T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA PROPAN-METAN KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan
Kuzey Emre ER

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN

Yüksek Lisans Tezi

Mart 2023
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA PROPAN-METAN KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hazırlayan
Kuzey Emre ER

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN

Mart 2023
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.

Kuzey Emre ER

İmza :

Ön Karışımlı Bir Yanma Odasında Propan-Metan Karışımlarının Yanma Davranışlarının Deneysel Araştırılması adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan	**Danışman**
Kuzey Emre ER	Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN

Sivil Havacılık ABD Başkanı

Prof. Dr. İlke TÜRKMEN

TEŞEKKÜR

Akademik hayatımın başlangıcından itibaren duruşu, hoşgörüsü ve saygısı ile örnek olan aynı zamanda bilgi, beceri ve tecrübesiyle bana yol gösteren değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN'a yürekten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Akademik yolumun başlangıcından itibaren her zaman desteği olan ve gelecekte bu yolda ilerlemem için teşviklerde bulunan sevgili Uzm. Fzt. Şerifenur DEMİR ER'e yürekten sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda ve arkamda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan annem Hacer ER ve babam Naim ER'e, motivasyon kaynağım olan sevgili kız kardeşim Aysu ER'e sonsuz teşekkürlerimi ve minnetimi sunarım.

Kuzey Emre ER

Mart 2023, KAYSERİ

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA PROPAN-METAN KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

Kuzey Emre ER

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Mart 2023
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat TAŞTAN

ÖZET

Günümüzde giderek artan enerji kaynağı ihtiyaçları küresel anlamda tüm ülkeler için büyük bir öneme sahiptir. Ülkeler son zamanlarda enerji ihtiyacının karşılanması ve mevcut enerji kaynaklarının tasarruflu kullanılması için önemli politikalar geliştirmektedir. Bunun yanı sıra enerji kaynaklarının yanması sonucu doğaya zarar veren emisyonları minimuma indirmek için çevreye daha az zarar veren alternatif enerji kaynaklarına yönelmişlerdir. Alternatif enerji kaynağı olması adına bu çalışmada propan gazını metan gazı ile zenginleştirilerek Tubitak destekli bir yakıcıda yanma üzerine etkisinin deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Metan gazı zenginleştirmesi %10, %20 ve %30 oranlarında belirlenmiş olup akustik zorlamanın yanma üzerine etkileri, emisyon değerleri ve alev üzerine olan etkileri incelenmiştir. Isıl güç 7 kW ve eş değerlik oranı (Φ)1,2 olup girdap değeri sabit (1.0) olarak deney gerçekleştirilmiştir. Deney akustik zorlamasız olarak gerçekleştirildiğinde metan oranı arttıkça açığa çıkan sıcaklık, alev parlaklığı ve ışık şiddetinin arttığı, dinamik basınç değerinin neredeyse değişmediği ve NOx değerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu, CO değerinin ise metan oranı arttıkça oksijen miktarına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. 90 Hz, 185 Hz ve 330 Hz akustik zorlama altında yapılan deneylerde, zorlama değeri arttıkça sıcaklık ve alev parlaklığı artarken; NOx değerinin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu, CO değerinin ise akustik zorlamasız olarak gerçekleştirilen deneylere göre azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Akustik zorlama, emisyon, metan, propan, yanma

**IN A PRE-MIXED COMBUSTION CHAMBER
EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF COMBUSTION BEHAVIOR OF PROPANE-METHANE MIXTURES**

Kuzey Emre ER

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.Sc. Thesis, March 2023
Supervisor: Dr. Murat TAŞTAN

ABSTRACT

Today, the ever-increasing energy resource needs are of great importance for all countries in the global sense. Countries have recently been developing important policies to meet their energy needs and to use existing energy resources efficiently. In addition, in order to minimize the emissions that harm the nature as a result of the burning of energy sources, they have turned to alternative energy sources that are less harmful to the environment. In order to be an alternative energy source, in this study, the effect of enriching propane gas with methane gas on combustion in a Tubitak supported combustor was experimentally investigated. The enrichment of methane gas was determined at the rates of 10%, 20% and 30%, and the effects of acoustic stress on combustion, emission values and the effects on the flame were investigated. The thermal power was 7 kW and the equivalence ratio (Φ) was 1.2, and the experiment was carried out with a constant eddy value (1.0). When the experiment was carried out without acoustic stress, it was determined that the temperature, flame brightness and light intensity increased as the methane ratio increased, the dynamic pressure value almost did not change, the NOx value was negligibly small, and the CO value decreased depending on the oxygen amount as the methane ratio increased. In the experiments carried out under 90 Hz, 185 Hz and 330 Hz acoustic stress, as the forcing value increases, the temperature and flame brightness increase; It was observed that the NOx value was negligibly small, and the CO value decreased compared to the experiment performed without acoustic stress.

Keywords: Acoustic forcing, emission, methane, propane, combustion

İÇİNDEKİLER

ÖN KARIŞIMLI BİR YANMA ODASINDA PROPAN-METAN KARIŞIMLARININ YANMA DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK ii
TEŞEKKÜR v
ÖZET vi
ABSTRACT vii
İÇİNDEKİLER viii
KISALTMALAR VE SİMGELER x
TABLOLAR LİSTESİ xi
ŞEKİLLER LİSTESİ xii
GİRİŞ 1

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1 Enerji 2
1.1.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları 3
1.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları 4
1.2 Yanma ve Yakıt 4
1.3 Propan Gazı 5
1.4 Metan Gazı 10
1.5 Egzoz Emisyonları 13
1.5.1 Karbon Monoksit(CO) 16
1.5.2 HC Emisyonları 17
1.5.3 NO_X Emisyonları 17
1.6 Yanma Kararsızlıkları ve Akustik Zorlama 19

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş 21
2.2 Deney Düzeneği 22
2.2.1 Hava ve Yakıt Temini 24

2.2.1.1 Yakıt Tankları ve Basınç Ayar Regülatörleri 24
2.2.1.2 Hava Kompresörü ve Harici Hava Tankı 25
2.2.3 Ön Karıştırıcı (Pre-Mixture) 29
2.2.4 Akustik Yanma Odası 30
2.2.4.1 Değişken Kanatçıklı Yakıcı (Brülör) 30
2.2.5 Yakıcı Ateşleme Ünitesi 33
2.2.6 Ölçüm Cihazları ve Deney Ekipmanları 34
2.2.6.1 Basınç Ölçerler 34
2.2.6.2 Isı Sensörleri (Termocouple) 34
2.2.6.2.1 Isı Sensörleri (Termocouple) Ölçüm Hatalarının Düzeltilmesi 35
2.2.6.3 Emisyon Ölçüm Cihazı 37
2.2.6.4 Hoparlör Akustik Zorlayıcı 38

3. BÖLÜM

DENEY SONUÇLARI

3.1 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Yanma Üzerine Etkisi 41
3.1.1 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Sıcaklık Üzerine Etkisi 42
3.1.2 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Alev Üzerine Etkisi 43
3.1.3 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin NOx Emisyonu Üzerine Etkisi 45
3.1.4 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin CO Emisyonu Üzerine Etkisi 47
3.2 Akustik Zorlamanın Yanma Üzerine Etkisi 48
3.2.1 Akustik Zorlamanın Sıcaklık Üzerine Etkisi 49
3.2.2 Akustik Zorlamanın Alev Üzerine Etkisi 51
3.2.3 Akustik Zorlamanın NOx Emisyonu Üzerine Etkisi 56
3.2.4 Akustik Zorlamanın CO Emisyonu Üzerine Etkisi 56

4.BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar 58
4.2 Öneriler 60
KAYNAKÇA 61
ÖZGEÇMİŞ 67

KISALTMALAR VE SİMGELER

Sembol	**Anlamı**
LPG:	Liquid Petroleum Gas
LNG:	Liquefied Natural Gas
ICAO:	Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu
CaHb:	Hidrokarbon
CFD:	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
NG:	Doğalgaz
Cal:	Kalori
J:	Joule
K:	Kelvin
°C:	centigrade
λ:	hava fazlalık oranı
ppm:	parts per million
kW:	kilowatt
slpm:	standart litre per minute
dB:	Desibel
mV:	millivolt

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Propan, bütan ve benzinin kimyasal ve fiziksel özellikleri 7
Tablo 1.2. Alternatif Sıvı Yakıtların Özellikleri 8
Tablo 1.3. Alkanlar 11
Tablo 1.4. Metan ve Propan Öz Isı Tablosu 11
Tablo 1.5. Başlıca Kirletici Egzoz Emisyonları 15
Tablo 1.6. ICAO Emisyon Gaz Standartları 16
Tablo 2.1. Swirl Sayılarına Göre Girdap Üreteçleri ve Açıları 32
Tablo 2.2. Emisyon Cihazı Ölçüm Parametreleri 37
Tablo 3.1. Artan Metan Oranlarına Göre Değişen Baca Gazı Sıcaklığı 43
Tablo 3.2. Zelvodich'e Göre NO_X Oluşum Tablosu 45
Tablo 3.3. Metan oranlarına göre NO_x değerleri 46
Tablo 3.4. Metan oranlarına göre CO değerleri 47
Tablo 3.5. Akustik Zorlama Frekansına Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri 49
Tablo 3.6. Akustik Zorlama Altında Dinamik Basınç Değerleri 53
Tablo 3.7. Akustik Zorlama Altında NO_x Emisyon Değerleri 56
Tablo 3.8. Akustik Zorlama Altında CO Emisyon Değerleri 57
Tablo 3.9. Akustik Zorlama Altında Dinamik Basınç Değerleri 57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Tarımsal atıkların yakılması 3
Şekil 1.2. Propanın Kimyasal Yapısı 6
Şekil 1.3. Metanın Kimyasal Yapısı 12
Şekil 2.1. Deney Sistemi Şeması 23
Şekil 2.2. Deney Düzeneği 24
Şekil 2.3. Yakıt Tankları 24
Şekil 2.4. Metan Gazı ve Basınç Ayar Regülatörü 25
Şekil 2.5. Kompresör 25
Şekil 2.6. Harici Hava Tankı 26
Şekil 2.7. Hava Filtresi ve Emniyet Vanası 26
Şekil 2.8. Vakum Sistem Kontrolörü 27
Şekil 2.9. Hava Kontrolörü 27
Şekil 2.10. Yakıt Kontrolörleri 28
Şekil 2.11. Gaz Akış Hatları 28
Şekil 2.12. Yakıt Kollektörü 29
Şekil 2.13. Ön Karıştırıcı 29
Şekil 2.14. Akustik Yanma Odası 30
Şekil 2.15. Yakıcı (Brülör) 31
Şekil 2.16. Değişebilir Girdap Üreteçleri (Kanatçıkları) 32
Şekil 2.17. Swirl Değerleri Ölçütü 32
Şekil 2.18. Yakıcı Ateşleme Ünitesi 33
Şekil 2.19. Yanma Odası Soğutucu Sistemi 33
Şekil 2.20. Piezo-dirençli basınçölçer (Keller) ve dinamik basınçölçer (PR 23) 34
Şekil 2.21. B ve K tipi Isı sensörleri 35
Şekil 2.22. Düzenek Üzerinde Termocouple ve Basınçölçerler 36
Şekil 2.23. Emisyon Ölçüm Cihazı 37
Şekil 2.24. Yanma düzeneğinde içinde hoparlör bulunan kulakçıklar 38
Şekil 2.25. Hoparlör 38
Şekil 2.26. Fonksiyon Jeneratörü 39
Şekil 2.27. Amplifikatör 39
Şekil 2.28. Osiloskop 40

