değişim göstermemektedir.

Burner (Brülör):

- %100 CH₄: Dinamik basınç hızla düşmektedir. Bu, metanın yanma sürecindeki hızlı tepkimesine işaret eder.
- %70 CH₄-%30 H₂: Basınç değişimi daha dengeli ve stabil bir profil sergilemektedir, bu da hidrojenin yanma sürecine olan katkısını göstermektedir.

Premixer (Premiksör):

Her iki karışımda da dinamik basınçta belirgin bir değişiklik gözlemlenmektedir, ancak %70 CH₄-%30 H₂ karışımı daha düşük bir basınç sergilemektedir.

CH₄-MFC ve H₂-MFC:

- %100 CH₄: Dinamik basınç değerleri düşük seviyelerde sabitlenmektedir.
- %70 CH₄-%30 H₂: Bu bölgelerde de düşük ve stabil bir basınç gözlemlenmektedir.

Manyetik alanın varlığı ve yokluğu, metan ve hidrojen karışımlarının yanma performansını doğrudan etkilemektedir. %100 metan kullanımında, yanma süreci daha yüksek dinamik basınçlarla karakterize edilirken, hidrojenin eklenmesi basıncı düşürmekte ve daha stabil bir yanma profili sağlamaktadır. Bu bulgular, yanma süreçlerinin optimizasyonu ve enerji verimliliğinin artırılması için önemli bilgiler sunmaktadır.

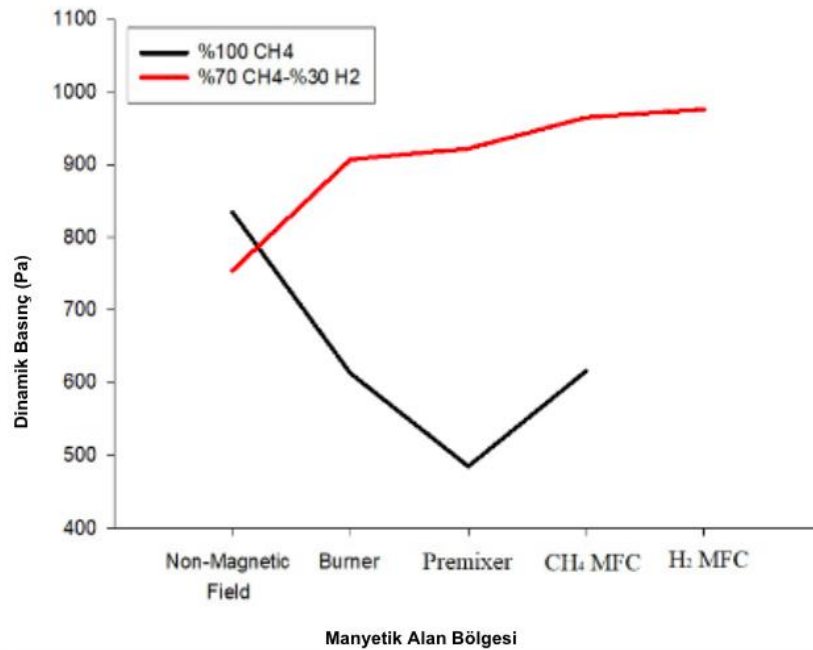
Şekil 4.2 tüm deneyler için dinamik basınçtaki değişiklikleri göstermektedir. Deneylerde kullanılan akustik frekans 175 Hz olarak sabitlenmiştir. Metan alevi içerisinde manyetik alan bulunmadığı durumlarda dinamik basınç salınım değeri 835 Pa olarak kaydedilmiştir. Ancak, manyetik alanın brülör girişine dahil edilmesiyle birlikte bu değer 613 Pa'ya düşmüştür.

Manyetik alan yoğunluğu başlangıçta ön karıştırıcıda oluşturulmuş ve bu durumda dinamik basınç 485 Pa olarak ölçülmüştür. Yakıt besleme hattına taşınan metan MFC çıkışında ise 616 Pa'lık bir azalma gözlemlenmiştir.

Manyetik alanın olmadığı senaryoda, %70 CH₄ ve %30 H₂ karışımından oluşan yakıt karışımında dinamik basınç genliği 754 Pa olarak belirlenmiştir. Neodimyum mıknatısların brülör girişine yerleştirilmesi ile gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, 175 Hz'lik farklı frekanslarda kaydedilen dinamik basınç seviyelerinde 907 Pa'lık kayda değer bir tutarsızlık olduğunu ortaya koymuştur.

Manyetik alan daha sonra metan ve hidrojen MFC çıkışlarını hedef alacak şekilde ön karıştırıcıya yönlendirilmiştir. Bu konumlarda, 175 Hz frekans için dinamik basınç genlik değerleri sırasıyla 922 Pa, 965 Pa ve 976 Pa olarak ölçülmüştür.

Sonuçlar, manyetik alanın varlığı ve yokluğunda dinamik basınç değişikliklerinin önemli ölçüde farklılaştığını göstermektedir. Özellikle, manyetik alanın yakıt karışımının yanma dinamikleri üzerindeki etkisi dikkat çekicidir. Bu bulgular, manyetik alan uygulamalarının yanma süreçlerinde basınç salınımlarını kontrol etme potansiyelini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.3. 175 Hz Frekans Altında Dinamik Basınç Dalgalanması

Şekil 4.3'te verilen grafiği daha kapsamlı yorumlayacak olursak, dinamik basınç değişikliklerinin manyetik alanın farklı bölgelerindeki etkileri iki farklı yakıt karışımı için gösterilmektedir: %100 CH₄ (siyah çizgi) ve %70 CH₄ + %30 H₂ (kırmızı çizgi).

Manyetik Alanın Olmadığı Durum

- %100 CH₄ için dinamik basınç yaklaşık 835 Pa olarak ölçülmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için dinamik basınç yaklaşık 754 Pa'dır.

Brülör Bölgesi

- Manyetik alanın eklenmesiyle %100 CH₄ için dinamik basınç değeri 613 Pa'ya düşmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ise dinamik basınç 907 Pa'ya yükselmiştir.

Ön Karıştırıcı Bölgesi

- %100 CH₄ için dinamik basınç 485 Pa olarak kaydedilmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için dinamik basınç genliği 922 Pa'ya yükselmiştir.

CH₄ MFC Çıkışı

- %100 CH₄ için dinamik basınç 616 Pa olarak ölçülmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için dinamik basınç 965 Pa olmuştur.

H₂ MFC Çıkışı

- %100 CH₄ için dinamik basınç 754 Pa olarak ölçülmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için dinamik basınç 976 Pa'ya ulaşmıştır.

Genel Değerlendirme

Manyetik Alanın Etkisi: Manyetik alanın varlığı, %100 CH₄ karışımında dinamik basınçta belirgin bir azalmaya neden olurken, %70 CH₄ + %30 H₂ karışımında dinamik basınç değerlerinde artışa neden olmuştur.

Yakıt Karışımı Farklılıkları: Hidrojen içeren karışımında (kırmızı çizgi) dinamik basınç değerleri, manyetik alanın farklı bölgelerinde daha yüksek seyretmektedir. Bu, hidrojenin manyetik alan altındaki yanma dinamiklerine etkisini göstermektedir.

Ön Karıştırıcı ve MFC Çıkışları: Manyetik alanın ön karıştırıcı ve MFC çıkışlarına uygulanması, her iki yakıt karışımında da farklı dinamik basınç değerlerine yol açmıştır. Özellikle %70 CH₄ + %30 H₂ karışımında, manyetik alanın varlığı dinamik basıncı artırmıştır.

Buradan yola çıkarak, manyetik alanın varlığı ve yakıt karışımının kompozisyonu, dinamik basınç değişikliklerinde belirgin farklar yaratmaktadır. Bu bulgular, manyetik alanın yanma süreçlerini kontrol etme potansiyelini ve yakıt karışımlarının yanma özelliklerini anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.

Deneysel sonuçlar, manyetik alan yokluğunda metana hidrojen eklenmesinin alevin dinamik kararsızlığında önemli bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Örneğin, kararsızlığın 95 Hz frekansta %50 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Bu olgunun arkasındaki temel neden, hidrojen girişinin termal salınım dalgalanması ile hız dalgalanması arasındaki faz uyuşmazlığını artırmasıdır. Böylece, bozulma frekansının değiştirilmesi ısı salınımı üzerindeki etkisini hafifletmiştir [224]. Ancak, uygulama frekansı 175 Hz'e ulaştığında kararsızlıktaki azalma gözlenmemiştir. Saf metan yanmasına hidrojen eklenmesi, alev kararsızlığının 95 Hz'lik daha düşük bir frekanstan 175 Hz'lik daha yüksek bir frekansa kaymasına neden olmuştur.

Şekil 4.1'de, 95 Hz altındaki basınç dalgalanması ile karşılaştırıldığında, 175 Hz altında manyetik alan uygulanması sonucunda %100 CH₄ ve %70 CH₄-%30 H₂ karışımı arasındaki basınç farkının daha fazla arttığı görülmüştür. En yüksek fark, ön karıştırıcıya manyetik alan uygulandığında gözlemlenmiştir.

Manyetik alanın kararsızlık üzerindeki etkisi incelendiğinde, belirli bulgular ortaya çıkmıştır. Saf metan alevi içerisinde manyetik alan gücünün uygulandığı tüm yerlerde alev stabilitesinde artışlar gözlemlenmiştir. Alev kararlılığı, özellikle 95 Hz'deki CH₄/H₂ alevinde belirgin bir şekilde artmış ve bu da dinamik kararsızlığın azalmasına karşılık gelmiştir. Ayrıca, manyetik alanın eklenmesinin alevin kararlılığını daha da artırdığı görülmüştür.

Araştırma bulguları, manyetik alanın varlığının metan için yanma hızını artırdığını ve daha verimli ısı transferini kolaylaştırdığını göstermektedir. Bu faktör nedeniyle, manyetik alanın varlığı hem saf metanın hem de karışımın %70'ini metanın oluşturduğu

CH_4/H_2 karışımının yanması sırasında alev kararlılığının artmasıyla sonuçlanmıştır [86]. Ayrıca, hidrojen zenginleştirme sürecine benzer şekilde, manyetik alanın alev bölgesindeki OH^* yoğunluğunu azaltma ve alevin uzunluğunu azaltma kabiliyeti olduğu tespit edilmiştir [65]. Alev transfer fonksiyonunun faz değeri, OH kemilüminesansı ve alev uzunluğu azaldıkça artmıştır. Yukarıda bahsedilen senaryo, akustik zorlama frekansları aralığı boyunca, özellikle 95 Hz ile 175 Hz arasında kararsızlıkların ilerlemesiyle sonuçlanmıştır [57]. Özellikle 175 Hz frekans bandında hidrojen ilavesi ve manyetik alan etkisinin eşzamanlı olarak uygulanması, kararsızlıkta gözlemlenen artış nedeniyle büyük ilgi görmüştür.

Bu kısımda, manyetik alan ve hidrojen eklemesinin alev dinamikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Sonuçlar, manyetik alanın ve hidrojenin yanma süreçlerini optimize etme potansiyelini ortaya koymaktadır. Gelecekteki araştırmalar, bu faktörlerin farklı yanma koşulları ve yakıt karışımları üzerindeki etkilerini daha detaylı inceleyerek, endüstriyel uygulamalara yönelik önemli bilgiler sağlayabilir.

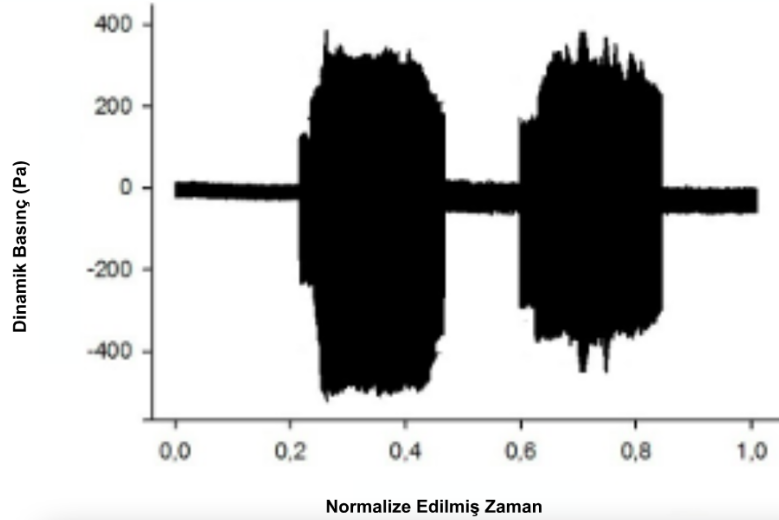
4.2. Alev Sıcaklığı ve Işık Yoğunluğu

Alevin baca gazı emisyonlarını analiz etmeden önce, alev parlaklığı ve sıcaklığı ile ilgili verilerin sunulması büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, yanma odası boyunca konumlandırılmış fotodiyotlar kullanılarak milivolt (mV) birimlerinde sürekli ışık yoğunluğu ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, kararlı yanmanın güvenilir bir göstergesi olarak hizmet eden alev sıcaklığı, brülörün çıkış bölgesinden başlayarak izlenmiştir. Şekil 4.3, sonik takviye olmadan iki farklı yakıtın yakıldığı senaryolarda kaydedilen alev sıcaklığı ve ışık yoğunluğu değerlerini göstermektedir.

4.2.1. Saf Metan Yanma Kararsızlığına Manyetik Alanın Etkisi

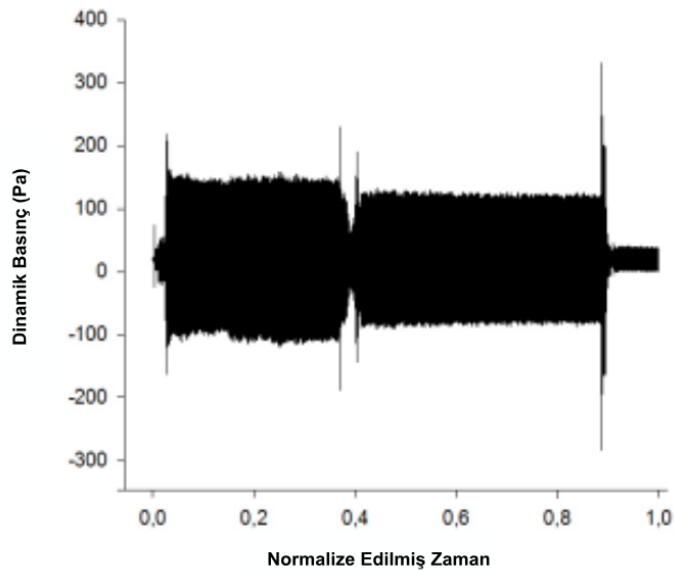
Metanın yanması esnasında sistemin farklı yerlerine manyetik alan uyguladığımızda metan yanmasına manyetik alanın etkisi araştırılmıştır. Burada, manyetik alanın yanma süreci üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla saf metan (%100 CH_4) gazının yanması incelenmiştir. Deneyler, manyetik alan olmadan ve manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir. Deneylerin amacı, manyetik alanın dinamik basınç değişimleri üzerindeki etkilerini belirlemektir. İlk olarak, manyetik alan etkisi olmadan saf metan yakma deneyi yapılmış ve elde edilen veriler analiz edilmiştir. Daha sonra, aynı deney

manyetik alan altında tekrarlanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, manyetik alanın yanma süreci üzerindeki etkileri net bir şekilde ortaya konulmuştur.