Şekil 3.1. Metan oranına sıcaklığa etkisi 42
Şekil 3.2. Metan oranının alev parlaklığına etkisi 43
Şekil 3.3. Metan oranına göre değişen ışık şiddeti 44
Şekil 3.4. Metan Oranına Bağlı Dinamik Basınç (ppm) 45
Şekil 3.5. Metan Oranına Bağlı NO_x Değerleri 46
Şekil 3.6. Metan Oranına Bağlı CO Değerleri 48
Şekil 3.7. Akustik Zorlama Frekans Noktaları 49
Şekil 3.8. %10 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri 50
Şekil 3.9. %20 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri 50
Şekil 3.10. %30 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri 51
Şekil 3.11. %10 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi 51
Şekil 3.12. %20 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi 52
Şekil 3.13. %30 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi 53
Şekil 3.14. %10 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa) 54
Şekil 3.15. %20 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa) 55
Şekil 3.16. %30 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa) 55

GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknolojilerle birlikte, enerji ihtiyacına olan talepler giderek artmaktadır. Enerji kaynağını bulmak kadar o enerji kaynağını elde etmek için yapılan çalışmalar, üretim aşamaları, üretim maliyetleri çok büyük projeler ve işler sayesinde gerçekleşmektedir. Aynı zamanda enerji kaynaklarımız gün geçtikçe azalmakta ve küresel ısınma artarak dünya üzerinde ciddi etkileri görülmektedir. Bu nedenle enerji kaynaklarımızı etkin şekilde kullanmak, doğayı daha az kirletmek bizler ve gelecek nesiller için çok önemlidir.

Propan ve metan bir hidrokarbon gazdır. Rafinaj veya diğer işletme masrafları diğer petrol kaynaklı yakıtlardan çok daha azdır, enerji kaynaklarına göre mukayese edildiğinde ucuza mal edileceği görülmektedir. Yakıt olarak diğer yakıtların çoğundan kolay yanar ve yanma verimi yüksektir. Yanma sonucu oluşan zararlı gaz oranı diğer yakıtlara göre azdır ve doğaya daha az zarar vereceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada alternatif yakıt arayışı için faydalı olacağı düşünülen hidrokarbon bir gaz olan propan gazını %10, %20 ve %30 oranlarında metan gazı ile zenginleştirerek ön karışımlı bir yakıcıda, farklı akustik zorlamalar altında yanması sağlanmıştır. Böylelikle çalışmamızda propan gazına farklı oranlarda metan gazı ekleyerek akustik zorlama altında yanma kararsızlığına olan etkisi ve baca gazı emisyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

1.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

1.1 Enerji

Enerji terimi temel olarak Yunanca "energeia" kelimesinden ve İngilizcede sırasıyla "in" ve "work" anlamına gelen iki Fransızca "en" ve "ergon" kelimesinden türetilmiştir. Enerji terimi, vücudu iş yapmaya zorlayabilen herhangi bir nesnenin niceliksel özelliği veya nesneyi ısıtabilen niceliksel özellik olarak da tanımlanabilir. Enerjinin korunumu yasasınca, enerji genellikle sistemde korunur. Enerji terimi genel olarak herhangi bir nesnenin iş yapabilme yeteneği olarak tanımlanır ve bu nedenle sistem uluslararası (SI) birimleri de "iş" ile aynıdır." "Joule" (J) kelimesi iş ve enerji birimidir ve ilk olarak bilim ve mühendislik alanında çalışan ve ısının mekanik eşdeğeri üzerine deneyler yapan James Prescott Joule'un onuruna kullanılmıştır. Basit bir ifadeyle, bir joule bir newton metreye eşdeğerdir. Benzer şekilde, ısı genellikle "kalori" (Cal) cinsinden ölçülür ve "1 g suyun sıcaklığını 1 ° C'ye yükseltmek için gereken enerji miktarı" olarak tanımlanabilir ve 1 kalori 4.184 J'ye eşittir.(1)

Enerji kaynakları iki temel sınıfa ayrılan dokuz ana enerji kaynağından oluşur. Bu iki sınıf, yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynaklarıdır. Kömür, gaz ve petrol gibi yenilenemeyen enerji kaynaklarına sınırlı miktarlarda erişilebilir ve bu kaynaklar belirli bir süre içerisinde kendisini yenileyemez. Kaynakların tekrar oluşumları ise uzun yıllar alır. Yenilenebilir kaynaklar genellikle kısa zaman dilimlerinde yenilenebilir veya doğal olarak yeniden meydana gelir. Beş ana yenilenebilir enerji kaynağı; su, rüzgâr, jeotermal, biyokütle ve güneş enerjisidir. Güneş, jeotermal enerji dışında dünya üzerinde doğrudan veya dolaylı olarak geniş bir enerji yelpazesinin kesin kaynağıdır. Petrol türevleri (petrol, gaz ve kömür), bir zamanlar Dünya'da yaşayan ve güneş enerjisini depolayarak gelişen fosil hayvan ve bitki kalıntılarından oluşmaktadır. Güneş, fotosentetik işlemle biyokütlenin gelişiminde önemli bir role sahiptir. Hidroelektrik, yine güneş ışınımlarına

bağlı olan su döngüsüne dayanır. Benzer şekilde, dalga gücü, rüzgâr enerjisi ve gelgit gücü de dâhil olmak üzere diğer tüm yenilenebilir enerji türleri güneş ışığına dayanmaktadır.(1, 2)

1.1.1 Yenilenemez Enerji Kaynakları

Yenilenemeyen enerji kaynakları, zamanla tükenebilen özel enerji kaynaklarıdır. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının en yaygın ve başlıca iki sınıfı; nükleer yakıtlar ve fosil yakıtlardır. Her türlü fosil yakıtın oluşumunun arka planındaki mekanizma hemen hemen aynıdır. Bir tahmine göre, 100 milyon yıl önce, dinozorların varlığından bile önce, Dünya'nın manzarası oldukça farklıydı. Dünya bataklık ormanlar, daha geniş denizler ve sığ okyanuslarla kaplıydı. Planktonlar, algler ve bitkiler güneş ışığını emerek, fotosentez yoluyla enerji ürettiler ve bu eski sulak alanlarda büyüdüler. Bu organizmalar öldüğünde, gölün veya denizin dibine sürüklendiler. Uzun süren bu dönüşümden sonra, aşırı yüksek sıcaklık ve yüksek basınç altında, bitki ve hayvanların ölü ve çürüyen bedenleri sonunda petrol yağı, kömür ve doğal gaz gibi geleneksel olarak kullanılan fosil yakıtlara dönüştü.(3)

Fosil yakıtlar değerli bir enerji kaynağıdır. Fosil yakıtlar nispeten ucuz maliyetlerle çıkarılır ve depolanması, sevk edilmesi veya borulanması kolaydır. Bununla birlikte, fosil yakıtların yakılması çevre üzerinde çeşitli zararlı etkilere sahiptir. Petrol ve kömürün yakılmasının toprağı, havayı ve suyu kirletebilecek parçacıkları serbest bıraktığı bilinmektedir.(4) Son kavramlara göre, Dünya'nın karbon miktarı, geleneksel fosil yakıtların yakılması da dâhil olmak üzere okyanusların, denizlerin ve atmosferin doğal karbon içeriğini dengelemek için kullanılır. Geleneksel olarak kullanılan fosil yakıtlar atmosfere büyük miktarda karbondioksit salmaktadır.(5) Aşağıdaki Şek. 1.1'de tarımsal atıkların yakılmasının sera etkisine ve küresel ısınmaya katkıda bulunduğu gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Tarımsal atıkların yakılması

1.1.2 Yenilenebilir Enerji Kaynakları

Yenilenebilir enerji kaynakları medeniyetin başlangıcından beri insanlar için önemli olmuştur. Yenilenebilir enerji kaynakları genellikle dünya ekosistemindeki enerji akışları ve güneşin dünya üzerine vermiş olduğu enerji miktarına bağlıdır.(6) Yenilenebilir enerji kaynakları toplam dünya enerji talebinin% 14'ünü karşılamaktadır. (7) Bu enerji kaynakları biyokütle, hidroelektrik, jeotermal, güneş, rüzgar ve deniz (su kaynaklı) enerjilerini içerir. Yenilenebilir enerji kaynakları birincil, temiz ve tükenmez enerji kaynaklarıdır. (8, 9)

Hidroelektrik, küresel elektrik kaynaklarının yüzde 20'sini karşılar. Deniz kıyıları ve diğer rüzgârlı bölgelerdeki rüzgâr enerjisi, umut verici olmakla birlikte giderek gelişen bir enerji kaynağıdır.(7, 10)Yenilenebilir enerji kaynaklarına alternatif enerji kaynakları da denir. Bu enerji kaynaklarının kullanım payının ilerleyen zamanlarda çok önemli ölçüde artması beklenmektedir. 2100 yılında %30-80 aralığında olması düşünülmektedir. (10).

1.2 Yanma ve Yakıt

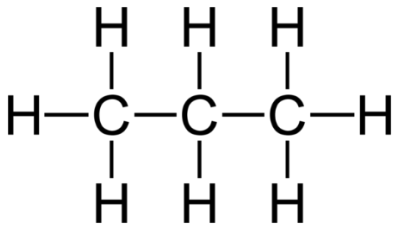
Yanma, yakıt ve enerji birbirine bağlı 3 faktördür. Yakıldığı zaman enerji açığa çıkaran maddelere yakıt adı verilir. Temel olarak yakıtlarda genellikle hidrojen ve karbon atomları bulunur. Bu şekilde karbon ve hidrojen içeren yakıtların temel adı hidrokarbon yakıtlardır. Hidrokarbonlar ″CaHb″ şeklinde formülüze edilir. Hidrokarbon yakıtların 3 temel fazda da (katı, sıvı ve gaz) örnekleri vardır. Bu fazlara kömür, gazolin ve doğal gaz gibi örnekler verilebilir. Yanma, kimyasal bir reaksiyon türüdür. Yakıtın oksitlenmesini ve büyük miktarda enerjinin açığa çıkmasını sağlar. Hava yanma reaksiyonlarında en sık kullanılan oksitleyicidir ve serbestçe kolaylıkla temin edilir. Saf oksijen ise, sadece havanın kullanılamadığı kesme ve kaynak gibi özel uygulamalar için tercih edilir. Yanma odasına giren dışardan kolaylıkla temin ettiğimiz bir hava içerisinde bir miktar su buharı ya da bir miktar nem bulunmaktadır. Genellikle yanma reaksiyonlarının birçoğu için hava içindeki azot inert bir gaz olarak görevini yapar. Yüksek yanma sıcaklıklarında ise bir miktar su buharı, H2 ve O2’ e ayrışmaktadır. Yanma tepkimelerinde reaksiyon başlamadan önce elimizde olan bileşenleri reaktanlar, reaksiyon sonrasında oluşan bileşenleri de ürünler olarak adlandırmaktayız. Etkin bir yanma meydana gelebilmesi için

yakıtın tutuşma sıcaklığının üzerine çıkılmalı ve yakıt-hava karışımı uygun bir aralık içinde tutulmalıdır.(11)

Yanma işlemlerinde, fosil ve yenilenebilir yakıtlar farklı bir yakıta, ısıya ya da elektriğe dönüşebilirler. Yanma alanında yapılan çalışmaların esas amaçları yanma işlemini iyileştirmek, etkin yanmayı sağlayarak yüksek yanma verimi elde etmek ve böylece yanma sonucu açığa çıkan karbon monoksit (CO) gibi çevreye zararlı emisyonların oluşumunu en minimuma indirmektir. Bu etkin yanmayı sağlamak özellikle endüstri alanında hem ekonomik hem de çevresel anlamda çok faydalı olacaktır. Çoğunlukla yanma sistemlerinde, hava ve yakıt gaz fazındadır ve bu iki fazın oluşturduğu akımları birleştirmek için çoğunlukla eş eksenli geometrilerden faydalanılır. Yanmanın yetersiz(eksik) olduğu durumlarda ve alev sıcaklığının çok düşük olduğu ortamlarda CO seviyesi yükselir. Bu nedenle esas olan iyi bir yakıcı dizaynı için bu şartlar arasında ideal bir denge sağlamaktır. Yakıcı dizaynı deneysel çalışmalarda çok pahalı maliyetli karmaşık bağlantı sistemlerini gerektirdiği için bu çalışmalarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çok kullanılan bir metottur. Yanma sonucu kirletici emisyonlarının tahmininde, karışım özellikleri, sıcaklık dağılımı, akış alanları gibi birçok hesaplamanın ve sonuçların elde edilmesinde kolaylaştırıcı olarak sıklıkla kullanılır.(12)

1.3 Propan Gazı

Propan (C_3H_8) enerji içeriği bakımından zengin sıvılaştırılmış petrol gazlarından (LPG) biridir. Propanın önemli konsantrasyonlarında doğal gaz, ham petrol ve petrol ile ilişkili olduğu bulunmuştur. LPG'ler esas ana kimyasal bileşenler olarak propan (C_3H_8) ve bütan (C_4H_{10}) hidrokarbonlarından (karbon ve hidrojen kombinasyonu) oluşur. LPG'ler, doğalgaz sahasındaki ve petrol sahasındaki gaz akışlarından çıkarılabilir. Bu gazlar, petrol rafinerilerinde ham petrolün rafine edilmesi sırasında bir yan ürün olarak da elde edilebilir. Propan normal koşullarda gazdır ve uygun sıcaklık ve basınç koşulları altında sıvılaştırılabilir. LPG'ler kolayca depolanabilir ve güvenli bir şekilde bir yerden diğerine taşınabilir.(13) Şekil 1.2'de Propan gazının kimyasal yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Propanın Kimyasal Yapısı

Propan etan ve bütan da dâhil olmak üzere hidrokarbonların üretimi, doğal gazın ayrılması sırasında ham petrol rafinerilerinden veya doğal gaz işleme ünitelerinden elde edilebilir. Petrol sahaları ve doğal gaz işleme üniteleri tarafından çıkan propan miktarları (C3H8) neredeyse eşittir. Konut sektöründe, tüm LPG'ler pişirme ve ısıtma için kullanılmaktadır. Sıvılaştırılmış gazın yakılması, ham petrol, petrol ve doğal gaza kıyasla daha az karbondioksit yaydıkları için çevreye daha az zararlıdır.

Benzer şekilde, LPG'ler kurum üretmeden yanar ve minimum oranda atmosferdeki azot ve kükürt oksit emisyonunu oluşturur. Bu gazlar Jeosfer Litosfer ve Hidrosfer için herhangi bir tehdit oluşturmaz. Ek olarak, LPG'ler enerji tasarruflu, uygun maliyetli ve dizel yakıttan çok daha ucuzdur. Bu gazlar birçok doğal prosesin yan ürünü olarak elde edildiğinden atık üretim riskini en aza indirir. LPG'ler, gelişmiş yenilenebilir enerji teknolojileri ile birlikte de kullanılabilir.(13)

LPG'ler, diğer tüm fosil yakıtlara kıyasla minimum sera gazı emisyonuna sahip daha temiz yanan yakıtlardır. Bu gazlar çevre dostudur ve doğada toksik değildir. LPG'ler toprağı ve doğal su rezervuarlarını kirletmez. LPG'nin birim başına toplam enerji içeriği ve kalorilik değeri, biyokütle türevi alkoller, akaryakıtlar, benzin, dizel, doğal gaz ve kömür dâhil olmak üzere yaygın olarak kullanılan tüm yakıtlardan önemli ölçüde daha yüksektir. LPG'lerin çok yönlü yapısı, köpük ve aerosol itici üretiminde, ev ve ofislerin iklimlendirilmesinde ve yakıt olarak pişirme ve yakma için ısıtmada kullanılmasını mümkün kılar. LPG'nin uzun mesafelerde depolanması ve taşınması kolaydır. Sıvılaştırılmış gaz, doğal gazla kolayca değiştirilebilir ve böylece doğal gaz sıkıntısı durumunda endüstriler için mükemmel bir yedek yakıt olduğunu kanıtlayabilir. (1, 13)

Sıvılaştırılmış petrol gazı esas olarak propan gazından oluşsa da bütan gazı ile LPG'yi oluşturmaktadır. Ülkelere göre propan/bütan karışım oranları değişmektedir. LPG'nin benzine göre farklı özellikleri vardır. Propan ve bütan arasındaki temel farklılıklardan biri

kaynama noktasıdır, yani sıvı halden gaz haline geçtikleri noktadır. Propan gazının sıvı halden gaz hale geçtiği en yüksek derece -42 derece iken, bütan gazı 0 °C' de kaynamaktadır. Bu nedenle kış mevsimlerinde daha yüksek oranlarda propan içeren karışımların ihtiyacı doğarken, böylece gaz fazına geçiş hızlanmaktadır. Türkiye'de hava sıcaklığı bölgeden bölgeye değiştiğinden dolayı, araçlar için kullanılan LPG % 30 propan, %70 bütan içermektedir. Bu şekilde tüm bölgeler ve şartlar için uygun karışım elde edilmiş olur. Kışları şiddetli soğuk olan bölgelerde propan oranı yükseltilerek sıvı halden gaz hale geçiş hızlandırılır.(14)

LPG propan ve bütandan oluştuğu için karışım oranının değişmesi oktan sayısının değişmesine, dolayısıyla yakıtın yanması sonucu oluşan vuruntu miktarını etkileyecektir. Fakat her iki gazında oktan sayıları benzine göre yüksek olduğu için her ihtimalde benzinden daha yüksek oktanlı bir alternatif yakıt oluşmasına ve vuruntusuz bir motor çalışmasını sağlayacaktır. Tablo 1.1' de propan, bütan ve benzinin kimyasal ve fiziksel özellikleri gösterilmiştir.(15)

Tablo 1.1. Propan, bütan ve benzinin kimyasal ve fiziksel özellikleri

ÖZELLİKLER	**BÜTAN**	**PROPAN**	**BENZİN**
Formül	C_4H_{10}	C_3H_8	C_8H_{18}
Molekül Ağırlığı (kg/mol)	58,12	44,10	114
Donma Noktası (°C)	-138,3	-187,8	-
Kaynama Noktası (°C)	-0,5	-42,3	30-225
Buhar Basıncı (20°C, kg/cm^2)	1,2	8,93	0,49-0,81
Buhar Basıncı (50°C, kg/cm^2)	4,85	20,18	-
Sıvı Yoğunluğu (15°C, kg/m^3)	582	504	735
Sıvının Özgül Isısı (15°C,kJ/kg)	1,276	1,464	-
1 Lt Sıvının Gaz Hacmi (15°C, m^3)	0,235	0,271	-
1 Kg Sıvının Gaz Hacmi (15°C, m^3)	0,410	0,539	-
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	0,582	0,504	0,735
İzafi Yoğunluk (hava=1)	2,09	1,55	-
Parlama Noktası (°C)	-60	-105	200
Tutuşma Noktası (Havada °C)	482-538	493-549	-
Alev Sıcaklığı (Havada °C)	2008	1980	1977
Isıl Değeri (kJ/kg)	45600	46400	44000
Yanma Limitleri	%1,9-8,5	%2,4-9,5	5-16
Stokiyometrik Karışımı Tutuşturma Enerjisi(kJ,NŞA)	0,3	0,3	1
Stokiyometrik Karışımın Kimyasal Enerjisi (kJ/m^3)	3490	3450	3580
Hava/Yakıt Oranı	15,1/1	15/1	14,6/1
Fiziksel Hal (NŞA)	Gaz	Gaz	Sıvı
Maksimum Laminer Yanma Hızı (m/s)	0,4	0,4	0,35
Motor Oktan Sayısı	97	92	90

Alternatif yakıt arayışında yaygın olarak kullanımı ve büyük rezervlere sahip olması nedeniyle sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), ham petrol rafinelerinde ve doğal gaz (NG) işlenmesi sırasında üretilmesiyle çok kullanılan ve araştırılan bir enerji kaynağıdır. En çok kullanılan ulaşım yakıtı olan benzin ve dizele kıyasla yakması, buharlaşması ve karışması çok basit ve kolay olan bir hidrokarbon yakıtıdır. (16) LPG'deki en önemli bileşenlerden biri olan propan gazı ülkemizde çok yaygın olarak kullanılan ve geniş bir dağıtım ağına sahip alternatif bir yakıttır. Benzinle kıyasladığımızda aynı miktar hacimce propan ve benzin, çift yakıtlı yanma sisteminde yakıldığı zaman enerji yoğunluğu açısından propan geride kaldığı düşünülebilir. Fakat propanın oktan sayısının yüksek olması, alt ısıl değerinin yüksek olması ve yüksek sıkıştırma ve yük altında vuruntusuz çalışabilmesi gibi özellikleri nedeniyle çift yakıtlı sistemlerde LPG'nin avantajını ortaya koymaktadır. Ayrıca propan gazının yanması için yüksek maliyetli yanma sistemlerinde emme portu ya da özel yanma odası modifikasyonlarına ihtiyaç kalmamaktadır.(17)