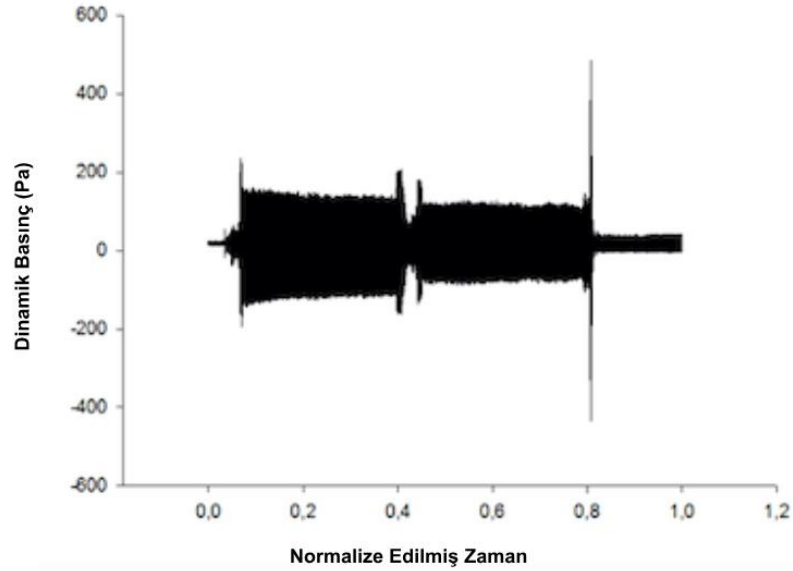
Şekil 4.4. Manyetik Alan Olmadan Saf Metan Yakma Deneyi

Şekil 4.4, manyetik alan olmadan gerçekleştirilen saf metan yakma deneyinde elde edilen dinamik basınç değişimlerini göstermektedir. Bu şekilde, yanma odasının akustik rezonans bölgelerinde büyük genlikli salınımlar gözlenmiştir. 95 Hz frekansta 945 Pa dinamik basınç genliği elde edilmiştir. Yanma süreci devam ederken, 175 Hz frekansında ise 835 Pa genlik değeri kaydedilmiştir. Bu sonuçlar, manyetik alan olmadan yapılan yanma deneyinde, belirli frekanslarda yüksek dinamik basınç genliklerinin oluştuğunu göstermektedir.



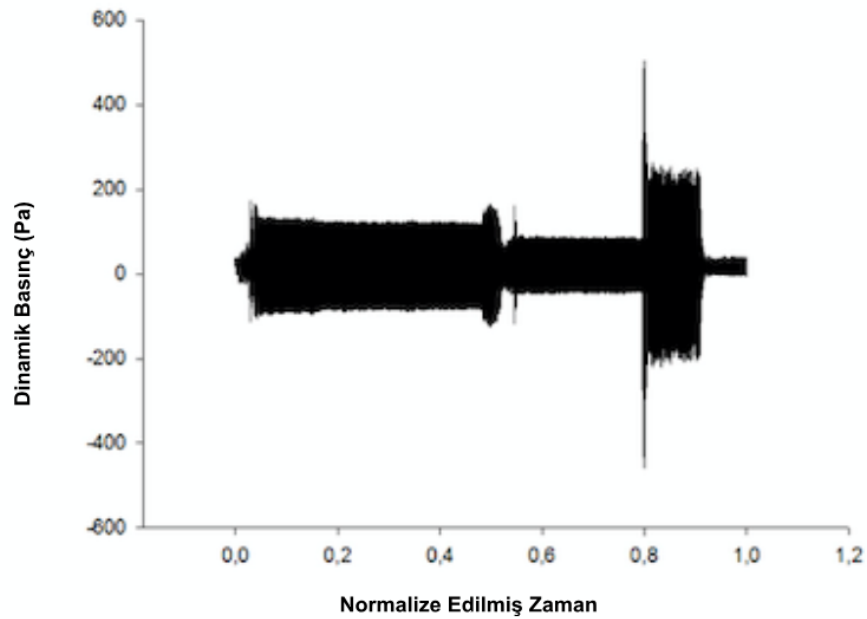
Şekil 4.5. Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan Burnerda)

Şekil 4.5, saf metanın manyetik alan burnerdarken yakılması sonucu oluşan dinamik basınç değişimlerini göstermektedir. Bu deneyde, %100 metan 95 Hz akustik zorlamada 412 Pa basınç genliğinde yanmaya devam etmiştir. 175 Hz frekansında ise 613 Pa dinamik basınç genliği meydana gelmiştir.



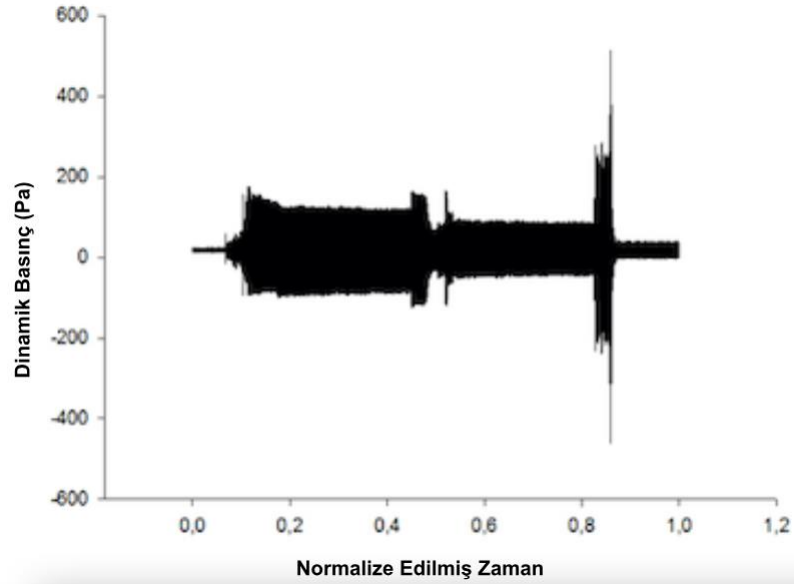
Şekil 4.6. Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan Ön karıştırıcıda)

Şekil 4.6, manyetik alan premixer'e (ön karıştırıcıya) yerleştirildiğinde saf metanın yakılması sonucu oluşan dinamik basınç değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4.7. Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan CH₄ MFC Çıkışında)

Şekil 4.7, manyetik alan CH_4 MFC Çıkışına yerleştirildiğinde saf metanın yakılması sonucu oluşan dinamik basınç değişimlerini göstermektedir.



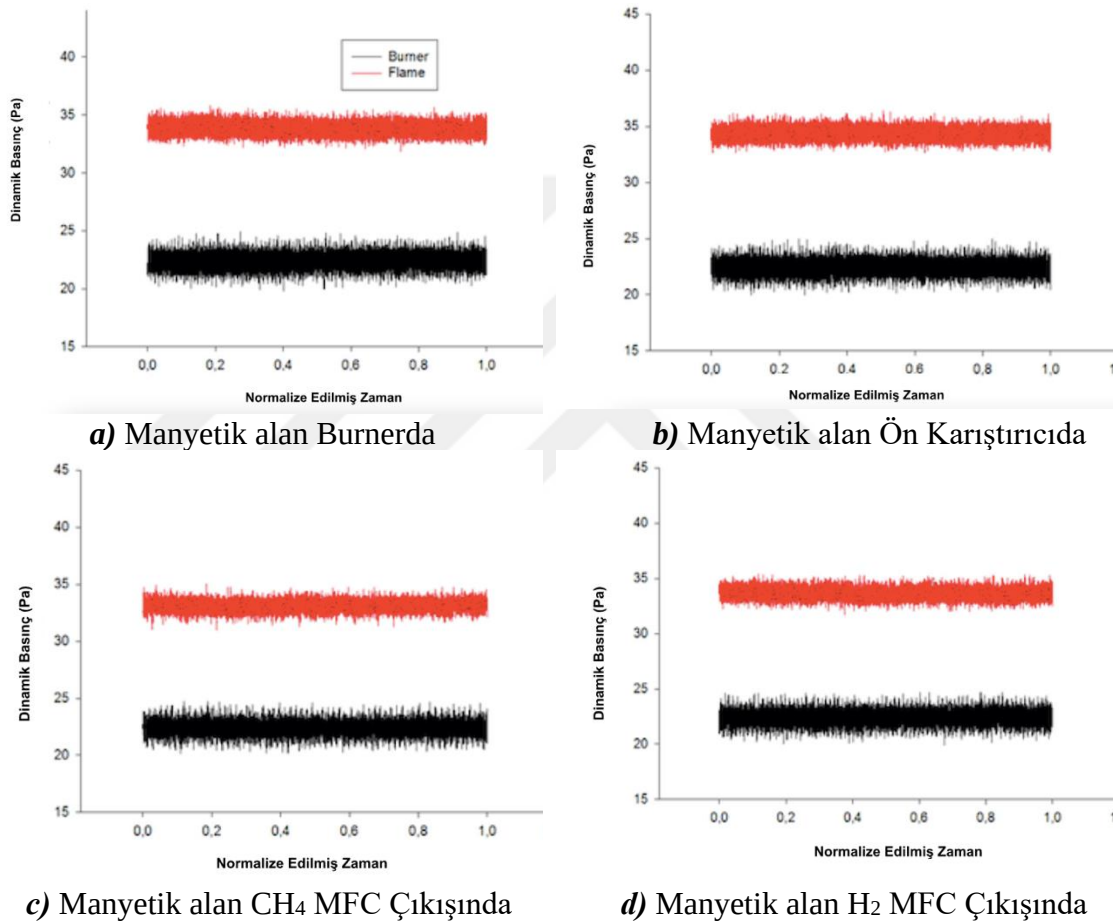
Şekil 4.8. Manyetik Alan Altında Saf Metan Yakma Deneyi (Manyetik Alan H_2 MFC Çıkışında)

Şekil 4.8, manyetik alan H_2 MFC Çıkışına yerleştirildiğinde saf metanın yakılması sonucu oluşan dinamik basınç değişimlerini göstermektedir.

Manyetik alan olmadan ve manyetik alan altında yapılan deneylerin karşılaştırılması, manyetik alanın dinamik basınç genlikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. 95 Hz frekansında, manyetik alan altında dinamik basınç genliği yaklaşık %57 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, 175 Hz frekansında dinamik basınç genliği yaklaşık %26 azalma göstermiştir. Bu bulgular, manyetik alanın yanma sürecinde dinamik basınç genliklerini önemli ölçüde azalttığını ve yanma dinamikleri üzerinde kontrol sağlayabileceğini göstermektedir.

Veriler ışığında, manyetik alanların yanma süreçlerinin optimize edilmesi ve kontrol altına alınması konularında yeni yaklaşımlar sunabileceğini göstermektedir. Gelecekte yapılacak daha kapsamlı araştırmalar, manyetik alanların yanma üzerindeki etkilerini daha detaylı bir şekilde ortaya koyabilir ve bu alanda yeni uygulamaların geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

Saf metanın yanması sırasında, manyetik alan yokken başlangıçta 1107 K olarak ölçülen brülör çıkışındaki sıcaklık, brülör girişine manyetik alanın eklenmesiyle hafif bir artış göstererek 1113 K'ye yükselmiştir. Manyetik alan etkisinin oluşması nedeniyle, ön karıştırıcı ve metan MFC çıkış bölgelerindeki sıcaklık değerleri sırasıyla 1115 K ve 1116 K olarak ölçülmüştür. %100 metan yanması durumunda ışık şiddeti değerleri sırasıyla 5,02 mV, 5,11 mV, 5,18 mV ve 5,18 mV olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.9. Manyetik Alan Altında Saf Metan Statik Basınç Değişimleri

Şekil 4.9 a)'da manyetik alan burnerda iken metan alevinin yakıcı içerisindeki ve alev bölgesindeki statik basınç değişimleri gösterilmektedir. Bu şekil incelendiğinde dinamik basınç dalgalanmalarına benzer bir şekilde yakıcı içerisindeki maksimum statik basınç değeri yine 95 Hz frekans altında ve 175 Hz çeşitli değerleri ölçülmüştür. Alevin bütün akustik zorlama frekanslarında kararlı bir şekilde yanması, geri tepme veya sönme eğilimine girmemesi sebebiyle statik basınç ölçümlerinde büyük bir dalgalanma meydana gelmemiştir.

4.2.2. Metan-Hidrojen Karışımı Yanması

Metana hidrojen molekülleri eklenerek yakıldığında, brülörün girişine manyetik alan uygulandığında sıcaklık 1134 K'den 1145 K'ye yükselmiştir. Ön karıştırıcının manyetik alan etkisine maruz kaldığı durumlarda, brülörün çıkışında başlangıçta 1141 K olarak kaydedilen sıcaklık, manyetik alan etkisi Kütle Akış Kontrolörlerine (MFC'ler) bağlı metan ve hidrojen besleme hatlarına uygulandığında sırasıyla 1155 K ve 1152 K'ye artış göstermiştir. Aynı koşullar altında CH_4/H_2 yakıt karışımının ışık şiddetindeki değişimlerin sırasıyla 6,94 mV, 7,85 mV, 7,64 mV, 8,69 mV ve 8,31 mV olduğu görülmüştür.

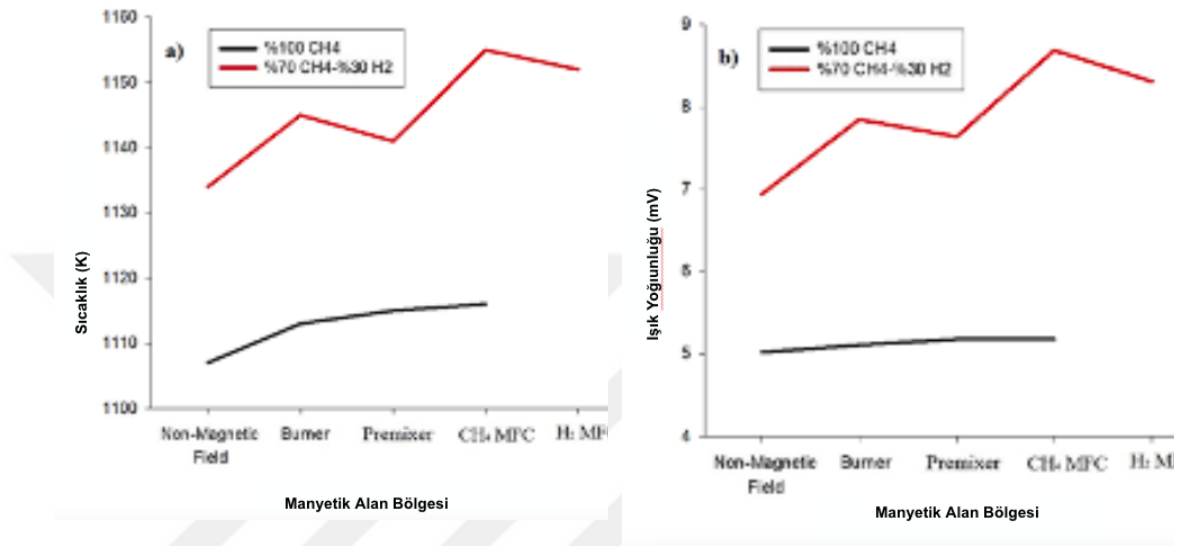
4.2.3. Karşılaştırma ve Sonuçlar

Alev parlaklığı ve sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında, bu iki parametrenin paralel bir değişim gösterdiği ortaya çıkmaktadır. Sonuçlar, Boben ve arkadaşları [68] tarafından yürütülen araştırma ile uyumlu olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Fiji ve arkadaşlarının [104] alev parlaklığı sonuçları ile de benzerlik göstermektedir. Yükselen alev çıkış sıcaklığındaki bir artışın parlaklık üzerinde olumlu bir etkiye sahip olması beklenir. Manyetik alan gücündeki ve alev sıcaklığındaki değişimler arasındaki ilişki, dinamik basınç genliğindeki karşılık gelen değişimlere dair ikna edici kanıtlar sunmaktadır.