Tablo 1.2 incelendiğinde, propanın özelliklerinin metanınkine benzer olduğu açıktır ve metanın potansiyel uygulaması olan her yerde, propan genellikle dikkate alınır ve söz sahibidir. Metan ile karşılaştırıldığında, daha düşük bir özgül enerjiye ve daha düşük bir soğutma kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, daha yüksek kaynama noktası daha kolay kullanım anlamına gelir; Özellikle, uçak yakıt deposunun uygun basınçlandırılmasıyla ortam sıcaklıklarında bir sıvı olarak depolanabilir.(18, 19) Tablo 1.2'de alternatif sıvı yakıtların özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 1.2. Alternatif Sıvı Yakıtların Özellikleri

Özellikler	**Kerozen**	**Hidrojen**	**Metan**	**Propan**	**Amonyak**
Düşük özgül enerji (MJ / kg)	42,8	116	49	46	17,2
Düşük özgül enerji (Btu / lb)	18,400	49,900	21,060	19,800	7380
Soğutma kapasitesi (MJ / kg)	0,38-0,85	20,2	2,55	1,20	3,39
Soğutma kapasitesi (Btu / lb)	164-364	8694	1098	518	1458
Bağıl yoğunluk (289-289 K)	0,80	0,071(b.p.)	0,424(b.p.)	0,585(b.p.)	0,682(b.p.)
Özgül ısı (kJ / (kg·K))	1,97	7,32	3,43	-	-
Özgül ısı (Btu / (lb· ° F))	0,47	1,75	0,82	-	-
Kaynama noktası (K)	423-573	21	111	231	240
Kaynama noktası (° F)	301-571	-422	-260	-44	-28
Donma noktası (K)	223	13	91	91	195
Donma noktası (° F)	-58,6	-437	-296	-296	-109
Alev hızı (m / s)	0,39	2,67	0,37	0,43	0,30
Alev hızı (ft / s)	1,28	8,76	1,21	1,41	0,98

Raihan, propan ve metan yanmasını tek silindirli dizel bir motorda farklı yükler altında, yanmanın propan miktarına göre değişimini, enjeksiyon basıncı ve turbo basıncının performans ve emisyon üzerine olan etkisini ve dizel enjeksiyon zamanının etkilerini deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Ve deneyleri sonucunda en ideal propan oranının %80 olduğu, en elverişli enjeksiyon basıncının 500 bar ve turbo basıncının 1,5 bar olduğu, dizel enjeksiyon zamanının 355 KMA olduğu sonucunu bulmuştur. Önemli etkilerden birisi de propan oranı arttıkça kurum ve NOX emisyonlarının düştüğünü gözlemlemiştir. (20)

Gibson, Folk ve arkadaşları 4 silindirli turbo dizel bir motorda tam ve kısmi yük altında propan ve metan kullanımını performans ve emisyon değerleri üzerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda yüksek yük altında metan kullanımının %90'a kadar çıkabildiğini ve propan için bu koşullardaki değerin %47,5 olduğunu belirlemişlerdir. Yakıt olarak çift yakıt sistemi seçildiği zaman yüksek yüklerde dizel yakıtla benzer fren mil verimleri elde edilirken düşük yük altında fren mil veriminin azaldığı gözlemlenmiştir. Egzoz emisyonlarının ise NOX ve kurum oranının düşerken CO ve HC emisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir.(21)

Polk ve arkadaşları 6 silindirli dizel bir motorda çift yakıtla yapmış olduğu çalışmalarında düşük devir ve düşük güçte propan-dizel yakıtının yanmasının; performans yanma ve emisyon değerleri üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda propan miktarı arttıkça NOX ve kurum emisyonlarının sıfıra yaklaştığı ve diğer yandan EGR oranının azaltılıp giriş basıncının arttırılması ile kullanılan propan miktarının %93'lere kadar çıkabileceği sonucuna varmışlardır.(22)

Boretti çift yakıt sistemleri üzerine olan çalışmasında %95 LPG ve %5 dizel yakıtı yakacak şekilde dizel traktör motorunda yaptığı değişiklikler ile deneyini gerçekleştirdi. Çalışmasında LPG yanmasının motor performansı ve emisyon değerleri üzerine olan etkisini deneysel ve sayısal olarak araştırmıştır. Ve elde ettiği sonuçlar LPG yanmasının CO2 emisyonları ile kurum ve NOX emisyonlarında azalmaya sebep olurken motor performansında bir değişikliğe sebep olmadığını saptamıştır.(23)

Elnajjar ve arkadaşları farklı oranlarda bütan-propan içeren LPG yakıtı ile dizel yakıtının yanmasını değişken sıkıştırma oranları, değişken enjeksiyon açıları ve değişken hızlarda 26 farklı yük altında performans değerleri açısından gözlemlemişlerdir. Gözlemleri

sonucunda LPG içeriğinde bulunan propan-bütan oranlarının değişimi motor verimini çok az etkilerken yanma gürültüsü üzerinde oldukça etkili olduğu sonucuna ulaşmışlardır.(24)

Prabhakar ve arkadaşları çift yakıtlı yanma sistemi üzerine yaptıkları yanma deneyinde yakıt olarak propan ve dimetil eteri dizel motorlu bir yakıcıda yakmışlar ve performans değerlendirmesi yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar neticesinde en iyi performansı %30 propan, %20 dimetil eter ve %50 dizel yakıt karışımlarından almışlardır. Ayrıca %24 oranında daha az yakıt tüketimi sağlayarak, en iyi verim değerlerine ulaşmış ve maksimum basınç değerini 6 bar daha yükseltmişlerdir.(25)

1.4 Metan Gazı

Metan bir tür temiz enerjidir, aynı zamanda güçlü bir sera gazıdır.(26) Yeraltı yataklarında bulunan ve esas olarak metandan oluşan yanıcı bir gaz olan olan doğal gaz, antik Çin ve eski dönem Avrupa zamanlarından beri bilinmektedir. Doğalgazın temel yapıtaşı metandır ve oranları değişmekle birlikte ortalama doğalgazın %78'i ile %98'ini oluşturmaktadır. Kalan kısmını ise nitrojen etan ve karbondioksit oluşturmaktadır. Metanı normal basınç altında gaz halinden sıvı hale dönüştürmek için sıcaklığın - 161,5 °C buharlaşma noktasının altına düşmesi gerekir. Bu durumda doğal gaz, sıvı doğal gaz veya daha yaygın olarak LNG (Sıvı Doğal Gaz) olarak tanımlanır. Sıvı gazın (LPG Sıvılaştırılmış Petrol Gazı; otogaz olarak da adlandırılır) sıvılaştırılmış doğal gaz olmadığına dikkat etmek önemlidir. LPG, oda sıcaklığında ve 5 ila 10 bar arasındaki basınçlarda sıvılaştırılabilen uzun zincirli 3-4 karbonlu hidrokarbonların (propan, bütan) bir karışımıdır.(27)

Organik kimyadaki kimyasal yapıya göre, doğal gazın ana bileşeni olan metan, alkan grubuna aittir. Alkanlar, yalnızca tek bağlara sahip hidrokarbon zincirlerinden oluşur, bu nedenle karbon atomları mümkün olan en yüksek sayıda hidrojen atomuna bağlanır. En basit alkan, en yüksek hidrojen / karbon oranı 4'e 1 olan metandır, bu da metanın benzine kıyasla yaklaşık% 20 daha düşük CO2 emisyonuna sahip olmasının nedenidir.(27) Tablo 1.3'te alkanların genel formülleri ile birlikte özellikleri gösterilmiştir.(27)

Tablo 1.3. Alkanlar

Molekül Formülü	**Molekül Adı**	**Erime Noktası (°C)**	**Kaynama Noktası (°C)**
CH_4	Metan	-184	-162
C_2H_6	Etan	-171	-93
C_3H_8	Propan	-190	-45
C_4H_{10}	Bütan	-135	0
C_5H_{12}	Pentan	-130	36
C_6H_{14}	Heksan	-94	69
C_7H_{16}	Heptan	-90	98
…	…	…	…
$C_{17}H_{36}$	Heptadekan	23	303
$C_{20}H_{42}$	Eikosan	37	-

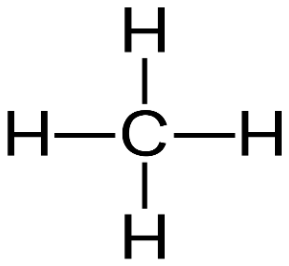
Metan yüksek-karbon hidrojen bağ enerjisine sahip tetrahedral moleküler yapısı nedeniyle benzersiz yanma özellikleri gösterir. Şekil 1.3' te metanın kimyasal yapısı gösterilmektedir. Örneğin diğer hidrokarbonlara kıyasla yüksek tutuşma sıcaklığı, düşük alev hızı ve düşük reaktiviteye sahiptir. Metan kimyasal kinetiği çok araştırılan ve dolayısıyla en iyi anlaşılanlardandır. (28) Öz ısı değeri açısından metanın öz ısısı propandan yüksektir, Tablo 1.4'te metan ve propanın öz ısı tablosu gösterilmektedir.

Tablo 1.4. Metan ve Propan Öz Isı Tablosu

Öz Isı	c_p (kJ/kg K)	c_v (kJ/kg K)
Metan	2,48	1,88
Propan	1,65	1,43

c_p = sabit basınçtaki spesifik ısı kapasitesi, c_v = sabit hacimdeki spesifik ısı kapasitesi

Metanın yanması, diğer tüm hidrokarbonlara kıyasla daha az karbondioksit üretir çünkü birim karbon başına bağlanmış daha fazla sayıda hidrojen atomu içerir. Baca emisyonlarının aldığı ölçümlere göre, doğal gazın yakılması kömüre kıyasla sadece% 55 karbondioksit üretir. Benzer şekilde, doğal gaz kömüre göre % 19 karbon monoksit, % 20 azot oksit, % 1 partikül madde ve kükürt dioksit açığa çıkarır. Egzoz emisyonlarının ölçümlerine göre, doğal gaz petrole kıyasla % 70 karbondioksit üretir.(1)



Şekil 1.3. Metanın Kimyasal Yapısı

Sıvı metan, yaklaşık 49 MJ / kg'lık bir özgül enerjiye sahiptir. Soğutma kapasitesi hidrojeninki kadar büyük değildir, ancak sıvılaştırılmış gazın çok düşük sıcaklığı (112 K) nedeniyle hala çok büyüktür. Bu düşük sıcaklık, süpersonik uçaklar için önemli soğutma potansiyeli ve daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarının kullanılmasına izin verecek şekilde yüksek oranda soğutulmuş türbin kanatları tasarlama imkânı sunar. Metanın diğer avantajları arasında iyi termal stabilite ve temiz yanma bulunur.(29)

Metan ile ortaya çıkan temel problemler, düşük yoğunluğundan ve düşük kaynama noktasından kaynaklanmaktadır. Metan, gazyağı yakıtlarından yaklaşık% 70 daha fazla depolama alanı gerektirir (hidrojenden önemli ölçüde daha az alan olmasına rağmen); Bu, ince veya değişken geometrili kanatlara sahip uçak konfigürasyonlarında büyük bir sorun olabilir. Diğer problemler arasında atmosferik nemin yoğunlaşması, uçak kanatlarında buz oluşumuna ve tırmanış sırasında kaynama nedeniyle yakıt kaybına yol açması sayılabilir.(30, 31)

Guerry ve arkadaşları tarafından yapılan yanma deneyinde, ilerleyen zamanlarda içten yanmalı motorlar için çok cazip hale geleceği düşünülen, emisyon değerlerini azaltma ve yanma verimini arttırma stratejisi olan çift yakıtlı yanma sitemi kullanılmıştır. Bu sistemde ön karışımlı dizel motoruna yapılan modifikasyonlar sayesinde ikincil yakıt olarak tercih edilen metan (CH_4) kullanılmıştır. Değişen enjeksiyon değerleri ve basınç değerleri NO_X ve CO değerlerini ölçmek için sabit tutuldu. Motor enjeksiyon açısı 300 ° ve üstünde minimum oranda NO_X emisyonu tespit edildi. En düşük HC ve CO emisyonları için enjeksiyon açısı 310° 'ye yakın olması gerektiği belirlenmiştir.(32)

1.5 Egzoz Emisyonları

Giderek kısıtlayıcı hale gelen NOx ve partikül madde emisyon standartları, yakın zamanda yeni doğal gaz rezervlerinin keşfedilmesi ve biyokütle kaynaklarından verimli bir şekilde propan üretme olasılığı ile ikili yakıt sistemleri alternatif stratejileri daha çekici hale geldi. Son birkaç yılda uygulanan giderek daha katı hale gelen emisyon düzenlemeleriyle, dizel motorların mümkün olduğunca verim kaybetmeden çok düşük nitrojen NOx oksitleri ve partikül madde PM emisyonları elde etmeleri gerekmektedir. Bu zorluklar göz önüne alındığında, çift yakıtlı motorlar, düz dizel yakıtla karşılaştırıldığında olası avantajlar sundukları için yenilenerek revize edilmiştir. (21)

Tam yanmada karbon ve hidrojen içeren CxHy şeklinde ifade ettiğimiz yakıtların yanması sonucu açığa çıkan egzoz gazları karbondioksit(CO_2), azot(N_2), oksijen(O_2) ve buhar(H_2O) bileşenlerini oluşturur.

Ancak gerçek yanmada yukarıdaki bileşenlere ek olarak karbon monoksit (CO), yanmamış hidrokarbonlar (HC), hidrojen (H_2), azot oksit (NOx) ve partiküller de ortaya çıkar. İnsan sağlığına zararlı olan bu maddelerin aksine sera etkisinden kısmen sorumlu olan CO_2, doğrudan sağlık tehlikesi oluşturmadığı ve hidrokarbonun her tam oksidasyonunun nihai ürünü olarak göründüğü için kirletici olarak görülmemektedir. Bu nedenle, egzoz gazındaki CO_2'nin azaltılması, yalnızca yakıt tüketimindeki bir azalma veya ısıtma değerine bağlı olarak daha az miktarda karbona sahip farklı bir yakıt yoluyla sağlanacaktır.(33)

Tam ve eksik yanma kavramlarının yanı sıra mükemmel ve kusurlu yanma kavramları arasında bir ayrım yapılır. Hava oranları $\lambda \geq 1$ için teorik olarak yakıtın tamamen yanması için yeterli oksijen vardır. Bununla birlikte, gerçekte yanma, bu tür hava oranları altında en fazla kimyasal dengeye kadar, yani ideal koşullar altında bile her zaman eksiktir. Sonuç olarak, oksijen temini yeterli olsa bile, yanmadan sonra her zaman belirli miktarda CO ve yanmamış hidrokarbonlar vardır. $\lambda < 1.0$ hava oranları söz konusu olduğunda, O_2 eksikliği nedeniyle yakıt tamamen yanamaz. İdeal koşullar altında, yanma işlemi en iyi ihtimalle kimyasal dengeye kadar gerçekleşir. (33)

CO, HC ve NOx oluşumu, hava-yakıt denklik oranını λ ve buna bağlı yanma sıcaklığını değiştirir. CO ve HC, zengin bir karışımda ($\lambda < 1.0$), yanmamış yanma ürünleri olarak

yükselirken, NOx oluşumu, yeterli oksijen seviyesine (λ=1.1) sahip yüksek sıcaklıklarda en hızlıdır. Fakir bir karışımda (λ > 1,2) yanma sıcaklığı düşer, böylece NOx emisyonları düşer ve HC emisyonları artar.(33)

Yanma verimliliğini ve dolayısıyla emisyonları etkileyen ana faktörler, motor ve yakıcı giriş sıcaklıkları, yanma basıncı ve birincil yanma bölgesi eşdeğerlik oranıdır.(18)

İkili yakıt yanma sistemlerinde genellikle birincil yakıt olarak gaz türevleri tercih edilir. İkili yakıt yanması için birincil gaz halindeki yakıt olarak çok sayıda yakıt deneysel olarak test edilmiştir. Bunlar, diğer gazların yanı sıra çoğunlukla metan, etilen, propan, bütan ve hidrojeni içerir. Metan ve propan her ikisi de yaygın olarak bulunan yakıtlar olduğundan ve her ikisi de çift yakıtlı yanmada istenen yakıt özelliklerini sergilediğinden, birincil gaz halindeki yakıtlar olarak tercih edilir. Metan, tipik doğal gazın büyük bir yüzdesini oluşturur ve vuruntulara karşı mükemmel direnç gösterir.(34-36) Papagiannakis ve arkadaşlarına göre yüksek yükte ve yüksek doğal gaz-dizel oranlarında NO ve kurum emisyonlarında azalma gözlenirken, artan CO ve THC ile ilgili sorunların daha az fark edildiğini göstermiştir. Kısmi yükte, eksik yanma nedeniyle yüksek CO ve THC seviyeleri, motor verimliliğini ve emisyonlarını önemli ölçüde etkiler.(37, 38)

Propan da aynı zamanda yaygın olarak bulunan bir yakıttır; Bununla birlikte, aynı zamanda metandan daha reaktif bir yakıttır ve vuruntuya karşı daha zayıf direnç gösterir.(35) Propanın yüksek reaktivitesi, çoğu yük altında daha az enerji tüketimine izin verir, ancak yüksek yük koşullarında yüksek propan-dizel oranlarını sınırlar.(39) Metanda olduğu gibi, düşük yükte yüksek propan-dizel oranları, tam yanma nedeniyle önemli THC ve CO emisyonlarına neden olacaktır.(40) Çift yakıtlı yanma için birincil yakıt olarak kullanıldığında hem metan hem de propanın minimum duman emisyonu üretmesi beklenir.(38, 41)

Yanma süreçlerinden kaynaklanan kirletici emisyonları, sağlık ve çevre üzerindeki etkileri nedeniyle büyük endişe kaynağı haline gelmiştir. Son on yılda hem gaz türbini emisyonlarının kontrolüne yönelik düzenlemelerde hem de bu düzenlemeleri karşılamak için kullanılan teknolojilerde hızlı değişikliklere tanık oldu. Bu dönemde sivil havacılığın yakıt tüketimi, hava taşımacılığının artık dünyanın en hızlı büyüyen enerji kullanım sektörlerinden biri olarak algılandığı ölçüde artmıştır.(42)

Bir uçak gaz türbininden çıkan egzoz gazları, CO, karbondioksit (CO2), su buharı (H2O), yanmamış hidrokarbonlar (UHC), partikül madde (esas olarak karbon), NOx ve atmosferik oksijen ve azottan oluşur. CO2 ve H2O, bir hidrokarbon yakıtın tamamen yanmasının doğal sonucu oldukları için her zaman kirletici olarak görülmemiştir. Ancak ikisi de küresel ısınmaya katkıda bulunur ve daha az yakıt yakılarak azaltılabilir. Böylece, motor termal verimliliğindeki gelişmeler sadece azalmakla kalmaz doğrudan işletme maliyetleri, aynı zamanda kirliliği azaltır.(18)

Başlıca kirleticiler Tablo 1.4'te listelenmiştir. CO, kanın oksijeni emme kapasitesini azaltır ve yüksek konsantrasyonlarda asfiksiye ve hatta ölüme neden olabilir. Yanmamış hidrokarbonlar(HC) sadece toksik değildir, aynı zamanda fotokimyasal duman oluşturmak için NOx ile birleşirler. Partikül madde genellikle kurum veya duman olarak adlandırılır ve atmosferin kirlenmesi sorunlarını oluşturur. Yüksek emisyon seviyelerinde baskın bileşiği NO olan NOx (NO + NO2), sadece foto kimyasal duman üretimine katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda bitki yaşamına zarar verir ve asit yağmuru sorununa katkıda bulunur.(43)

Tablo 1.5'te Gaz türbin motorları tarafından doğayı kirleten başlıca emisyonlar gösterilmiştir.(18)

Tablo 1.5. Başlıca Kirletici Egzoz Emisyonları

Kirleticiler	**Etkileri**
Karbon Monoksit	Zehirli
Yanmamış Hidrokarbonlar (UHC)	Zehirli
Partikül madde (C)	Görülebilir
Nitrojen Oksit (NO_X)	Zehirli, Kimyasal dumanın öncüsü, Stratosferde ozon yok edicisi
Sülfür Oksit (SO_X)	Toksik, Aşındırıcı

Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu(ICAO), gaz emisyon standartlarını kalkış sırasındaki motor basınç oranına göre emisyon değerlerini Tablo 1.6'da açıklamıştır.(18)

Tablo 1.6. ICAO Emisyon Gaz Standartları

Emisyon (g / kN)	**Subsonik Turbojet/Turbofan Motorlar***	**Süpersonik Turbojet/Turbofan Motorlar**
HC	19.6	$140\ (0.92)\pi_{00}$
CO	118.0	$4550(\pi_{00})^{-1,03}$
NO_X	$32 + 1.6\pi_{00}$ $-1.04 + 2\pi00\ (2007 + \text{engines})$	$36 + 2.4\pi_{00}$

* Nominal take-off değeri 26,7 kN'den büyük olan yeni üretilen motorlar

Aşağıdaki emisyon denkleminde, NOx'i azaltmak için motor üreticisinin iki yöntemin mevcut olduğunu göstermektedir. Biri, yakıcıda emisyon endeksini (EI) azaltan iyileştirmeler yapmak, diğeri ise daha düşük bir SFC sağlayan bir motor çevrimi seçmektir. Modern motorların CO ve UHC seviyeleri tüm düşük güç koşullarında önemli ölçüde azaltıldığından ve kayda değer miktarlarda yalnızca NOx yayıldığından irtifa yolculuğunda, pratikte uçak motorları tarafından üretilen emisyonlar esas olarak NOx 'ten oluşur. (44)

$$Emission = Emission\ Index \times Engine\ SFC \times Time\ in\ Mode$$

(g/kN) (g/kg fuel) (kg fuel/hr Kn) (hr)

1.5.1 Karbon Monoksit(CO)

Renksiz ve kokusuz bir gazdır. Hemoglobine (kandaki O2 taşıyıcısı) bağlılığı, oksijeninkinden çok daha güçlüdür. CO, kanın oksijeni emme kapasitesini azaltır ve yüksek konsantrasyonlarda asfiksiye ve hatta ölüme neden olabilir.