Alevin sıcaklık ve ışık yoğunluğu parametreleri, artan kararlılık ile eş zamanlı olarak artış göstermiştir. Ayrıca, en yüksek alev sıcaklıkları, yakıt besleme hatlarındaki CH_4 ve H_2 için kütle akış kontrolörlerinin çıkışında manyetik alan indüklendiğinde gözlemlenmiştir. Bu belirli noktalara manyetik alan uygulanması, bu bölgede yakıt ve havanın karışmasının önlenmesine yol açmıştır. Sonuç olarak, bu fenomen kararlılık, alev parlaklığı ve sıcaklıktaki gelişmelerden sorumludur. Manyetik alanın uygulandığı yerlerde yakıt/hava karışımının bulunması, manyetik alanın önemli bir kütle üzerindeki etkisini azalttığına inanılmaktadır. Buna karşılık, karbon ve hidrojen atomlarının birbirine karışmasını önleyecek şekilde bir manyetik alan gücüne tabi tutulmasıyla kararlılık artırılmıştır.

Önceki araştırmalarda, brülör ucundaki reaksiyon bölgesine manyetik alan uygulanmasının yerel sıcaklıkta artışa yol açtığı gözlemlenmiştir [68]. Değişen manyetik alan yoğunluklarının alev üzerindeki etkilerini araştırmak için yapılan deneylerde,

manyetik alan yoğunluğunun artırılmasının alev parlaklığında bir artışa neden olduğu keşfedilmiştir [104]. Bu bulgular, manyetik alanın yanma süreçlerindeki potansiyel uygulamaları ve yakıt karışımlarının yanma özelliklerini anlamada önemli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 4.10. **a)** Alev Sıcaklığı ve **b)** Işık Yoğunluğu Değişimleri

Şekil 4.10 a) alev sıcaklığı ve b) ışık yoğunluğu değişimleri grafiklerini ayrıntılı şekilde ele alacak olursak, bu grafiklerde iki farklı yakıt karışımı (%100 CH₄ ve %70 CH₄ + %30 H₂) için manyetik alanın uygulanmasının alev sıcaklığı ve ışık yoğunluğu üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Şekil 4.10 a) Alev Sıcaklığı (K) grafiğinin yorumlanması;

Manyetik Alan Yokken:

- %100 CH₄ için alev sıcaklığı yaklaşık 1107 K olarak ölçülmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için alev sıcaklığı yaklaşık 1134 K olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesinde Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için sıcaklık 1113 K'ye yükselmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için sıcaklık 1145 K'ye yükselmiştir.

Ön Karıştırıcı Bölgesinde Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için sıcaklık 1115 K olarak kaydedilmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için sıcaklık 1155 K olarak ölçülmüştür.

CH₄ MFC Çıkışında Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için sıcaklık 1116 K'ye yükselmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için sıcaklık 1152 K'ye yükselmiştir.

H₂ MFC Çıkışında Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için sıcaklık yine 1116 K olarak kalmıştır.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için sıcaklık 1152 K olarak kalmıştır.

Şekil 4.10. b) Işık Yoğunluğu (mV) grafiğinin yorumlanması;

Manyetik Alan Yokken:

- %100 CH₄ için ışık yoğunluğu yaklaşık 5,02 mV olarak ölçülmüştür.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ışık yoğunluğu yaklaşık 6,94 mV olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesinde Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için ışık yoğunluğu 5,11 mV'ye yükselmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ışık yoğunluğu 7,85 mV'ye yükselmiştir.

Ön Karıştırıcı Bölgesinde Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için ışık yoğunluğu 5,18 mV olarak kaydedilmiştir.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ışık yoğunluğu 7,64 mV olarak ölçülmüştür.

CH₄ MFC Çıkışında Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için ışık yoğunluğu yine 5,18 mV olarak kalmıştır.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ışık yoğunluğu 8,69 mV'ye yükselmiştir.

H₂ MFC Çıkışında Manyetik Alan Uygulaması:

- %100 CH₄ için ışık yoğunluğu yine 5,18 mV olarak kalmıştır.
- %70 CH₄ + %30 H₂ için ışık yoğunluğu 8,31 mV olarak kalmıştır.

Genel Değerlendirme

Alev Sıcaklığı:

- Manyetik alan uygulaması, hem %100 CH₄ hem de %70 CH₄ + %30 H₂ karışımlarında alev sıcaklığında artışa neden olmuştur.
- Hidrojen içeren karışımda (kırmızı çizgi), manyetik alan uygulandığında sıcaklık daha yüksek değerlere ulaşmıştır.

Işık Yoğunluğu:

- Manyetik alan uygulanması, her iki yakıt karışımında da ışık yoğunluğunda artışa yol açmıştır.
- %70 CH₄ + %30 H₂ karışımında (kırmızı çizgi), manyetik alan varlığında ışık yoğunluğu daha belirgin bir artış göstermiştir.

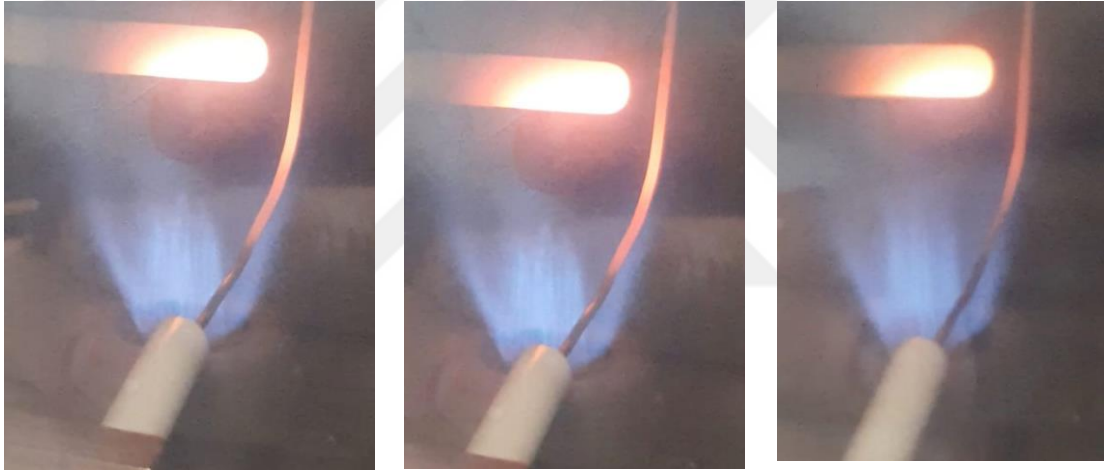
Sonuç olarak, manyetik alan uygulaması hem alev sıcaklığını hem de ışık yoğunluğunu artırmıştır. Özellikle hidrojen eklenmiş yakıt karışımında bu artışlar daha belirgin olmuştur. Bu durum, manyetik alanın yanma dinamikleri üzerindeki olumlu etkilerini ve hidrojenin bu etkileşimdeki rolünü vurgulamaktadır.

Saf Metanın Yanması Alev Görünümü

Saf metanın (%100 CH₄) yanması görece kararlı bir alev ortaya çıkarmaktadır. Aşağıda manyetik alan ile alevin zorlamasız durumda ve farklı frekanslardaki zorlamalar altında alınan alev görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 4.11. CH₄ çıkışına yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri



Şekil 4.12. Ön karıştırıcıya yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri



Şekil 4.13. Yakıcıya yerleştirilen manyetik alanda Saf metan yanmasının alev görüntüleri

Zorlamasız durumda yüksek son derece parlak bir görüntüde yanan alev, 95 Hz frekans altındaki zorlamada küçük salınımlara rağmen yanmaya devam ederken 175 Hz frekansa geldiğinde yavaşça girdap üreticisinin içerisine doğru geri çekilerek sönme eğilimi göstermiştir.

4.3. Kirletici Emisyonları

Baca gazı emisyonları, yanma süreçlerinin kararlılığını ve verimliliğini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Endüstriyel brülörlerden kaynaklanan ve çevre için önemli bir tehlike oluşturan iki temel emisyon türü karbon monoksit (CO) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarıdır. Şekil 4.4, manyetik alan manipülasyonunun tüm deneylerdeki emisyonlar üzerindeki etkisini göstermektedir.

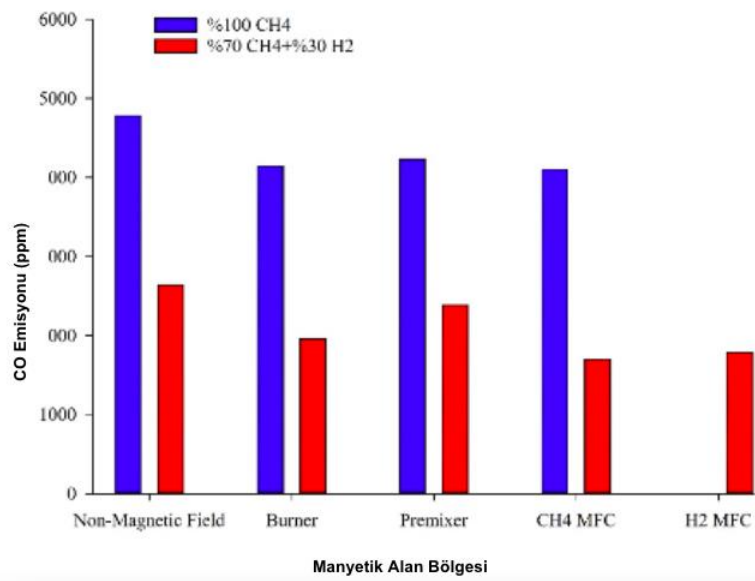
Saf Metan Yanması, Saf metanın yakılması sırasında karbon monoksit (CO) emisyonu başlangıçta milyonda 4785 parça (ppm) olarak ölçülmüştür. Ancak, brülör girişine manyetik alan eklenmesi CO emisyonunun 4143 ppm'ye düşmesine neden olmuştur. Ön karıştırıcıda manyetik alan oluşturulduğunda, CO emisyonunda 4233 ppm'ye kadar mütevazı bir artış gözlenmiştir. Bu artışa rağmen, gözlemlenen değer manyetik alan varlığında, manyetik alan yokluğuna kıyasla nispeten daha düşük kalmaktadır. Nihayetinde, manyetik alan yoğunluğu yakıt besleme hattına doğru çekildiğinde, CO emisyonu 4104 ppm'ye düşmüştür.

Metan-Hidrojen Karışımı Yanması, Manyetik olmayan alanda CO emisyonu, alternatif yakıt karışımı olan CH₄/H₂ alevinde milyonda 2638 parça (ppm) olarak kaydedilmiştir. Manyetik alanın brülörün girişinde oluşturulduğu senaryoda, CO emisyonu 1961 ppm seviyesine düşmüştür. Ön karıştırıcı bölgesine manyetik alan eklenmesi, CO emisyonlarında marjinal bir artışa neden olmuş ve 2387 ppm olarak kaydedilmiştir. Manyetik alan koşulları altında yakıt besleme hatlarında yapılan ölçümler, CH₄ ve H₂ hatları için sırasıyla 1698 ppm ve 1788 ppm değerlerini vermiştir. Bu özel senaryoda, dinamik kararsızlık ve alev sıcaklığı verilerine benzer şekilde, yakıt besleme hatlarına manyetik alan gücü uygulanmasının yanma üzerinde diğer alanlara kıyasla daha olumlu bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Manyetik alanın emisyon gazları üzerindeki etkilerini araştırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıdaki gibidir:

Oomen ve arkadaşları [268], manyetik alan kullanımı yoluyla karbon monoksit (CO) emisyonlarında %8,57'ye varan bir azalma gözlemledikleri bir çalışma yürütmüşlerdir. Shinoda ve arkadaşları [269], manyetik alanın metan-hava jeli alevindeki OH yoğunluğu dağılımı üzerindeki etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmış ve bunun O_2 'yi de etkilediği sonucuna varmışlardır. Baker ve Calvert [270], düzensiz manyetik alanların laminar jet difüzyon alevlerinin davranışı üzerindeki etkisini araştırmış ve manyetik alanın alev davranışını etkilediğini doğrulamışlardır. Kumar ve arkadaşları [83], manyetik alan varlığında gaz alevlerinin davranışı üzerine deneysel bir çalışma yürütmüş ve manyetik gradyanın etkisi altında alev sıcaklığının ve genişliğinin arttığını tespit etmişlerdir.

Hidrokarbon molekülleri kümeler halinde bulunur ve güçlü bir manyetik alan uygulandığında bu kümeler kırılabilir [271]. Manyetik alanın hidrokarbon molekülleri üzerindeki etkisi, maddenin doğal viskozitesini artıran bir yeniden yapılandırma sürecine yol açtığı için yaygın olarak kabul edilmektedir. Sonuç olarak, bu olgu yakıt ve oksitleyici arasındaki etkileşimi güçlendirmektedir. Kalıcı mıknatıslarla yapılan deneylerde, manyetik alanın performans ve emisyonlar üzerindeki etkisinin yakıt tüketiminde %4-12 ve CO, CO_2 , HC ve NO_x emisyonlarında %11-18 azalma ile sonuçlandığı gözlemlenmiştir. Bu da manyetik kuvvetin yanma verimliliğini artırdığını ve zararlı emisyonları azalttığını göstermektedir [272].



Şekil 4.14. CO Emisyonu

Şekil 4.14. CO Emisyonu grafiğini daha kapsamlı ele alalım. Grafikte, manyetik alanın farklı bölgelerde uygulanmasının, saf metan (%100 CH₄) ve metan-hidrojen karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂) için karbon monoksit (CO) emisyonları üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Grafik, farklı manyetik alan bölgelerindeki CO emisyonlarını milyonda parça (ppm) biriminde sunmaktadır.