Bir yanma bölgesi yakıt açısından zengin karşımdayken, reaksiyonu tamamlamak için yeterli oksijen olmadığından oksijen eksikliğinden dolayı büyük miktarlarda CO oluşur. Bununla birlikte, yanma bölgesi karışımı stokiyometrik veya yakıt açısından fakir ise, CO2'nin ayrışması nedeniyle önemli miktarlarda CO açığa çıkacaktır.(45)

Genellikle CO oluşumunu etkileyen faktörler;(18)

* Çok düşük yakıt / hava oranı ve birincil yanma bölgesinde yetersiz kalma süresi nedeniyle tam yanma gerçekleşmemesi.

* Hava/yakıt karışımının yanmayı destekleyemeyecek kadar zayıf olduğu bazı yanma bölgelerinde yakıt ve havanın yetersiz karışması ve aşırı zengin yanmanın gerçekleştirilmesi

* Özellikle birincil bölgede yanan bir karışımın yanma bölgesinden uzaklaşarak yanma odası soğutma havasına sürüklenerek alev sonrası ürünlerin söndürülmesi

1.5.2 HC Emisyonları

Bileşimlerine bağlı olarak, az ya da çok narkotik etkiye sahiptirler ve insanın mukoza zarlarını tahriş ederler. Bazı bileşenlerin kanserojen etkisi vardır (aromataz, örneğin 3,4 benzopiren, benzen).

Yanmamış hidrokarbonlar(UHC), yakıcıdan damla veya buhar şeklinde çıkan yakıtı veya ana yakıtın daha düşük molekül ağırlıklı türlere termal bozunması sonucu oluşan ürünlerini içerir. Normalde zayıf atomizasyon(hava-yakıt oranı), yetersiz yanma oranları, soğutma havasının değişken etkileri veya bunların herhangi bir kombinasyonu ile ilişkilendirilirler. UHC oluşumunun reaksiyon kinetiği, CO oluşumundan daha karmaşıktır, ancak genellikle CO emisyonlarını etkileyen faktörlerin UHC emisyonlarını da aynı şekilde etkilediği görülmüştür.(18)

1.5.3 NO_X Emisyonları

Diğer bir zararlı kirletici, normalde oluşumu yanma sıcaklığından güçlü bir şekilde etkilenen NOx terimi altında özetlenen azot oksit emisyonudur. Yanmada oluşan nitrik oksidin (NO) çoğu daha sonra NO2'ye oksitlenir. Bu nedenle NO ve NO2'yi bir araya getirmek ve sonuçları NO yerine NO_X cinsinden ifade etmek gelenekseldir. Dört farklı mekanizma ile üretilebilir: termal NO, azot oksit mekanizması, hızlı NO ve yakıt NO.(18, 27)

Termal Nitrik Oksit, alevin yüksek sıcaklık bölgelerinde ve alev sonrası gazlarda atmosferik azotun oksidasyonu ile üretilir. İşlem endotermiktir ve yalnızca 1850 K civarının üzerindeki sıcaklıklarda önemli bir oranda ilerler. Termal NO için önerilen reaksiyon şemalarının çoğu, genişletilmiş.(18, 27)

Zeldovich reaksiyon sürecinde açıklandığı gibi NOx oluşumu, bu kimyasal denklemle tarif edilebilen azotun endotermik oksidasyonudur:

Zeldovich mekanizması:

$O_2 = 2O$,

$N_2 + O = NO + N$,

$N + O_2 = NO + O$,

$N + OH = NO + H$.

Azot Oksit Mekanizması azot ve oksijenin tepkimeye girmesi sonucu oluşan NO2'nin tekrar oksitlenerek ve hidrojen ile tepkimeye girerek azot oksit türevlerini oluşturmasıdır.

$N_2 + O = N2O$

$N_2O + O = NO + NO$

$N_2O + H = NO + NH$

$N_2O + CO = NO + NCO$

Kang ve arkadaşları tarafından yapılan deneyde, çift yakıtlı yanma sistemine sahip dizel bir motorda ikincil yakıt olarak propan gazı tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen yanma deneyinde emisyon değerlerini düşürmek ve basınç değerlerini yükseltmek amacıyla propan miktarı %80' den %95'lere kadar çıkartılmış, emisyon değerleri açısından NO_X değerinin düştüğü incelenmiştir.(46)

Koca, yanma deneyleri üzerine yaptığı çalışmasında dizel bir motora modifikasyon yaparak çift yakıtlı bir yanma sistemine sahip dizel/LPG yakıtlarını yakabilen bir dönüşüm gerçekleştirmiştir. Koca'nın yapmış olduğu yeni motor sisteminde LPG miktarını %10, %20 ve %25 seviyelerinde kullanarak ikincil yakıt olarak tercih etmiştir. LPG'nin yanma performansına ve egzoz emisyonlarına olan etkisini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlar neticesinde motorun tork değerleri ve gücü %25 LPG oranına kadar artış göstermiş ve yakıt tüketiminde azalış izlenmiştir. Egzos emisyonları açısından NO_X değeri, dizel motorlu yanma durumuna göre düşük olmakla birlikte LPG miktarı arttıkça

önce azalmış sonra artmıştır. Benzer şekilde HC emisyonu önce azalmış sonra artmış, CO_2 ve CO emisyonları artış göstermiştir.(47)

Ngan ve Abbe tarafından yapılan deneyde, benzer şekilde 4 silindire sahip dizel motorunu dönüştürerek LPG ve dizel yakıt yakabilen bir motor tasarlamışlardır. Tasarlamış oldukları bu motorda değişik oranlarda LPG-dizel karışımı yakılarak yanma performansı ve egzoz emisyonları üzerine incelemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre güç, tork ve verim değerlerinde artma, egzoz emisyonlarından NO_X ve HC emisyon değerlerinde azalma tespit edilmiştir.(48)

Krishnan ve arkadaşları, düşük yük ve düşük hızlarda dizel bir motorda ikincil yakıt olarak tercih ettikleri propanı yakıt performansı, basınç değerleri ve egzoz emisyonları açısından inlemişlerdir. Yapmış oldukları deneysel çalışmalar sonucunda egzoz emisyonları açısından en uygun değerlerin sağlandığı yakıt enjeksiyon zamanını 310 KMA olduğunu görmüşler ve en uygun basınç değerinin ise 500 bar olduğunu belirlemişlerdir.(49)

1.6 Yanma Kararsızlıkları ve Akustik Zorlama

Termoakustik yanma kararsızlıkları, küçük ev tipi brülörler, gaz türbinleri veya roket motorları gibi çeşitli uygulamalarda yanmayı olumsuz etkileyen sistem verimini ve etkin yanmayı zorlaştıran olumsuz bir faktördür. Bu tür kararsızlıklar, öncelikle akustik dalgaların etkileşimi ve dengesiz ısı salınımından kaynaklanır. Entropi, yakıt konsantrasyonundaki dalgalanmalar ve tutarsız akış yapılarının da bu kararsızlık üzerinde payı vardır. Diğer akış kararsızlıklarının aksine, termo-akustik kararsızlıklarda stabilite sınırları, yalnızca yakın çevresindeki alev ve akış alanı tarafından belirlenmez. Bunun yerine, akustik dalgalar yanma sisteminin tamamı boyunca ileri geri hareket eder ve sonuç olarak alevden uzaktaki bacanın en üst noktasında dahi akustik sınır koşullarında stabilite özelliklerini güçlü bir şekilde etkileyebilir. (50)

Modern yüksek performanslı yanma sistemlerinde yanma kararsızlıkları genellikle büyük genlikli basınç salınımları olarak kendini gösterir ve ciddi performans düşüşüne neden olabilir. Bu basınç salınımları genellikle ısı salınımların yanı sıra yanma akışlarındaki salınımlarla birleştirilir. Sistem performansına potansiyel zararları nedeniyle, yeni bir

yanma sistemi geliştirirken bu salınımların büyüklüğünü azaltmanın yollarını bulmak genellikle gereklidir.(51)

Kararsız yanmanın sonuçları, oluşabilecek yoğun basınç dalgalanması seviyelerinin yanı sıra yanma yüzeylerine artan ısı transferi nedeniyle genellikle sisteme ve enerji verimine zarar verir. Bu koşullar, sistem performansının düşmesine ve en kötü durumda yapısal hasar nedeniyle sistem arızasına neden olabilir. Akustik salınımlı yanmayı önlemek için yakıcı sisteminin geometrisinin ve boyutlarının değiştirilmesi, akustik sönümleme astarlarının uygulanması gibi olumlu sonuçlar ile giderilebilir.(52, 53)

Bu çalışmamızda ikinci bölümde açıkladığımız yanma sistemimizde akustik salınımı önlemek, yanma verimini arttırmak, vibrasyonu ve emisyon değerlerini olumlu etkilemesi adına yanma sistemi üzerine uyguladığımız değişik frekanslarda akustik zorlama ile deneyimizi gerçekleştirdik.

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Yapmış olduğumuz deneysel tez çalışmamız Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uygulamalı Eğitimler ve Bilimsel Araştırmalar Bloğunda, TÜBİTAK destekleriyle kurulan Yanma Laboratuvarında Yanma Deney Düzeneğinde icra edilmiştir. Bu deney düzeneğini; hava ve yakıt temini, hava-yakıt kütle akış kontrolcüleri, ön karıştırıcı, akustik yanma odası, yakıcı ateşleme sistemi, ölçüm cihazları ve deney ekipmanları kısımları adı altında inceleyeceğiz.

Tez çalışmamızda giderek artan enerji kaynağı ihtiyaçları ve bu kaynakların yanması sonucu çevreye zarar veren yanma ürünlerinin minimuma indirilmesi maksadıyla alternatif bir yakıt olduğu düşünülen propan gazını metan gazı ile zenginleştirerek yanma deneyi gerçekleştirilmiştir. Propan ve Metan gazlarının tercih edilmesinin önemli nedenleri diğer petrol türevi benzin ve dizel gibi yakıtlara kıyasla fiyat/performans değerlerinin yüksek olması ve düşük egzoz emisyonları üretmesidir. Deneyimizde; propan ve metanın yanma kararsızlığı, akustik zorlamanın yanma üzerine olan etkisi, kütlece propan-metan oranlarının egzos emisyonları üzerine olan etkileri, alev görüntüleri analiz edilerek alev parlaklığı, yanma verimi ve baca gazı sıcaklığı incelenmiştir.

Propan gazını metan gazı ile zenginleştirip yakmadan önce yanma limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Yanma limitleri denilince aklımıza eşdeğerlik oranı (equivalence ratio) gelmektedir. Eşdeğerlik oranı analiz edilen yanma reaksiyonuna katılan gerçek yakıt mollerinin stokiyometrik yakıt mollerine oranını temsil eder. Stokiyometrik koşullar altında, yakıt ve oksijen molekülleri tam olarak dengededir ve tepkimeye giren ürünlerden fazla yakıt veya oksijen kalmaz. Eşdeğerlik oranı (equivalence ratio), (Ø) sembolü ile gösterilmektedir.(54)

$$\emptyset = \frac{(\dot{nf}/\dot{no}2)gerçek}{(\dot{nf}/\dot{no}2)stokiyometrik} = \frac{(\emptyset/n)}{(1/n)}$$

$\emptyset$<1 ise Fakir Karışım olarak yanma gerçekleştirilir ve yakıt oranı hava oranından küçüktür.

$\emptyset$=1 ise Stokiyometrik Karışım olarak yanma gerçekleşir ve en ideal yanma şeklidir. Yakıt ve hava oranı tam olarak dengededir.

$\emptyset$>1 ise Zengin Karışım olarak yanma gerçekleşir ve yakıt oranı hava oranından fazladır. Yanmamış yakıtlar açığa çıkar.(54)

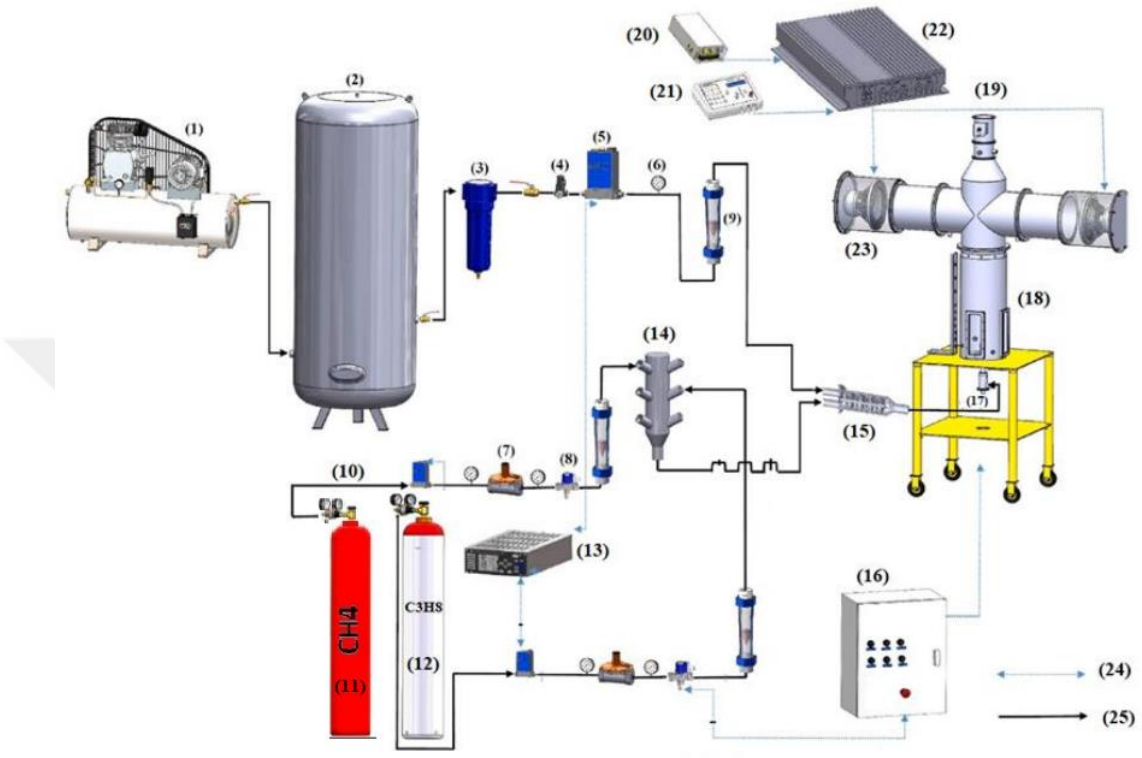
Yanma işleminin kararlı hale geldiği, alev sönme (blowoff) ve alev geri tepmesinin (flashback) yaşanmadığı yanma kararlılığının sağlandığı limitleri bulmamızda eşdeğerlik oranı çok önemlidir. Yakıt miktarını arttırarak havanın yetersiz kaldığı ve alevin uzadığı zengin karışımlarda geri tepme sınırı (flasback) belirlenir. Tam tersi havanın arttırılarak yakıtın yetersiz kaldığı fakir karışımlarda ise alev sönme (blowoff) limiti belirlenir.(55)

Yapmış olduğumuz yanma deneyinde propan ve metanın değişken eşdeğerlik oranlarında yandığı görülmüş ve deneyimizde; eşdeğerlik oranı (equivalence ratio), ($\emptyset$)=1,2 olarak deneyimiz gerçekleştirilmiştir. Akustik yanma odasında değiştirilebilir swirl başlıkları arasından 1 Swirl number (girdap numarası) kullanılmış olup, sabit 7 kW termal güç değerinde deneyimiz tamamlanmıştır. Başlangıçta propan ağırlıklı olarak deneyimize başlanmış olup %90 oranında propan, %10 oranında methan gazı yakılmıştır. İlk deneyimiz akustik zorlamasız olarak gerçekleştirilmiş olup sonrasında sırasıyla 90Hz, 185Hz ve 330 Hz akustik zorlama uygulanmıştır. Sonraki deneylerimizde propan oranı sırasıyla %80 ve %70 seviyelerine indirilip, methan ile zenginleştirme yapılarak metan seviyesi sırasıyla %20 ve %30 seviyelerine çıkartılmıştır. Akabinde ilk deneyimizde olduğu gibi akustik zorlamasız ve 90Hz, 185Hz ve 330Hz akustik zorlama değerleri yanma üzerine uygulanmıştır.

2.2 Deney Düzeneği

Deney düzeneğimiz, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi yakıtların bulunduğu ve muhafaza edildiği yakıt silindirlerini, havanın temin edildiği ve aktarıldığı kompresör ve kuru hava silindirini, hava ve yakıtın ayarlanıp iletildiği kütle akış kontrolcülerini, yanma odasına

girmeden yakıt ve havanın karıştırıldığı ön karıştırıcıyı, sonrasında yanmanın gerçekleştiği girdap üreteçli akustik yanma odasını ve yanan gazların atıldığı baca kısımlarını içermektedir.



Şekil 2.1. Deney Sistemi Şeması

1.Hava Kompresörü (5.5 Hp ve 510 lt)
2.Harici Hava Tankı
3.Filtre
4.Basınç Regülatörü
5.Elektronik Debi Ölçer
6.Manometre
7.Basınç Regülatörü
8.Solenoid Valf
9.Yüzer Tip Debi Ölçer
10.Basınç Regülatörü
11.CH_4 Tankı
12.C3H8 Tankı
13.Kontrol İstasyonu
14.Gaz Kolektörü H2 Tankı
15.Hava/Yakıt Ön Karıştırıcı
16.Kontrol Paneli
17. Brülör
18.Yanma Odası
19.Baca
20.Güç Kaynağı
21.Sinyal Üreteci
22.Amplifikatör
23.Hoparlör
24.Elektrik Bağlantıları
25.Gaz Temin Hatları



Şekil 2.2. Deney Düzeneği

2.2.1 Hava ve Yakıt Temini

Hava ve yakıt teminini sağlayan yakıt silindirleri, hava silindirleri ve kompresörleri bu kısımda incelenecektir.

2.2.1.1 Yakıt Tankları ve Basınç Ayar Regülatörleri

Yanma düzeneğinde farklı gazların karıştırılarak veya ayrı ayrı yakılması için tedarik edilmiş yakıt silindirleri Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Her yakıt silindiri üzerinde etiketli bilgileri ve güvenlik bilgilendirme kartları mevcuttur. Basınç ayar regülatörleri aracılığıyla gaz basıncı ayarlanarak sisteme gönderilmesi sağlanır.



Şekil 2.3. Yakıt Tankları

Yanma için kullandığımız propan gazı Şekil 2.3'te 2. sırada bulunan gümüş gri renkteki silindir içerisinde bulunmaktadır. Zenginleştirme için kullandığımız metan gazı ise Şekil 2.4'te kırmızı gövdeli yeşil halkalı silindir olup 50 Litre hacminde 200 bar basınç altında 12,6 metreküp %99.5 saflıkta metan gazı bulundurmaktadır.



Şekil 2.4. Metan Gazı ve Basınç Ayar Regülatörü

2.2.1.2 Hava Kompresörü ve Harici Hava Tankı

Yanma deneyimiz için gerekli diğer bir kaynak ise atmosferden sağladığımız kuru havadır. Sisteme ulaşması için kompresör (Şekil 2.5) aracılığıyla, harici bir silindirde (Şekil 2.6) depo edilerek kompresörün çalışmadığı veya sesinden dolayı sistemin etkilenmemesinin istenildiği durumlarda harici tanktan devamlı hava akışı sağlanmaktadır.



Şekil 2.5. Kompresör

Harici hava tankı kapasitesi 1000 litre ve kompresörün 500 litre hava kapasitesi ile toplam 1500 litre hava temini sağlanabilmektedir.



Şekil 2.6. Harici Hava Tankı

Harici hava tankından çıkan hava sisteme girmeden önce bir hava filtresi (Şekil 2.7) aracılığıyla istenilmeyen kir, toz, nem ve partiküllerden arındırılarak sisteme temiz bir şekilde gönderilir. Sistem güvenliği adına filtre öncesi sisteme giren havayı kesmek için emniyet vanası bulunmaktadır.