4.3.1.1. Saf Metan (%100 CH₄)

Manyetik Alan Yok (Non-Magnetic Field):

- CO emisyonu yaklaşık 4785 ppm olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesi (Burner):

- Manyetik alan uygulanmasıyla CO emisyonu 4143 ppm'ye düşmüştür.

Ön Karıştırıcı (Premixer):

- Manyetik alanın etkisiyle CO emisyonu 4233 ppm olarak kaydedilmiştir.

CH₄ MFC Çıkışı:

- Manyetik alan uygulanması sonucu CO emisyonu 4104 ppm'ye düşmüştür.

H₂ MFC Çıkışı:

- Manyetik alanın etkisiyle CO emisyonu 4104 ppm seviyesinde kalmıştır.

4.3.1.2. Metan-Hidrojen Karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂):

Manyetik Alan Yok (Non-Magnetic Field):

- CO emisyonu yaklaşık 2638 ppm olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesi (Burner):

- Manyetik alan uygulanmasıyla CO emisyonu 1961 ppm'ye düşmüştür.

Ön Karıştırıcı (Premixer):

- Manyetik alanın etkisiyle CO emisyonu 2387 ppm olarak kaydedilmiştir.

CH₄ MFC Çıkışı:

- Manyetik alan uygulanması sonucu CO emisyonu 1698 ppm'ye düşmüştür.

H₂ MFC Çıkışı:

- Manyetik alanın etkisiyle CO emisyonu 1788 ppm olarak kaydedilmiştir.

4.3.1.3. Genel Değerlendirme

Saf Metan (%100 CH₄):

- Manyetik alanın uygulanması, CO emisyonlarında genel olarak bir azalmaya neden olmuştur. Brülör bölgesinde ve CH₄ MFC çıkışında manyetik alanın etkisi belirgin bir azalma göstermektedir.

Metan-Hidrojen Karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂):

- Hidrojen eklenmiş yakıt karışımında, manyetik alanın varlığı CO emisyonlarında daha belirgin bir azalma sağlamıştır. Brülör bölgesi ve CH₄ MFC çıkışında, manyetik alanın CO emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, manyetik alanın uygulanması her iki yakıt türü için de CO emisyonlarında azalma sağlamıştır. Ancak, hidrojen içeren karışımında (kırmızı sütunlar) manyetik alanın etkisi daha belirgin olmuştur. Bu durum, manyetik alanın yanma süreçlerini optimize etme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyelini göstermektedir.

4.3.2. Azot Oksitler (NO_x) Emisyonları ve Manyetik Alanın Etkisi

Diğer bir kirletici türü olan azot oksitler (NO_x), yanma süreçlerinin önemli kirletici emisyonlarından biridir ve karbon monoksit (CO) emisyonlarına benzer bir azalma modeli sergilemiştir. Bu çalışmada, saf metan yakma işlemi sırasında çeşitli bölgelerde NO_x emisyonları ölçülmüştür.

Saf Metan Yanması (Manyetik Alan Yok (Non-Magnetic Field)):

NO_x emisyonları, manyetik olmayan alanda 30 ppm, brülörde 27 ppm, ön karıştırıcıda 27 ppm ve CH₄ MFC sektöründe 20 ppm olarak kaydedilmiştir.

Metan-Hidrojen Karışımı Yanması (Manyetik Alan Eklenmesi):

Brülör girişine manyetik alan eklenmesi, hidrojenle zenginleştirilmiş yakıt karışımındaki NO_x emisyonlarında önemli bir azalmaya yol açmıştır. Manyetik alan yokken başlangıçta

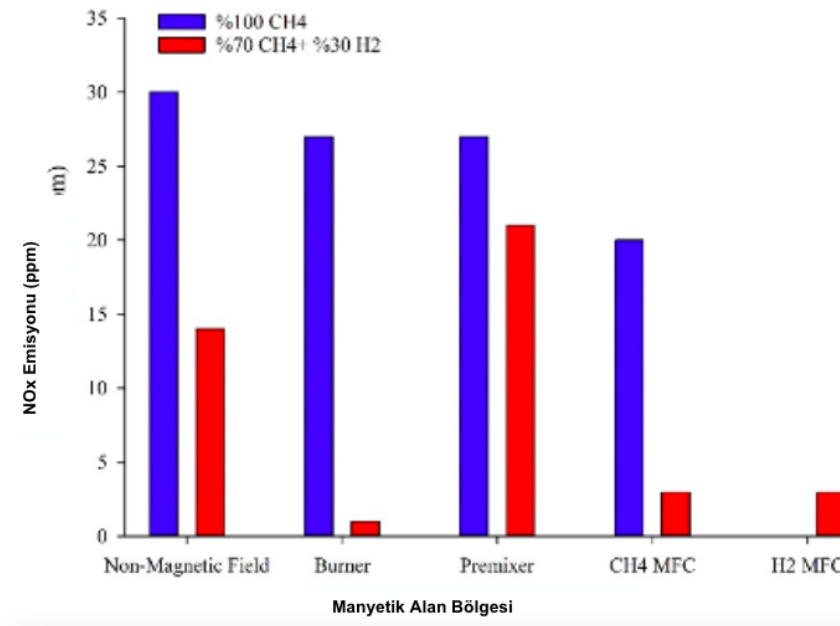
14 ppm olarak ölçülen NO_x emisyon seviyesi, manyetik alanın varlığıyla 1 ppm'ye düşmüştür.

Ön karıştırıcı, CH_4 MFC ve H_2 MFC bölgelerinde yapılan ölçümlerde ise sırasıyla 21 ppm, 3 ppm ve 3 ppm değerleri elde edilmiştir.

Analiz:

NO_x verileri analiz edildiğinde, karbon monoksit emisyonlarında gözlemlenen etkiye benzer şekilde, özellikle yakıt besleme hatlarında manyetik alanların uygulanmasıyla emisyon seviyelerinde önemli bir azalma gözlemlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan emisyon cihazının minimum 5 ppm NO_x emisyon ölçüm eşiğine sahip olduğu göz önüne alındığında, bu eşiğin altındaki okumaları sıfır emisyon göstergesi olarak kabul etmek mantıklıdır.

Literatürde, manyetik alan gücünün kararlı bir alev oluşturması nedeniyle kirletici emisyonlarının azalması olgusu çeşitli yakma sistemlerinde de gözlemlenmiştir [272]. Bu bulgular, manyetik alanın yanma süreçlerini optimize etme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyelini göstermektedir.



Şekil 4.15. NO_x Emisyonu

Şekil 4.15. NO_x Emisyonu Grafiği, manyetik alanın farklı bölgelerde uygulanmasının, saf metan (%100 CH₄) ve metan-hidrojen karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂) için azot oksit (NO_x) emisyonları üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Grafik, farklı manyetik alan bölgelerindeki NO_x emisyonlarını milyonda parça (ppm) biriminde sunmaktadır.

4.3.2.1. Saf Metan (%100 CH₄)

Manyetik Alan Yok (Non-Magnetic Field):

- NO_x emisyonu yaklaşık 30 ppm olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesi (Burner):

- Manyetik alan uygulanmasıyla NO_x emisyonu yaklaşık 27 ppm'ye düşmüştür.

Ön Karıştırıcı (Premixer):

- Manyetik alanın etkisiyle NO_x emisyonu 27 ppm olarak kaydedilmiştir.

CH₄ MFC Çıkışı:

- Manyetik alan uygulanması sonucu NO_x emisyonu 20 ppm'ye düşmüştür.

H₂ MFC Çıkışı:

- Manyetik alanın etkisiyle NO_x emisyonu düşük seviyelerde kalarak 20 ppm seviyesinde kalmıştır.

4.3.2.2. Metan-Hidrojen Karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂)

Manyetik Alan Yok (Non-Magnetic Field):

- NO_x emisyonu yaklaşık 14 ppm olarak ölçülmüştür.

Brülör Bölgesi (Burner):

- Manyetik alan uygulanmasıyla NO_x emisyonu 1 ppm'ye düşmüştür.

Ön Karıştırıcı (Premixer):

- Manyetik alanın etkisiyle NO_x emisyonu 21 ppm olarak kaydedilmiştir.

CH₄ MFC Çıkışı:

- Manyetik alan uygulanması sonucu NO_x emisyonu 3 ppm'ye düşmüştür.

H₂ MFC Çıkışı:

- Manyetik alanın etkisiyle NO_x emisyonu 3 ppm seviyesinde kalmıştır.

4.3.2.3. Genel Değerlendirme

Saf Metan (%100 CH₄):

Manyetik alanın uygulanması, NO_x emisyonlarında genel olarak bir azalmaya neden olmuştur. Brülör bölgesinde ve CH₄ MFC çıkışında manyetik alanın etkisi belirgin bir azalma göstermektedir.

Metan-Hidrojen Karışımı (%70 CH₄ + %30 H₂):

Hidrojen eklenmiş yakıt karışımında, manyetik alanın varlığı NO_x emisyonlarında daha belirgin bir azalma sağlamıştır. Brülör bölgesi ve CH₄ MFC çıkışında manyetik alanın NO_x emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, manyetik alanın uygulanması her iki yakıt türü için de NO_x emisyonlarında azalma sağlamıştır. Ancak, hidrojen içeren karışımda (kırmızı sütunlar) manyetik alanın etkisi daha belirgin olmuştur. Bu durum, manyetik alanın yanma süreçlerini optimize etme ve zararlı emisyonları azaltma potansiyelini göstermektedir.

5. BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, manyetik alanların saf metan ve CH_4/H_2 yakıt karışımlarının yanma dinamikleri üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Dinamik basınç dalgalanmalarının analizi, manyetik alan tarafından yönlendirilen 95 Hz. ve 175 Hz. frekanslarındaki zorlamalarda özellikle belirgin bir kararsızlık azalması ortaya koymuştur. Bu etki hem saf metan hem de CH_4/H_2 alevleri için tutarlı olup, CO ve NO_x gibi emisyonları önemli ölçüde azaltmıştır. Gözlemlenen azalmalar, manyetik alanın etkisi altındaki yanma odası ve yakıt besleme hatları için önemliydi.

Bu çalışma, manyetik alanların yanma süreci üzerindeki belirgin etkilerini önemli ölçüde açıklamaktadır. Bu bulgular, önceki benzer çalışmalarla uyumludur ve manyetik alanın yanma verimliliği ve emisyonlarındaki rolünü anlamamıza katkıda bulunmaktadır. Bu tez çalışmasını diğerlerinden ayıran en önemli husus hem manyetik alanların hem de akustik zorlamanın yakıt ve yanma üzerinde eşzamanlı uygulanmasıdır.

CH_4 ve CH_4/H_2 yakıtlarının manyetik alan ile akustik uyarıya tabi tutulduğu yanma sırasında kapsamlı ve özel gözlemler elde edildi. Bu deneyden bazı dikkate değer bulgular şunlardır:

Genel Bulgular:

- Dinamik basınç dalgalanmaları, alev davranışındaki anlık değişimlere duyarlılık sağlayarak küçük dalgalanmalara bile değerli içgörüler sunar. Bu duyarlılık,

- deneysel değişikliklerin alevin genel kararsızlığı üzerindeki etkisinin derinlemesine incelenmesine olanak tanır.
- Basınç dalgalanmalarının büyüklüğü, akustik zorlama sırasındaki dinamik basınç dalgalanmalarının büyüklüğünü temsil eder. Basınç dalgalarının artışı ve ardından gelen alev söndürme, kararsızlığın göstergeleri olarak yorumlanır.
- Manyetik alanın uygulanması, alev uzunluğunda azalmaya ve ısı transferinde artışa neden olur. Manyetik alanın nozul üzerine uygulanması, yanma sürecini iyileştirir ve OH radikallerinin emisyonunu azaltır. Manyetik alan uygulamasının etkileri çeşitli pozisyonlarda sistemli bir şekilde araştırılmıştır. Genel olarak, manyetik alan alev kararlılığını artırır, daha verimli bir yanma sürecini kolaylaştırarak alev kararlılığı, sıcaklık ve parlaklık yoğunluğunu artırır. Manyetik alanın çıkışlara uygulandığında alev sıcaklığının zirvesi, özellikle kütle akış kontrol cihazlarının çıkışlarına manyetik bir alan uygulandığında elde edilir. Ayrıca, manyetik alan, karbon monoksit (CO) ve azot oksitleri (NO_x) emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunur.

Farklı Frekanslarda Zorlama ve Manyetik Kuvvet Altındaki Belirli Sonuçlar:

- Saf metan ve CH₄/H₂ yakıtları, 95 Hz.'de manyetik alan altında daha düşük dinamik kararsızlıklar gösterir, bu da manyetik alanın yanma süreçleri üzerinde dengeleyici bir etkiye sahip olduğunu gösterir. Manyetik alanın uygulanması, dış akustik stres altındaki kararsızlıkları 175 Hz. frekansına doğru yeniden yönlendirir.
- Manyetik alanın uygulanması, yanma dinamiklerinde potansiyel bir değişiklik önerir ki bu da dış akustik stres altında kararsızlıkları 175 Hz. frekansına doğru yönlendirerek alev kararlılığını etkileyebilir.
- Özellikle manyetik alanların yakıt besleme hatlarına dahil edilmesi, manyetik alanın etkisiyle CO ve NO_x kirletici emisyonlarda bir azalmaya yol açar. Bu sonuçlar, hidrokarbon yakıt bağlarını bozarak yanma verimliliğini artırırken CO_x ve NO_x emisyonlarını azaltır.
- Bu deneyde manyetik alanın en önemli etkisi, kararsızlık, sıcaklık, alev parlaklığı ve emisyon verilerinde yakıt besleme hatlarındaki MFC çıkış konumunda gözlemlenir.

- Deney sırasında her iki yakıt tipine uygulanan manyetik alanın yoğunluğu, alev sıcaklığını etkiler, bu da gözlemlenen bir alev sıcaklığında azalmaya neden olur.

Bu bulgular, manyetik alan uygulamasının pratik yanma sistemlerinde yanma kararlılığını artırma ve kirletici emisyonları azaltma potansiyelini vurgular. Manyetik alan uygulama tekniklerinin daha fazla araştırılması ve optimize edilmesi, yanma teknolojisini ilerletme ve mühendislik uygulamalarında çevresel sürdürülebilirliği teşvik etme konusunda umut vadeder. Bu çalışma, manyetik alanın alev kararsızlığı ve emisyon üzerindeki olumlu etkileri sayesinde gelecekteki yanma üzerine yapılan çalışmalara ışık tutacaktır. Farklı manyetik alan ve farklı yakıtlar altındaki alev kararsızlığı gelecekteki çalışmalarda incelenecektir.

5.2. Öneriler

Akademik araştırma için öneriler aşağıda verilmiştir. Bunlar:

Temel Araştırmalar, Manyetik alanın yanma dinamiklerine etkisi mekanistik düzeyde daha detaylı incelenebilir. Özellikle, manyetik alanın yanma sırasında kimyasal reaksiyon yolları üzerindeki etkilerini anlamak, reaksiyon hızları ve radikal oluşumlarının incelenmesi önerilir.

Modelleme ve Simülasyon, Manyetik alanların etkisi altında yanma süreçlerinin detaylı sayısal modellemeleri yapılabilir. Bu modellemeler, çeşitli parametrelerin (manyetik alan şiddeti, frekansı ve yönü) yanma üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak için kullanılabilir.

Çapraz Disiplin Çalışmaları, Elektromanyetik alan teorisi ve yanma kimyası arasında disiplinlerarası çalışmalar teşvik edilmelidir. Bu tür çalışmalar, manyetik alanların yanma sürecine etkilerini daha kapsamlı bir bakış açısıyla değerlendirilmesini sağlayabilir.

Endüstriyel uygulama için öneriler aşağıda verilmiştir. Bunlar:

Enerji Üretimi, Manyetik alan teknolojisinin, özellikle yüksek performans gerektiren endüstriyel yanma sistemlerinde uygulanması, yanma verimliliğini artırabilir ve emisyonları azaltabilir. Enerji sektöründeki firmalar bu teknolojiyi pilot ölçekte test ederek, ticari uygulamalar için veri toplayabilirler.

Emisyon Kontrolü, Manyetik alan uygulamaları, çevresel düzenlemelere uyum sağlamak amacıyla emisyon kontrol sistemlerinin bir parçası olarak değerlendirilebilir. Özellikle NO_x ve CO emisyonlarının azaltılmasında kullanılabilir.

Bu öneriler, çalışmanızın yalnızca akademik değil, aynı zamanda pratik uygulamalar açısından da nasıl değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Önerilen çalışmalar, manyetik alanların yanma süreçleri üzerindeki etkilerini daha iyi anlamak ve bu bilgileri endüstriyel uygulamalara taşımak için bir temel oluşturabilir.



KAYNAKÇA

1. Sevim, C. 2012. Küresel enerji jeopolitiği ve enerji güvenliği. **Yaşar Üniversitesi E-Dergisi**, 7(26), 4378-4391.
2. Tzafestas, S. G. 2018. Energy in life and society. In Energy, information, feedback, adaptation, and self-organization. **Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering** (Vol. 90). Springer, Cham.
3. Calvert, K. 2015. Energy and society. In **International encyclopedia of the social & behavioral sciences** (2nd ed., pp. 615-620).
4. The World Bank. (n.d.). World Bank open data: Population, total. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL>
5. International Energy Agency. (n.d.). World oil supply and demand, 1971-2020. IEA, Paris. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-oil-supply-and-demand-1971-2020>
6. İlbaş, M., & Yılmaz, İ. 2002. Farklı ısı güçlerindeki kazanlarda yanma ve emisyon davranışının araştırılması. **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi**, 18(1), 18-27.
7. Yılmaz, İ., & İlbaş, M. 2010. Hidrojen-metan karışım yanmasında yanma model sabitinin değerlendirilmesi. **Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi**, 30(1), 45-57.
8. Saksono, N. 2005. Magnetizing kerosene for increasing combustion efficiency. **Jurnal Teknologi**, Edisi No. 2, Tahun XIX, 155-162.
9. Bian, Y. C., Ding, W., Hu, L., et al. 2021. Magneto-revealing and acceleration of hidden Kirkendall effect in galvanic replacement reaction. **Phys. Chem. Lett**, 12(22), 5294-5300.
10. Alnaimat, F., Dagher, S., Mathew, B., et al. 2018. Microfluidics based magnetophoresis: A review. **The Chemical Record**, 18(11), 1596-1612.
11. Li, J. Q., Ma, T. B., & Ning, J. G. 2018. Mechanism of explosion-induced disturbance in natural magnetic field. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 50(05), 1206-1218.
12. Gilart, R. A., Ungaro, M. R. B., Rodríguez, C. E. A., et al. 2020. Performance and exhaust gases of a diesel engine using different magnetic treatments of the fuel. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, 14(1), 6285-6294.

13. Chen, C. Y., Lee, W. J., Mwangi, J. K., et al. 2017. Impact of magnetic tube on pollutant emissions from the diesel engine. *Aerosol and Air Quality Research*, 17(4), 1097-1104.
14. Al-Rawaf, M. A. 2015. Magnetic field effects on spark ignition engine performance and its emissions at high engine speeds. **Journal of Engineering and Development**, 19(4), 37-48.
15. Kumar, V., Rastogi, V., Agarwal, S., et al. 2020. Investigation of temperature profile and temperature stability of micro diffusion flame under the influence of magnetic field by use of a holo-shear lens-based interferometer. **Optical Engineering**, 59(6), 064107.
16. Ueno, S., & Harada, K. 1986. Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes. **IEEE Transactions on Magnetism**, 22(5), 868-873.
17. Hongqing, W. 2023. Research on environmental change and sustainability. **Highlights in Science, Engineering and Technology**.
18. Taştan, M. 2018. İçten yanmalı bir motorda hidrojenle zenginleştirilmiş metanol-benzin karışımlarının performans ve emisyonu etkisinin deneysel incelenmesi [Doktora tezi], Erciyes Üniversitesi.
19. Yılmaz, H. 2018. Sentetik gaz yakıtların yanma karakteristiklerinin deneysel incelenmesi [Doktora tezi], Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
20. Mameri, A., Boussetla, S., Belalmi, R., & Aouachria, Z. 2019. Combustion characterization of the mixtures biogas-syngas, strain rate and ambient pressure effects. **International Journal of Hydrogen Energy**, 44(39), 22478-22491.
21. Lee, M. C., Yoon, J., Joo, S., & Yoon, Y. 2015. Gas turbine combustion characteristics of H₂/CO synthetic gas for coal integrated gasification combined cycle applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, 40(34), 11032-11045.
22. Wu, L., Kobayashi, N., Li, Z., Huang, H., & Li, J. 2015. Emission and heat transfer characteristics of methane-hydrogen hybrid fuel laminar diffusion flame. **International Journal of Hydrogen Energy**, 40(30), 9579-9589.
23. Yılmaz, H., & Yılmaz, İ. 2019. Effects of synthetic gas constituents on combustion and emission behavior of premixed H₂/CO/CO₂/CNG mixture flames. **Journal of the Energy Institute**, 92(4), 1091-1106.

24. Lee, M. C. 2016. Effects of H₂/CO/CH₄ syngas composition variation on the NO_x and CO emission characteristics in a partially-premixed gas turbine combustor. **Science China Technological Sciences**, 59(12), 1804-1813.
25. Kuznetsov, M., Kobelt, S., Grune, J., & Jordan, T. 2012. Flammability limits and laminar flame speed of hydrogen–air mixtures at sub-atmospheric pressures. **International Journal of Hydrogen Energy**, 37(22), 17580-17588.
26. Dong, C., Zhou, Q., Zhao, Q., Zhang, Y., Xu, T., & Hui, S. 2009. Experimental study on the laminar flame speed of hydrogen/carbon monoxide/air mixtures. **Fuel**, 88(10), 1858-1863.
27. Greco, A., Mira, D., & Jiang, X. 2017. Effects of fuel composition on biogas combustion in premixed laminar flames. **Energy Procedia**, 105, 1058-1062.
28. Alabaş, B. 2021. Oksijenle zenginleştirilen sentetik gaz yakıtların yanma kararsızlığının deneysel incelenmesi [Doktora tezi], Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
29. İlbaşı, A. 2023. Yüksek iç resirkülasyonlu bir yanma odası için renksiz dağıtılmış yanma şartlarında yanma karakteristiklerinin araştırılması [Doktora Tezi], Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
30. Zhang, K., & Jiang, X. 2018. An assessment of fuel variability effect on biogas-hydrogen combustion using uncertainty quantification. **International Journal of Hydrogen Energy**, 43(27), 12499-12515.
31. Kurji, H., Velara-Medina, A., Okon, A., & Chong, C. T. 2017. Combustion and emission performance of CO₂/CH₄/biodiesel and CO₂/CH₄/diesel blends in a swirl burner generator. **Energy Procedia**, 142, 154-159.
32. Sivri, İ. 2020. Biyogaz yakıtların yanma karakteristiklerinin deneysel incelenmesi [Yüksek lisans tezi], Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
33. Şahin, M. 2016. Konvansiyonel yakıcılarda biyogaz yanma karakteristiklerinin analizi [Doktora tezi]. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
34. Hu, Z., & Zhang, X. 2019. Experimental study on flame stability of biogas/hydrogen combustion. **International Journal of Hydrogen Energy**, 44(11), 5607-5614.
35. Wei, Z., Zhen, H., Fu, J., Leung, C., Cheung, C., & Huang, Z. 2019. Experimental and numerical study on the laminar burning velocity of hydrogen enriched

- biogas mixture. **International Journal of Hydrogen Energy**, 44(39), 22240-22249.
36. Kalsi, S. S., & Subramanian, K. A. 2017. Effect of simulated biogas on performance, combustion and emissions characteristics of a bio-diesel fueled diesel engine. **Renewable Energy**, 106, 78-90.
 37. İlbaşı, M., Şahin, M., & Karyeyen, S. 2018. 3D numerical modelling of turbulent biogas combustion in a newly generated 10 KW burner. **Journal of the Energy Institute**, 91(1), 87-99.
 38. Devi, S., Sahoo, N., & Muthukumar, P. 2020. Experimental studies on biogas combustion in a novel double layer inert porous radiant burner. **Renewable Energy**, 149, 1040-1052.
 39. Özdemir, İ. 2013. Hidrojenin ön karışım ve difüzyon yanmasının sayısal analizi [Yüksek lisans tezi], Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
 40. Celtek, M. S., & Pınarbaşı, A. 2018. Investigations on performance and emission characteristics of an industrial low swirl burner while burning natural gas, methane, hydrogen-enriched natural gas and hydrogen as fuels. **International Journal of Hydrogen Energy**, 43(2), 1194-1207.
 41. Samiran, N. A., Ng, J., Jafaar, M. N. M., Velara-Medina, A., Chong, C. T. 2016. H₂-rich syngas strategy to reduce NO_x and CO emissions and improve stability limits under premixed swirl combustion mode. **International Journal of Hydrogen Energy**, 41(42), 19243-19255.
 42. Joo, S., Kwak, S., Lee, M. C. 2021. Effect of fuel line acoustics on the flame dynamics of H₂/CH₄ syngas in a partially premixed gas turbine combustor. **Fuel**, 285, 119231.
 43. Zhang, K., Lupo, G., Duwig, C. 2021. Investigation of wet combustion instability due to bio-syngas fuel variability. **Fuel**, 285, 119120.
 44. [44] Çam, Ö. 2019. Sentetik yakıtların yanma kararsızlığının deneysel incelenmesi [Doktora tezi], Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
 45. Şaşmaz, E. 2015. Gaz türbinlerinde yanma kararsızlığının incelenmesi ve kontrol altına alınması [Yüksek lisans tezi], Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

46. Kümük, O. 2023. Yakıt olarak amonyak ve karışımlarını kullanan bir gaz türbini yanma odasının yanma ve emisyon özelliklerinin araştırılması [Doktora Tezi], Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
47. Hosseini, S. E., Wahid, M. A. 2014. Development of biogas combustion in combined heat and power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 40, 868-881.
48. Candan, G. 2021. Girdaplı bir yakıcıda dağıtılmış yanma tekniğinin alev stabilizasyonu ve NOX emisyonu üzerine etkileri [Yüksek lisans tezi], Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
49. Er, E. K. 2023. Ön karışımli bir yanma odasında propan-metan karışımlarının yanma davranışlarının deneysel araştırılması [Yüksek Lisans Tezi], Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
50. Sıpçık, C. 2023. Ön karışımli bir yanma odasında girdap üreteçlerinin propan yanma davranışları ve emisyon değerlerine etkisi [Yüksek Lisans Tezi], Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
51. Yılmaz, H., Çam, Ö., Yılmaz, İ. 2020. Experimental investigation of flame characteristics of H₂/CO/CH₄/CO₂ synthetic gas mixtures. **Combustion Science and Technology**.
52. Emadi, M., Kaufman, K., Burkhalter, M. W., Salameh, T., Gentry, T., Ratner, A. 2015. Examination of thermo-acoustic instability in a low swirl burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, 40, 13594-13603.
53. Yılmaz, H., Çam, Ö., Yılmaz, İ. 2020. Experimental investigation of flame instability in a premixed combustor. **Fuel**, 262, 116594.
54. Sankaran, R., Im, H. G. 2006. Effects of hydrogen addition on the Markstein length and flammability limit of stretched methane/air premixed flames. **Combustion Science and Technology**, 178(9), 1585-1611.
55. Huang, Y., Ratner, A. 2009. Experimental investigation of thermoacoustic coupling for low-swirl lean premixed flames. **Journal of Propulsion and Power**, 25(2), 365-373.
56. Yilmaz, I., Ratner, A., Ilbas, M., Huang, Y. 2010. Experimental investigation of thermoacoustic coupling using blended hydrogen–methane fuels in a low swirl burner. **International Journal of Hydrogen Energy**, 35(1), 329-336.

57. Wang, M., Zhong, Y., Deng, K. 2019. Experiment investigation of the effects of hydrogen content on the combustion instability of methane/hydrogen lean premixed swirl flames under different acoustic frequency ranges. **AIP Advances**, 9(4), 045014.
58. Yu, H., Hu, E., Cheng, Y., Yang, K., Zhang, X., Huang, Z. 2015. Effects of hydrogen addition on the laminar flame speed and Markstein length of premixed dimethyl ether–air flames. **Energy & Fuels**, 29(7), 4567-4575.
59. Kaufman, K., Emadi, M., Ratner, A. 2013. Effect of hydrogen addition to methane fuel in a low swirl burner. **In 8th U. S. National Combustion Meeting** (pp. 1957-1967). Utah, USA.
60. Tuncer, O., Acharya, S., Uhm, J. H. 2009. Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, 34(2), 496-506.
61. Ueno, S., & Harada, K. 1985. Effect of magnetic fields on flames and gas flow. **IEEE Transactions on Magnetics**, 21(5), 2004-2009.
62. Ueno, S., & Harada, K. 1987. Combustion process under strong DC magnetic fields. **IEEE Transactions on Magnetics**, 23(5), 2752-2754.
63. Ueno, S., Esaki, H., & Harada, R. 1987. Magnetic field effect on combustion. **IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan**, 2(9), 365-373.
64. Wakayama, N. 1991. Behavior of gas flow under gradient magnetic fields. **Journal of Applied Physics**, 69(4), 2734-2736.
65. Wakayama, N. 1992. Effect of a gradient magnetic field on the combustion of methane in air. **Chemical Physics Letters**, 188(3-4), 279-281.
66. Wakayama, N. 1993. Magnetic promotion of combustion in diffusion flames. **Combustion and Flame**, 93(1-2), 207-214.
67. Wakayama, N., Ito, H., Kuroda, Y., Fujita, O., & Ito, K. 1996. Magnetic support of combustion in diffusion flames under microgravity. **Combustion and Flame**, 107(3), 187-192.
68. Fujita, O., Ito, K., Chida, T., Nagai, S., & Takeshita, Y. 1998. Determination of magnetic field effects on a jet diffusion flame in a microgravity environment. **In Twenty-Seventh Symposium (International) on Combustion** (pp. 2573-2578). The Combustion Institute.

69. Morozov, Y. G., & Kuznetsov, M. V. 1999. Effect of magnetic fields on combustion electromotive force. **Combustion, Explosion and Shock Waves**, 35(1), 18-22.
70. Guo, H., Chen, Y., & Yao, R. 1986. A study of magnetic effects on the physicochemical properties of individual hydrocarbons. **IEEE Transactions on Magnetism**, 22(5), 337-345.
71. Baker, J., & Varagani, R. 2003. Models and experiments on laminar diffusion flames in non-uniform magnetic fields. **In Seventh International Workshop on Microgravity Combustion and Chemically Reacting Systems** (pp. 317-320).
72. Gilard, V., Gillon, P., Blanchard, J.-N., & Sarh, B. 2008. Influence of a horizontal magnetic field on a co-flow methane/air diffusion flame. **Combustion Science and Technology**, 180(10-11), 1920-1935.
73. Gao, J. C., Yang, X. G., Hu, S. T., Hong, Z. J., et al. 2022. Effect of external magnetic field on acetylene explosion reaction. **Explos. Shock Waves**, 42(7), 150-160.
74. Zharfa, M., & Karimi, N. 2021. Intensification of MILD combustion of methane and hydrogen blend by the application of a magnetic field - **A numerical study. Acta Astronautica**, 184, 259-268.
75. Zhang, Z., & Wei, Z. 2021. Experiment and simulation of the effects of non-uniform magnetic field on the regression rate of PMMA. **Combustion and Flame**, 223, 337-348.
76. Xie, Y., Wei, Z., Zhou, T., Zhen, H., Liu, Z., & Huang, Z. 2021. Combustion characteristics of small laminar flames in an upward decreasing magnetic field. **Energies**, 14(7), 1969.
77. Tung, H., Cédric, D., Anne, V., Agnès, J., & Gilles, L. 2010. A global tool for environmental assessment of roads—Application to transport for road building. **In European Conference of Transport Research Institutes, The Hague**.
78. Loskutova, O., Walker, T. R., Crittenden, P. D., Dauvalter, V. A., Jones, V., Kuhry, P., and Pystina, T., 2009. “Multiple indicators of human impacts on the environment in the Pechora Basin, north-eastern European Russia”. **Ecological indicators**, 9(4), 765-779.
79. Tao, R. 2004. Investigate effects of magnetic fields on fuels. Department of Physics, Temple University, Philadelphia.

80. Tao, R., & Xu, X. 2006. Reducing the viscosity of crude oil by pulsed electric or magnetic field. **Energy & Fuels**, 20(5), 2046-2051.
81. Chang, K. T., & Weng, C. I. 2006. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. **Journal of Applied Physics**, 100(4), 043917.
82. Saksono, N. 2005. Magnetising kerosene for increasing combustion efficiency. **Jurnal Teknologi**, 2, 155-162.
83. Kumar, M., Agarwal, S., Kumar, V., Khan, G., & Shakher, C. 2015. Experimental investigation on butane diffusion flame under the influence of magnetic field by using digital speckle pattern interferometry. **Applied Optics**, 54(9), 2450-2460.
84. Elamin, A. A., Ezeldin, M., Masaad, A. M., & Suleman, N. M. 2015. Effect of magnetic field on some physical characteristics and cetane number of diesel fuel. **American Journal of Applied Chemistry**, 3(6), 212-216.
85. Singh, A. 2015. Measurement of fuel flow behaviour of propane diffusion flame by dimensionless numbers under magnetic field application. **International Journal of Combined Research and Development**, 4, 585-586.
86. Wu, W., Qu, J., Zhang, K., & Chen, W. 2016. Experimental studies of magnetic effect on methane laminar combustion characteristics. **Combustion Science and Technology**, 188(11-12), 2038-2051.
87. Barmina, I., & Zake, M. 2016. Effects of magnetic field on swirling flame dynamics. **Engineering for Rural Development**, 15, 1295-1300.
88. Barmina, I., & Zake, M. 2017. Magnetic field control of combustion dynamics. **Latvian Journal of Physics and Technical Sciences**, 53(4), 36-46.
89. Barmina, I., Zake, M., Strautins, U., & Marinaki, M. 2017. Effects of gradient magnetic field on swirling flame dynamics. In **Engineering for Rural Development** (pp. 24-26).
90. Zhou, S., Gao, J., Luo, Z., Hu, S., Wang, L., & Wang, T. 2022. Role of ferromagnetic metal velvet and DC magnetic field on the explosion of a C₃H₈/air mixture - Effect on reaction mechanism. **Fuel**, 239, 122218.
91. Marouf, H. H., Elsemary, I. M., Abdel Rahim, A. A., & Abd Rabo, M. F. 2019. Effect of electromagnetic field on combustion of candle flame. **Engineering Research Journal**, 1(39), 18-22.

92. Perdana, D., Adiwidodo, S., Choifin, M., & Winarko, W. A. 2021. The effect of magnetic field variations in a mixture of coconut oil and jatropha on flame stability and characteristics on the premixed combustion. **EUREKA: Physics and Engineering**, 5, 13-22. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001996>
93. Perdana, D. 2023. The experimental of impact of additional magnetic fields and nitrogen pressure on olive oil droplet combustion. **Indonesian Journal of Applied Research (IJAR)**, 4(1), 1-10.
94. Perdana, D., Adiwidodo, S., Subagyo, & Winarko, W. A. 2022. The role of perforated plate and orientation of the magnetic fields on coconut oil premixed combustion. **Kinetika**, 8(1), 77-84.
95. Perdana, D., Yuliati, L., Hamidi, N., & Wardana, I. N. G. 2020. The role of magnetic field orientation in vegetable oil premixed combustion. **Journal of Combustion**.
96. Perdana, D., Setiawan, D. G., & Choifin, M. 2023. Experimental study on flame characteristics of premixed combustion of kapok oil with various magnetic field orientations. **SJME Kinematika**, 8(1), 1-10.
97. Iwata, N., Tsubuki, S., Takaki, Y., Watanabe, K., Sekiguchi, M., Hosoki, E., ... & Saido, T. C. 2000. Identification of the major A β 1–42-degrading catabolic pathway in brain parenchyma: Suppression leads to biochemical and pathological deposition. **Nature Medicine**, 6(2), 143-150.
98. Evdokimov, I. N., & Kornishin, K. A. 2009. Apparent disaggregation of colloids in a magnetically treated crude oil. **Energy & Fuels**, 23(8), 4016-4020.
99. Legros, G., Gomez, T., Fessard, M., Guibert, P., & Torero, J. 2010. Magnetically induced flame flickering. **Proceedings of the Combustion Institute**, 33, 1095-1103.
100. Jalali, M., Ahmadi, M., Yadaei, F., Azimi, M., & Hoseini, H. 2013. Enhancement of benzene combustion behaviour in exposure to the magnetic field. **Journal of Clean Energy Technologies**, 1, 224-227.
101. Ugare, V., Dhoble, A., Lutade, S., & Mudafale, K. 2014. Performance of internal combustion (CI) engine under the influence of strong permanent magnetic field. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, 3, 11-17.

102. Agarwal, A. K., Gupta, T., Shukla, P. C., & Dhar, A. 2015. Particulate emissions from biodiesel fuelled CI engines. **Energy Conversion and Management**, **94**, 311-330.
103. Morsi, K. 2017. Combustion synthesis and the electric field: A review. **International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis**, **26**(3), 199-209.
104. Boben, R. R., Ramnath, V., & Lyons, K. M. 2018. Effect of moderate-strength magnetic field on local temperature in diffusion flames. **Aeronautics and Aerospace Open Access Journal**, **2**(4), 250-257.
105. Agarwal, S., & Shakher, C. 2018. Effect of magnetic field on temperature profile and flame flow characteristics of micro flame using Talbot interferometer. **Optik - International Journal for Light and Electron Optics**, **168**, 817-826.
106. Di Renzo, M., Urzay, J., De Palma, P., de Tullio, M. D., & Pascazio, G. 2018. The effects of incident electric fields on counterflow diffusion flames. **Combustion and Flame**, **193**, 177-191.
107. Ramnath, V., & Lyons, K. M. 2018. The potential of simple, low-cost permanent magnets for flame manipulation in flow fields. **Aeronautics and Aerospace Open Access Journal**, **2**(1).
108. Govindasamy, P., & Dhandapani, S. 2007. Performance and emissions achievements by magnetic energizer with a single cylinder two stroke catalytic coated spark ignition engine. **International Journal of Automotive Technology**, **8**(5), 533-542.
109. Govindasamy, P., & Dhandapani, S. 2007, December. Experimental investigation on the effect of magnetic flux to reduce emissions and improve combustion performance in a two-stroke, catalytic-coated, spark-ignition engine. **In GMSARN International Conference on Sustainable Development: Challenges and Opportunities for GMS** (Vol. 14).
110. Govindasamy, P., & Dhandapani, S. 2007. Reduction of NO_x emission in bio diesel engine with exhaust gas recirculation and magnetic fuel conditioning. **In GMSARN International Conference on Sustainable Development: Challenges and Opportunities for GMS** (Vol. 14).
111. Fatih, F., & Saber, G. 2010. Effect of fuel magnetism on engine performance and emissions. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, **4**, 6354-6358.

112. Faris, A. S., Al-Naseri, S. K., Jamal, N., Isse, R., Abed, M., Fouad, Z., ... & Jasim, H. 2012. Effects of magnetic field on fuel consumption and exhaust emissions in two-stroke engine. **Energy Procedia**, 18, 327-338.
113. Habbo, A. R. A., Khalil, R. A., & Hammoodi, H. S. 2011. Effect of magnetizing the fuel on the performance of an SI engine. **AL-Rafdain Engineering Journal (AREJ)**, 19(6), 84-90.
114. Jain, S., & Deshmukh, S. 2012. Experimental investigation of magnetic fuel conditioner in IC engine. **IOSR Journal of Engineering**, 2, 27-31.
115. Siregar, H., & Nainggolan, R. 2012. Electromagnetic fuel saver for enhancing the performance of the diesel engine. **Global Journal of Research in Engineering, Mechanical and Mechanics Engineering**, 12.
116. Ünaldı, M. 2006. Benzinli araçlarda manyetik alan etkisindeki hava/yakıt karışımının emisyonlara etkisi [Yüksek lisans tezi]. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
117. Demirtaş, Ö. F. 2021. İçten yanmalı motorlarda yakıtı manyetik alan uygulamasının yakıt ekonomisine ve egzoz emisyonuna etkisi [Yüksek lisans tezi]. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
118. Attar, A. R., Tipole, P., Bhojwani, V., & Deshmukh, S. 2013. Effect of magnetic field strength on hydrocarbon fuel viscosity and engine performance. **International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications**, 1(7), 94-98.
119. Garg, R., & Agarwal, A. (2013). Fuel energizer: The magnetizer (A concept of liquid engineering). **International Journal of Innovative Research & Development**, 2, 617-627.
120. Vijayakumar, P., Patro, S., & Pudi, V. 2014. Experimental study of a novel magnetic fuel ionization method in four stroke diesel engines. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, 3, 151-159.
121. Abd-Allah, G. H. 2001. Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: A review. **Energy Conversion and Management**, 43, 1027–1042.
122. Patel, P. M., Rathod, G. P., & Patel, T. M. 2014. Effect of magnetic field on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine. **IOSR Journal of Engineering**, 4(5), 28-34.

123. Khedvan, A., & Gaikwad, V. 2015. Review on effect of magnetic field on hydrocarbon refrigerant in vapour compression cycle. **International Journal of Scientific Engineering and Technology Research**, 4, 1374-1378.
124. Kacem, S. A., Ferdaouss, L., Abrerrahim, L., & Mohammed, B. 2016. Evaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualite des eaux souterraines de la nappe du Gharb. **European Scientific Journal**, 12(11).
125. Gabiña, G., Basurko, O. C., Notti, E., Sala, A., Aldekoa, S., Clemente, M., & Uriondo, Z. 2016. Energy efficiency in fishing: Are magnetic devices useful for use in fishing vessels? **Applied Thermal Engineering**, 94, 670-678.
126. Uzunsoy, E. 1998. Manyetik alan etkisine maruz kalmış benzinin motor performansı üzerine etkisi [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
127. Balo, F. 2002. İçten yanmalı motorlarda manyetik alanın yakıt ekonomisine ve emisyonlara etkisi [Yüksek lisans tezi]. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
128. Gad, M. S. 2016. Assessment of biodiesel derived from waste cooking oil as an alternative fuel for diesel engines. **International Journal of ChemTech Research**, 9(3), 140-146.
129. Chen, C., Lee, W., Mwangi, J., Wang, L., & Lu, J. 2017. Impact of magnetic tube on pollutant emissions from the diesel engine. **Aerosol and Air Quality Research**, 17, 1097-1104.
130. Attar, A. R., Tipole, P., Bhojwani, V., & Deshmukh, S. 2013. Effect of magnetic field strength on hydrocarbon fuel viscosity and engine performance. **International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications**, 1(7), 94-98.
131. Kurji, H. J., & Imran, M. S. 2018. Magnetic field effect on compression ignition engine performance. **ARP Journal of Engineering and Applied Sciences**, 13(12), 3943-3949.
132. Sahoo, R. R., & Jain, A. 2019. Experimental analysis of nanofuel additives with magnetic fuel conditioning for diesel engine performance and emissions. **Fuel**, 236, 365-372.
133. Niaki, S. O. D., Khatamnejad, H., Khalilarya, S., Jafarmadar, S., Mirsalim, M., & Gharehghani, A. 2019. Experimental investigation on the effect of natural gas

- premixed ratio on combustion and emissions in an IDI engine. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 138(6), 3977-3986.
134. Oommen, L. P., & Narayanappa, K. G. 2021. Assimilative capacity approach for air pollution control in automotive engines through magnetic field-assisted combustion of hydrocarbons. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, 63661–63671.
 135. Oommen, L. P., Narayanappa, K. G., & Vijayalakshmi, S. K. 2020. Experimental analysis of synergetic effect of part-cooled exhaust gas recirculation on magnetic field-assisted combustion of liquefied petroleum gas. **Arabian Journal for Science and Engineering**.
 136. Oommen, L. P., & Kumar, G. N. 2020. Influence of magneto-combustion on regulated emissions of an automotive engine under variable speed operation. **International Journal of Vehicle Structures & Systems**, 12(1), 109-112.
 137. Oommen, L. P., & Kumar, G. N. 2023. Analysis of cyclic variations and combustion behavior of liquid phase hydrocarbons under uniform axial and radial magnetic fields. In Edwin Geo, V., & Aloui, F. (Eds.), Energy and exergy for sustainable and clean environment, Volume 2. **Green Energy and Technology. Springer, Singapore**.
 138. Oommen, L. P., & Kumar, G. N. 2022. Experimental analysis of conjoint effect of semi-cooled exhaust recirculation on combustion of liquid phase hydrocarbons under uniform magnetic fields. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 47, 16049–16057.
 139. Pawar, N. R., & Hudgikar, S. R. K. 2021. Performance enhancement of multi-cylinder four stroke SI engine under the effect of magnetic field. In Pawar, P. M., Balasubramaniam, R., Ronge, B. P., Salunkhe, S. B., Vibhute, A. S., & Melinamath, B. (Eds.), **Techno-Societal 2020. Springer, Cham**.
 140. Karakoç, H. 1997. Uçaklarda gaz türbinli motorların yakıt sistemleri. Anadolu Üniversitesi Yayınları No: 984.
 141. Amanda, M., & Clark, C. 2023. Exothermic and endothermic reaction characteristics and operation methods of integrated combustion-reforming reactors. **Preprints**.
 142. Tantardini, C., & Oganov, A. R. 2021. Thermochemical electronegativities of the elements. **Nature Communications**.

143. Mishra, D. P. 2014. Experimental combustion: An introduction. **CRC Press**.
144. Kohse-Höinghaus, K. (2023). Combustion, chemistry, and carbon neutrality. **Chemical Reviews**.
145. Jenkins, B., & Mullinger, P. 2023. The combustion process. In B. Jenkins & P. Mullinger (Eds.), Industrial and process furnaces (3rd ed., pp. 31-63). **Butterworth-Heinemann**.
146. Turns, S. R. 1996. An introduction to combustion (Vol. 287). McGraw-Hill.
147. Law, C. K. 2010. Combustion physics. Cambridge University Press.
148. Lee, H., Wu, B., Dai, P., Wan, M., & Lipatnikov, A. 2023. Turbulent burning velocity and thermo-diffusive instability of premixed flames. **Fluid Dynamics**.
149. Mahdipour, A. H., & Salehi, M. 2021. A priori evaluation of the laminar flamelet decomposition model for turbulent premixed flames using DNS data. **Flow, Turbulence and Combustion**.
150. Cao, D., He, G., Qin, F., & Michaels, D. 2019. Local supersonic and subsonic combustion mode transition in a supersonic jet flame. **Proceedings of the Combustion Institute**.
151. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. 2008. Kimyasal tepkimeler. In A. Pınarbaşı (Çev. Ed.), Termodinamik: Mühendislik yaklaşımıyla (5. baskı, Bölüm 15). McGraw-Hill.
152. Lackner, M., Palotas, A. B., & Winter, F. 2013. Combustion: From basics to applications. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
153. Griffiths, J. F., & Barnard, J. A. 1995. **Flame and combustion** (3rd ed.). CRC Press.
154. Glassman, I., Yetter, R. A., & Glumac, N. G. 2014. **Combustion** (4th ed.). Elsevier.
155. Zinn, B. T., & Lieuwen, T. C. 2005. Combustion instabilities: Basic concepts. In T. C. Lieuwen & V. Yang (Eds.), Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling (pp. 3-24). **American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.**
156. Lieuwen, T., McDonell, V., Santavicca, D., & Sattelmayer, T. 2008. Burner development and operability issues associated with steady flowing syngas fired combustors. **Combustion Science and Technology**, 180(6), 1169-1192.
157. Goy, C. J., James, S. R., Rea, S., Lieuwen, T., & Yang, V. 2005. Monitoring combustion instabilities: E. ON UK's experience. In T. C. Lieuwen & V. Yang

- (Eds.), *Combustion Instabilities in Gas Turbine Engines: Operational Experience, Fundamental Mechanisms, and Modeling* (pp. 163-175). **American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.**
158. Noble, B., Emerson, B., Angello, L., & Lieuwen, T. 2016. Advanced gas turbine combustor health monitoring using combustion dynamics data. **In 59th ISA POWID/EPRI Symposium, 27 June-1 July, Cleveland, Ohio USA** (pp. 1-12).
 159. Higgins, B. 1802. On the sound produced by a current of hydrogen gas passing through a tube. **Journal of Natural Philosophy, Chemistry and the Arts**, 1(129-131), 2.
 160. Hathout, J. P. 1999. Thermoacoustic instability: Fundamentals and modeling in combustion. Course No. 2280, Reacting Gas Dynamics Computational Lab, Department of Mechanical Engineering, MIT, Cambridge.
 161. Plavnik, G. 2006. Pulse combustion technology. **In 14th North American Waste to Energy Conference, Tampa, Florida USA** (pp. 143-148).
 162. Tyndall, J. 1897. *Sound*. D. Appleton & Company.
 163. Rijke, P. L. 1859. Notice of a new method of causing a vibration of the air contained in a tube open at both ends. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 17(116), 419-422.
 164. Richards, G. A., & Lee, G. T. 1996. Gas turbine combustion instability. CONF-9605160-9605164. **Technical Meeting of the Central Section of the Combustion Institute**, 5-7 May, St. Louis, Missouri, USDOE Morgantown Energy Technology Center.
 165. Poinso, T. 2017. Prediction and control of combustion instabilities in real engines. **Proceedings of the Combustion Institute**, 36(1), 1-28.
 166. Culick, F. E. 2004. Combustion instabilities in solid propellant rocket motors. **In RTO/VKI Special Course on Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion**, 27-31 May, Rhode-Saint-Genèse, Belgium, California Institute of Technology.
 167. Nair, S. 2006. Acoustic characterization of flame blowout phenomenon [Doktora tezi]. Georgia Institute of Technology.
 168. Ducruix, S., Schuller, T., Durox, D., & Candel, S. 2003. Combustion dynamics and instabilities: Elementary coupling and driving mechanisms. **Journal of Propulsion and Power**, 19(5), 722-734.

169. Straub, D. L., & Richards, G. A. 1998. Effect of fuel nozzle configuration on premix combustion dynamics. **In ASME 1998 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition**, 2-5 June, American Society of Mechanical Engineers.
170. Kieseewetter, F., Hirsch, C., Fritz, J., Kroner, M., & Sattelmayer, T. 2003. Two-dimensional flashback simulation in strongly swirling flows. **In ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Generation Conference**, American Society of Mechanical Engineers (pp. 293-300).
171. Thibaut, D., & Candel, S. 1998. Numerical study of unsteady turbulent premixed combustion: Application to flashback simulation. **Combustion and Flame**, **113(1-2)**, 53-65.
172. Lieuwen, T., McDonell, V., Santavicca, D., & Sattelmayer, T. 2010. Operability issues associated with steady flowing combustors. In *Synthesis gas combustion, fundamentals and application* (pp. 261-288). Taylor & Francis Group.
173. Lefebvre, A. H., & Ballal, D. R. 2010. *Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions*. CRC Press.
174. Fire Science Tools. 2011. Premixed flame blowoff vs flashback in slow motion. (Erişim Tarihi: 23/04/2024).
175. Benim, A. C., & Syed, K. J. 2015. *Flashback mechanisms in lean premixed gas turbine combustion*. Academic Press.
176. Heckl, M. A. 2023. Sustainable combustion technologies need acoustics research. NOISE-CON proceedings.
177. Piccone, A. 2022. Optimizing combustion systems to mitigate thermoacoustic instabilities. Scilight.
178. Troll, M., Shi, W., Stark, C., & Atlar, M. 2022. Vortex dynamics impact on the wake flow of a marine rudder with leading-edge tubercles. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**.
179. Kundu, K., Banerjee, D., & Bhaduri, D. 1977. Theoretical analysis on flame stabilization by a bluff-body. **Combustion Science and Technology**, **17(3-4)**, 153-162.
180. Longwell, J. P., Frost, E. E., & Weiss, M. A. 1953. Flame stability in bluff body recirculation zones. **Industrial & Engineering Chemistry**, **45(8)**, 1629-1633.

181. Williams, F. 1966. Flame stabilization of premixed turbulent gases. *Applied Mechanics Surveys*, 1157-1170.
182. Oates, G. C. 1997. *Aerothermodynamics of gas turbine and rocket propulsion. American Institute of Aeronautics and Astronautics.*
183. Mishra, R., Kishorekumar, S., & Chandel, S. 2015. Investigation of flame blowout in a low bypass military turbofan engine. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, 15, 227-232.
184. MacArt, J. F., & Mueller, M. E. 2021. Damköhler number scaling of active cascade effects in turbulent premixed combustion. **Physics of Fluids**.
185. Hampp, F., Shariatmadar, S., & Lindstedt, R. P. 2019. Quantification of low Damköhler number turbulent premixed flames. *Proceedings of the Combustion Institute*.
186. Hampp, F., & Lindstedt, R. P. 2018. Quantification of external enthalpy-controlled combustion at unity Damköhler number. **In Energy and exergy for sustainable and clean environment**, Volume 2. Green Energy and Technology. Springer, Singapore.
187. Chakraborty, N., & Lipatnikov, A. 2013. Conditional velocity statistics for high and low Damköhler number turbulent premixed combustion in the context of Reynolds Averaged Navier Stokes simulations. *Proceedings of the Combustion Institute*.
188. Caetano, N., Cunha, A., Novgorodcev, A. R., & Silva, L. F. F. 2009. Combustion regime identification on a bluff-body burner by using experimental PLIF-OH images and RANS numerical simulations.
189. Yılmaz, B. 2013. Metan-hava yanmasının HAD analizleri ile incelenmesi. **MMO Tesisat Mühendisliği Dergisi**, 134, 5-12.
190. Bloxham, M. 2006. Predicting lean blowout using the Damköhler number.
191. Wang, Z., Hu, B., Deng, A., Zhang, J., & Zhao, Q. 2019. Predicting lean blow-off of bluff-body stabilized flames based on Damköhler number. **Chinese Journal of Aeronautics**, 32(2), 308-323.
192. Smith, M. J. 2004. *Aircraft noise*. Cambridge University Press.
193. Strahle, W. C. 1971. On combustion generated noise. **Journal of Fluid Mechanics**, 49(2), 399-414.

194. Talei, M., Brear, M. J., & Hawkes, E. R. 2014. A comparative study of sound generation by laminar, combusting and non-combusting jet flows. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, 28(4), 385-408.
195. Dowling, A. P., & Stow, S. R. 2003. Acoustic analysis of gas turbine combustors. **Journal of Propulsion and Power**, 19(5), 751-764.
196. Lieuwen, T. 2003. Modeling premixed combustion-acoustic wave interactions: A review. **Journal of Propulsion and Power**, 19(5), 765-781.
197. Schwarz, A., & Janicka, J. 2009. Combustion noise. **Springer Science & Business Media**
198. Aimee, S. M. 2017. Thermoacoustic instabilities. **In Combustion SIG Meeting**
199. Williams, F. A. 2018. Combustion theory: The fundamental theory of chemically reacting flow systems (2nd ed.). **The Benjamin/Cummings Publishing Company**.
200. Fritsche, D. 2005. Origin and control of thermoacoustic instabilities in lean premixed gas turbine combustion [Doktora tezi]. ETH Zurich.
201. Wiecek, K. 2010. Numerical study of Mach number effects on combustion instability [Doktora tezi]. University of Montpellier II, Montpellier, France.
202. Hathout, J. P., Fleifil, M., Rumsey, J. W., Annaswamy, A. M., & Ghoniem, A. F. 1997. Model-based analysis and design of active control of thermoacoustic instability. **In Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Control Applications** (pp. 830-835). IEEE.
203. Fu, C., Tan, W., & Liu, J. 2008. IMC control of combustion instability. **In 2008 27th Chinese Control Conference** (pp. 39-43). IEEE.
204. Deshmukh, N. N., Ansari, A., Degwekar, S., Paul, B. T., & Unnikrishnan, R. 2023. Effect of geometrical parameters and use of porous material in a Helmholtz resonator on suppression of thermo-acoustic instabilities. **International Journal of Spray and Combustion Dynamics**.
205. Barhdadi, F. Z. 2022. Effect of Helmholtz resonator shape on suppression of thermo-acoustic instability. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**.
206. Bulat, G. 2014. Helmholtz resonator for a gas turbine combustion chamber (US Patent No. 8,689,933). United States Patent and Trademark Office.

207. Eldredge, J. D., & Dowling, A. P. 2003. The absorption of axial acoustic waves by a perforated liner with bias flow. **Journal of Fluid Mechanics**, 485, 307-335.
208. Rupp, J., Carrotte, J., & Macquisten, M. 2012. The use of perforated damping liners in aero gas turbine combustion systems. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 134(7).
209. Kiser, J. D., Miller, C. J., Hultgren, L. S., Grady, J. E., & Jones, M. G. (2013). Compact, lightweight, ceramic matrix composite based acoustic liners for reducing subsonic jet aircraft engine noise. **In 37th Annual Conference on Composites, Materials, and Structures**, 28-29 January, Cocoa Beach / Cape Canaveral, Florida.
210. Anderson, W. E., & Yang, V. (1995). Liquid rocket engine combustion instability. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**.
211. Park, I. S., & Sohn, C. H. (2010). Nonlinear acoustic damping induced by a half-wave resonator in an acoustic chamber. **Aerospace Science and Technology**, 14(6), 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2010.03.004>
212. Sohn, C. H., & Park, J. H. (2011). A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter-wave, and Helmholtz resonators. **Aerospace Science and Technology**, 15(8), 606-614. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2010.12.008>
213. Kim, Y. J., Lee, D. K., & Kim, Y. (2018). Experimental study on combustion instability and attenuation characteristics in the lab-scale gas turbine combustor with a sponge-like porous medium. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 32(4), 1879-1887. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0357-7>
214. Culick, F. E. (1981). Combustion instability in solid rocket motors. Volume 2. A guide for motor designers. Chemical Propulsion Information Agency.
215. Oefelein, J. C., & Yang, V. (1993). Comprehensive review of liquid-propellant combustion instabilities in F-1 engines. **Journal of Propulsion and Power**, 9(5), 657-677. <https://doi.org/10.2514/3.23630>
216. Harrje, D. T., & Reardon, F. H. (1972). Liquid propellant rocket combustion instability (NASA SP-194). NASA.
217. Annaswamy, A. M., Fleifil, M., Rumsey, J. W., Prasanth, R., Hathout, J., & Ghoniem, A. F. (2000). Thermoacoustic instability: Model-based optimal

- control designs and experimental validation. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, 8(6), 905-918. <https://doi.org/10.1109/87.880605>
218. Annaswamy, A. M., & Ghoniem, A. F. (2002). Active control of combustion instability: Theory and practice. **IEEE Control Systems Magazine**, 22(6), 37-54. <https://doi.org/10.1109/MCS.2002.1041221>
 219. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). Thermodynamics: An engineering approach (8th ed.). McGraw-Hill Education.
 220. Hucksall, D. J. (1985). Chemistry of hydrocarbon combustion. **Springer** Netherlands.
 221. Keating, E. L. (2007). Applied combustion (2nd ed.). CRC Press.
 222. Huth, M., & Heilos, A. (2013). Fuel flexibility in gas turbine systems: Impact on burner design and performance. In P. Jansohn (Ed.), Modern gas turbine systems (pp. 635-684). **Woodhead Publishing**. <https://doi.org/10.1533/9780857096067.2.635>
 223. Van den Schoor, F., Hermanns, R. T. E., van Oijen, J. A., Verplaetsen, F., & de Goey, L. P. H. (2008). Comparison and evaluation of methods for the determination of flammability limits, applied to methane/hydrogen/air mixtures. **Journal of Hazardous Materials**, 150(3), 573-581. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.007>
 224. Tuncer, O., Acharya, S., & Uhm, J. H. (2009). Dynamics, NO_x and flashback characteristics of confined premixed hydrogen-enriched methane flames. **International Journal of Hydrogen Energy**, 34, 496-506. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.002>
 225. Yao, Q. (2023). Study on flue gas waste heat utilization system optimization of a new 1000MW unit. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1171/1/012015>
 226. Garifullina, C. A., Khaliullin, T. F., Indrupskiy, I. M., Valiullin, I. V., Zalyatdinov, A. A., Burlutskiy, E. A., Sadreeva, R. Kh., Aflyatunov, R. R., & Kashapov, I. Kh. (2022). Experience in research and injection of flue gases into oil fields to increase oil recovery. **Georesursy = Georesources**, 24(3), 149-163. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.13>

227. Sayekti, A. L. (2022). Emission characteristics of flue gas during the chemical-looping combustion process for multi-component solid waste. **Clean Energy**. <https://doi.org/10.1093/ce/zkac065>
228. Sharaf, J. (2013). Exhaust emissions and its control technology for an internal combustion engine. **International Journal of Engineering Research and Applications**, 3(4), 947-960.
229. European Commission, Horizon 2020, Competitive Low-Carbon Energy. European Commission. <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/competitive-low-carbon-energy> (Erişim tarihi: 29. 04.2024).
230. Merlo, N., Boushaki, T., Chauveau, C., Persis, S., Pillier, L., Sarh, B., & Gökalp, I. 2013. Experimental study of oxygen enrichment effects on turbulent nonpremixed swirling flames. **Energy & Fuels**, 27(10), 6191-6197.
231. Wang, Y. 2023. Efficiencies in power plant. **In Practical handbook of thermal fluid science** (1st ed., p. 102).
232. Jouhara, H., Marderos, A., & Sayegh, K. 2018. Energy efficient thermal systems and processes. **Thermal Science and Engineering Progress**.
233. Rajendran, K., Ling-Chin, J., Anthony, P., & Roskilly, T. 2015. Thermal energy efficiency in industrial processes.
234. Fakheri, A. 2006. Thermal efficiency of the cross flow heat exchangers. **In Proceedings of the ASME 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Heat Transfer**, Volume 1 (pp. 645-651). Chicago, Illinois, USA.
235. Jiles, D. 1991. Introduction to magnetism and magnetic materials. Chapman and Hall.
236. Ulaby, F. T. 2001. Fundamentals of applied electromagnetics. Prentice Hall.
237. Ueno, S., & Harada, K. 1986. Experimental difficulties in observing the effect of magnetic fields on biological and chemical processes. **IEEE Transactions on Magnetism**, 22(5), 868-873.
238. Nayyar, N. 1998. Combustion efficiency with magnetism. **Metallurgia**, 65(7), 233-234.
239. Muhammed, U. 2018. Magnetic field. Collection date March 10, 2018.
240. Bonnor, W. B., & Ward, J. P. 1972. The field of charged, spinning, magnetic particles. **Communications in Mathematical Physics**.

241. Moosa, I. S. (2014). History and development of permanent magnets. **International Journal For Research & Development in Technology**, 2(1), 18-26.
242. Yuksel, C., Ankarali, S., & Yuksel, N. A. (2018). The use of neodymium magnets in healthcare and their effects on health. *Northern Clinics of İstanbul*, 5(3), 268-274.
243. Du, X., & Graedel, T. E. 2011. Global rare earth in-use stocks in NdFeB permanent magnets. **Journal of Industrial Ecology**, 15(6), 836-843.
244. Chaware, K., Basavaraj, M., & Walke, P. 2015. Effect of fuel magnetism by varying intensity on performance and emission of single cylinder four stroke diesel engine. **International Research Journal of Engineering and Technology**, 2(7), 1121-1126.
245. Sawant, D. R. M. V. S. A. 2015. Comparative analysis of influence of magnetic field on fuel consumption in internal combustion engine. **International Journal for Scientific Research & Development**, 3(8), 557-559.
246. Somov, B. V. 2013. Magnetohydrodynamics in astrophysics.
247. Landau, L. D., & Lifshitz, E. M. 1984. Chapter VIII – Magnetohydrodynamics.
248. Lee, P. A., & Bachman, M. 2002. Magnetohydrodynamic fluidic system. U.S. Patent No. 6,357,370. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
249. Ishak, B. 2017. Introduction to modern magnetohydrodynamics, by Sébastien Galtier. **Contemporary Physics**.
250. All, A, 2022. Magnetic field effects on diffusion flames.
251. Waykole, N. T., Koli, T. A., & Patil, V. H. 2017. A review on effect of magnetic field to improve fuel consumption in S.I. engine. **International Journal of Advanced Electronics and Communication Systems**.
252. Russell, J. C. 2012. Magnetically managed combustion.
253. Ying, H. L., & Abdou, M. A. 2002. 3D MHD free surface fluid flow simulation based on magnetic-field induction equations. **Fusion Engineering and Design**, 63-64, 361-368.
254. Camacho, J. M., & Sosa, E. 2013. Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry. **Revista Mexicana De Física E**, 59, 8-17.

255. Huang, H. L., & Abdou, M. A. 2002. 3D MHD free surface fluid flow simulation based on magnetic-field induction equations. **Fusion Engineering and Design**, 63-64, 361-368.
256. Oommen, L. P., & Kumar, G. N. 2019. A study on the effect of magnetic field on the properties and combustion of hydrocarbon fuels. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)**, 9(3), 89-98.
257. Fan, K. N. 2011. Introduction to spectroscopes. **Higher Education Press**, 112-122.
258. Xu, G. Z. 1978. Fundamental principles of electron spin resonance spectroscopy. **China Science Press**, 1-4.
259. MKS Series 946, Vacuum System Controller: Operation and Maintenance Manual. **MKS Technology and Productivity**, HPS Products, 134.
260. Nemitallah, M. A., Abdelhafez, A. A., & Habib, M. A. 2020. Approaches for clean combustion in gas turbines. **Springer International Publishing**, 417.
261. Palies, P., Durox, D., Schuller, T., & Candel, S. 2010. The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames. **Combustion and Flame**, 157(9), 1698-1717.
262. Spangelo, Ø. 2004. Experimental and theoretical studies of a low NO_x swirl burner [Doktora tezi]. Norwegian University.
263. Siemens. 2015. Brülör Kontrolleri LME Series 7.101. Siemens AG Building Technologies Division.
264. Technical document of flue gas emissions measurement. MRU Instruments Nova Plus RCU.
265. Ładyżyńska-Kozdraś, E., Sibilska-Mroziewicz, A., & Czubaj, S. 2018. Experimental measurement of magnetic field generated by neodymium magnet. In T. Březina & R. Jabłoński (Eds.), *Mechatronics 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 644, pp. 751-760). Springer, Cham.
266. C. Diao, W. Zhao, C. Liu and M. Tian, "Analytical Calculation of Magnetic Field for Permanent Magnet Synchronous Machine with Hybrid Magnets," 2023 **26th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, **Zhuhai, China**, 2023, pp. 4832-4836.
267. Ball, M., & Wietschel, M. 2009. The future of hydrogen - opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**, 34(2), 615-627.

268. Oommen, L. P., & Kumar, G. N. 2020. Experimental studies on the influence of axial and radial fields of sintered neo-delta magnets in reforming the energy utilization combustion and emission properties of a hydrocarbon fuel. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**.
269. Shinoda, M., Yamada, E., Kajimoto, T., Yamashita, H., & Kitagawa, K. 2005. Mechanism of magnetic field effect on OH density distribution in a methane-air premixed jet flame. **Proceedings of the Combustion Institute**, 30(1), 277-284.
270. Baker, J., & Calvert, M. E. 2003. A study of the characteristics of slotted laminar jet diffusion flames in the presence of non-uniform magnetic fields. **Combustion and Flame**, 133(3), 345-357.
271. Swaminathan, S. 2005. Effects of magnetic field on micro flames (Master's thesis). Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Department of Mechanical Engineering.
272. Amini Niaki, S. R., Gholi Zadeh, F., Amini Niaki, S. B., Mouallem, J., & Mahdavi, S. 2019. Experimental investigation of effects of magnetic field on performance, combustion and emission characteristics of a spark ignition engine. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 39.
273. Gantenbein A, Kröcher O, Biollaz SMA and Schildhauer TJ 2022. TechnoEconomic Evaluation of Biological and Fluidised-Bed Based Methanation Process Chains for Grid-Ready Biomethane Production. **Front. Energy Res.** 9:775259.
274. Frank, Errickson., Frank, Errickson., Klaus, Keller., William, D., Collins., William, D., Collins., Vivek, Srikrishnan., Vivek, Srikrishnan., David, Anthoff. 2021. Equity is more important for the social cost of methane than climate uncertainty. **Nature**.
275. Dorothy, L, Robinson., V., H., Oddy. 2016. Benefits of including methane measurements in selection strategies. **Journal of Animal Science**,
276. Neelameggham, N.R., Subramanian, G., Kalameggham, P. 2022. Thermoeconomics and Dynamics of Orange Hydrogen Production, an Energy Matter. In: Tesfaye, F., et al. REWAS 2022: Energy Technologies and CO2 Management (Volume II). **The Minerals, Metals & Materials Series. Springer**, Cham.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Ozan ÖZTÜRK
Uyruğu: Türkiye (Türk-T.C)
Doğum Tarihi ve Yeri:
Medeni Durum:
E-posta:
Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Sivil Havacılık ABD	2011
Lisans	SDÜ, Fizik (ve Havacılık Elektrik ve Elektronik)	2006
Lise	Keçiören Lisesi, Ankara	2001

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-Halen	Muğla Sıtkı Koçman Üniv., Uçak Gövde Motor Bakım	Öğr. Gör.
2019-2019	Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Uçak Teknolojisi	Öğr. Gör.
2017-2018	Girne Amerikan Üniversitesi, Havacılık Yönetimi	Arş. Gör.
2014-2019	Atılım Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakım	Öğr. Gör.
2014-2017	Selçuk Üniversitesi, Uçak Gövde Motor Bakım	Öğr. Gör.
2014-2014	Ataşehir Adıgüzel MYO, Kabin Hizmetleri	Öğr. Gör.
2012-2013	Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Uçak Teknolojisi	Öğr. Gör.
2011-2012	Kapadokya Üniversitesi, Uçak Teknolojisi	Öğr. Gör.
2009-2011	Çankaya Üniversitesi, Matematik ve Bilgisayar Bölümü	Lab. Sorumlusu

YABANCI DİL

İngilizce, Rusça

YAYINLAR

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler (SCI, SSCI, Arts and Humanities)

1. Taştan, M., Ozturk, O., Alabaş, B., Mutlu, K., & Yılmaz, İ., (2024). Experimental investigation of the effect of the electromagnetic field on the stability of the hydrogen enriched methane flame under acoustic enforcement. *Energy Sources Part A-Recovery Utilization and Environmental Effects*, vol.46, no.1, 5290-5305.

Uluslararası Diğer Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Öztürk, O., & Taştan, M. (2024). A review of magnetic field assisted combustion. *International Journal of Energy Studies*, 9(1), 175-198. <https://doi.org/10.58559/ijes.1412125>
2. Öztürk, O., & Taştan, M. (2024). 2015-2021 Yılları Arasında Muğla İlinde LTO Döngüsü Esnasında B737-800 ve A320 Tip Uçaklardan Kaynaklanan Emisyonun Gerçek Zamanlı Hesaplanması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 40(1), 20-33.
3. Abay, Ş., & Öztürk, O. (2024). Havayolu Yolcularının Pandemi Sürecinde Havayolu İşletmelerinin Sunduğu Çevrimiçi Hizmetlere İlişkin Tutum ve Niyetlerinin Teknoloji Kabul Modeli ile İncelenmesi. *Journal of Aerospace Science and Management*, 2(1), 1-20.
4. Öztürk, O., & Göktepe, H. (2024). Modern Havacılık Sektöründe Alternatif Enerji Kaynakları: Sürdürülebilirlik Hedeflerine Doğru Adımlar. *Journal of Aerospace Science and Management*, 2(1), 21-42.
5. Kaplan, Ş., Yener, E. S., Yılmaz, Z., Öztürk, O. (2024). Evaluation of digital solutions for passenger attitudes towards health measures at Dalaman airport during COVID-19 period. *International Journal of Aeronautics and Astronautics*, 5(1), 1-9. <https://doi.org/10.55212/ijaa.1407733>

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Öztürk, O., & Yılmaz, İ., & Alabaş, B. (2021). Experimental Investigation of the Effect of the Electromagnetic Field on The CH₄ Flame. *Proceedings of the 8th International Conference on Renewable Fuels, Combustion and Fire (FCE'21)*.
2. Öztürk, O., & Köklü, F., & Can, D. (2020). The Importance of Quality Management in Aircraft Maintenance Area. *Proceedings of the 3rd International Erciyes Scientific Research Congress*.
3. Öztürk, O., & Köklü, F., & Can, D. (2020). Evaluation of Training Hangars Used in Aviation System in Terms of Occupational Health and Safety. *Proceedings of the 3rd International Erciyes Scientific Research Congress*.
4. Öztürk, O., & Yıldız, M. (2019). A Methodology for Calculating Emissions of An Aircraft Throughout Its Flight Phases. *Proceedings of the International Symposium on Electric Aviation and Autonomous Systems 2019*.
5. Öztürk, O., & Körpe, D. S. (2012). Calculation of Emission Per Passenger for Esenboğa Airport in 2011 and Estimations for 2023. *Proceedings of the I. International Aviation Management Conference (INTAVIC)*.
6. Öztürk, O. (2012). 2010-2011 Years Statistics General Aviation and Commercial Aviation Accidents Investigation. *Proceedings of the I. International Aviation Management Conference (INTAVIC)*.

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

1. Öztürk, O., & Can, A., & Kartum, G. (2022). The Importance of External Resource Utilization in MRO Activities for Aviation Enterprises. *Proceedings of the 1st International Congress of Ege Social Sciences Graduate Students*.
2. Öztürk, O., & Körpe, D. S. (2012). 2010 Yılında Esenboğa Havaalanında Emisyondaki Kalkış ve İniş Süreçlerinde Uçakların Emisyon Salınımının Yolcu Başına Hesaplanması. *Proceedings of the Ulusal Havacılık Teknolojisi ve Uygulamaları Kongresi (UHAT)*.

Projeler

1. **Proje Durum:** Tamamlandı. **Projedeki Görev:** Danışman. **Konu:** Havalimanında Self Servis Teknolojilerinin Kullanılması ile Pandemi Dönemlerinde temasın azaltılması arasında ilişki karma. **Proje Türü:** 2209 TÜBİTAK PROJESİ. Covid-19

Sürecinde Havalimanı Terminali İçerisinde Yolculara Uygulanan Sağlık Tedbirlerine Karşı Yolcu Tutumlarının Olumlu Yönde Değiştirilmesi için Dijitalleşmeye Yönelik Çözümlerin Değerlendirilmesi: Dalaman Havalimanı Örneği. 2022-2024