Şekil 2.7. Hava Filtresi ve Emniyet Vanası

2.2.2 Hava-Yakıt Kütle Akış Kontrolörleri ve Vakum Sistem Kontrolörü

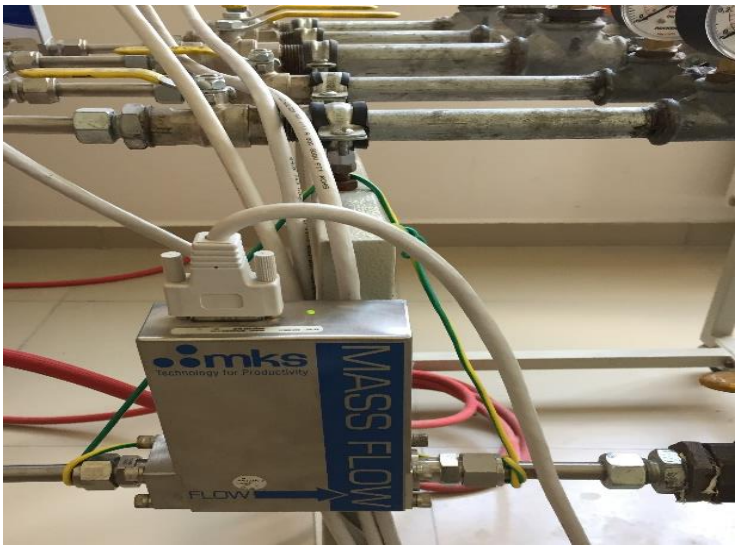
Vakum sistem kontrolörü (Şekil 2.8) cihazına girilen değerler hava kontrolcüleri (Şekil 2.9) ve yakıt kontrolcülerine (Şekil 2.10) iletilerek sisteme girmesi izin verilen miktarda

hava ve yakıt miktarının sisteme girişine izin verirler. Hava-yakıt kontrolörleri sisteme düzenli ve istenilen miktarda sabit hava akışı ve sistem yakıtını tedarik ederler.



Şekil 2.8. Vakum Sistem Kontrolörü

Vakum sistem kontrolörü MKS markalı, üzerinde her kanalın ayrı bir hava veya yakıt hattına bağlı olduğu 6 kanal vardır. Deneyimizde B1 hattı propanı, A1 hattı metanı ve C1 hattı havayı ayarlamamızda kullanılmıştır. Vakum kontrol sistemi üreticisi MKS tarafından sisteme girilen gazların yoğunlukları ve düzeltme faktörü değerleri hesaplanarak akış debileri elde edilir. Azot gazı referans alınarak her gaz için düzeltme faktörü, üretici tarafından belirlenmiştir. Elde edilen akış debisi ile sisteme girildikten sonra hassas bir şekilde yanma odası için hava ve yakıt tedarik eder.(56)



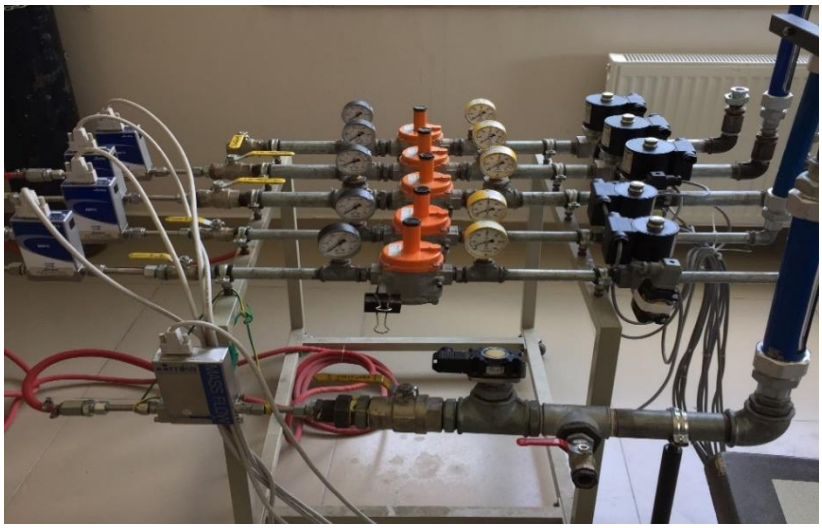
Şekil 2.9. Hava Kontrolörü

Hava kontrolörleri MKS markalı Şekil 2.8 de gösterildiği ok yönünde hava akışına izin veren 300 SLPM (standart litre/dakika) kapasitesine sahip cihazlardır.



Şekil 2.10. Yakıt Kontrolörleri

Sisteme giren her yakıt için ayrı bir kontrolörcü bulunur. Yakıt kontrolörcüleri MKS markalı 0.6-30 SLPM (standart litre/dakika) aralığında çalışan sisteme düzenli eşit oranlarda yakıt sağlayan cihazlardır.



Şekil 2.11. Gaz Akış Hatları

Yakıt ve hava kontrolcülerinden çıkan gazların yanma düzeneğine ilerlediği hatlar üzerinde bulunan, hattın takip ve kontrol edilmesini sağlayan manometreler ve şamandıralı debimetreler içeren gaz akış hatlarıdır. (Şekil 2.11)



Şekil 2.12. Yakıt Kollektörü

Gaz akış hattından çıkan yakıtlar sonraki aşamada yakıt kollektörüne (Şekil 2.12) girerler. Yanma düzeneğimizde birden fazla yakıt kullanıyor isek yakıtların havayla buluşmadan önce kendi içinde birleştiği yakıt kollektörünü kullanırız.

2.2.3 Ön Karıştırıcı (Pre-Mixture)

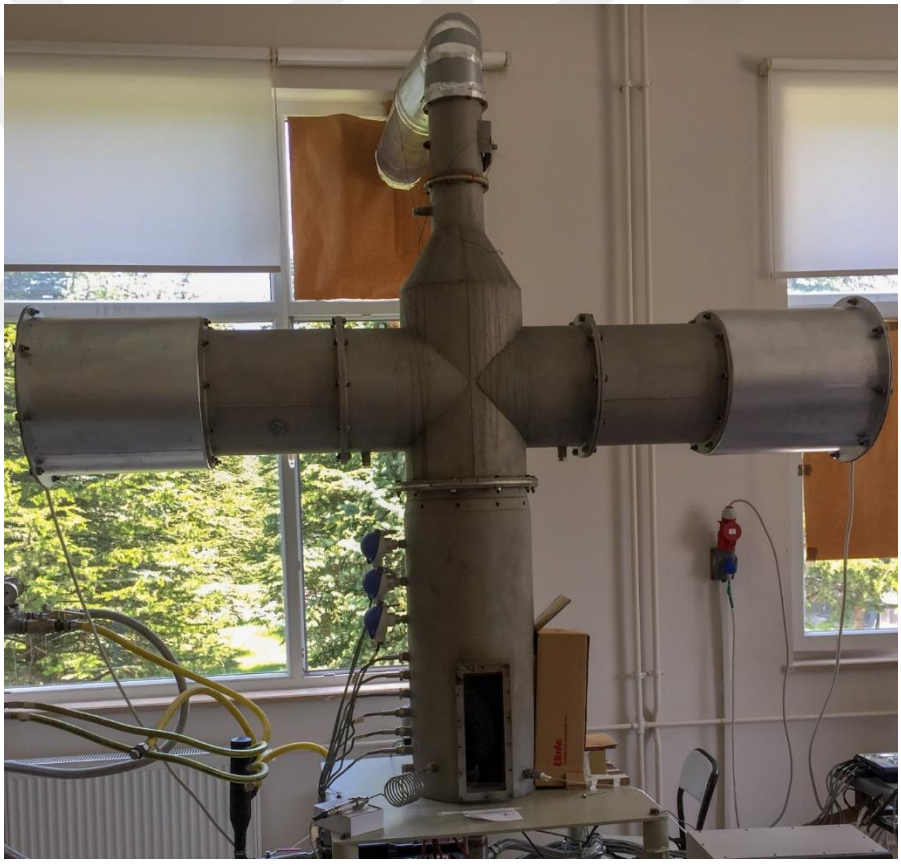
Akustik yanma odasına gelmeden önce hava-yakıt akış kontrolcüleri tarafından istenilen miktarlarda ayarlanmış olan propan gazı, metan gazı ve kuru hava ön karıştırıcıda karıştırılarak yanma odası girişine gönderilir. Ön karıştırıcıda yanmanın gerçekleşmesi için gerekli olan yakıcı ve yanıcı ürünler karıştırılarak yanma için ideal hale getirilir. Şekil 2.13'te deney düzeneğimizdeki ön karıştırıcı gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Ön Karıştırıcı

2.2.4 Akustik Yanma Odası

Yanma odası içerisinde yüksek sıcaklık ve basınç değerlerine ulaşıldığı için, yanma odası bu zorlamalara dayanıklı paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Şekil 2.14'te gösterilen yanma odasının uzunluğu 175 cm, dış çapı 33 cm ve iç çapı 32 cm'dir. Yapılan deneyleri değerlendirmek maksadıyla yanma odası çevresinde ve bacada; basınç, sıcaklık ve egzoz emisyon değerlerinin incelendiği erişim portları vardır. Ayrıca yanma odasının ön ve yan kısımlarında alev parlaklığı, alev sönmesi gibi durumları incelediğimiz hızlıca sökülüp takılan temperli camlar mevcuttur. Kolay sökülüp takılması sayesinde brülöre takılan swirl (girdap) kanatçıkları rahatlıkla değiştirilebilmektedir.



Şekil 2.14. Akustik Yanma Odası

2.2.4.1 Değişken Kanatçıklı Yakıcı (Brülör)

Yakıcı, kollektörde birleşen propan ve metan gazının hava ile birleşmek ve karışmak için ulaştığı son duraktır. Yanma öncesi yakıt ve havanın ideal oranda karışmasını sağlar. Yakıcı, (Şekil 2.15) ucunda bulunan değiştirilebilir girdap üreteçlerine (kanatçık) sahiptir.

Yapmış olduğumuz deneylerde 1 Swirl sayılı girdap üreteci kullanılmıştır. Yakıcının sahip olduğu girdap kanatçıkları (Şekil 2.16) ve ön karıştırma işlevi yanmaya önemli bir katkı sağlamaktadır. Yakıcının ısıl güç kapasitesi 10 kW 'ya kadar çalışabilmektedir. Ancak bu tez çalışmasında yapmış olduğumuz deneyler 7 kW yakıcı gücünde gerçekleştirilmiştir.(57)



Şekil 2.15. Yakıcı (Brülör)

Yanma kararsızlıkları, yanma teknolojisinde uzun zamandır bilinen bir sorunu temsil eder. Akustik ve türbülanslı dönen alevler arasındaki karmaşık etkileşimler henüz tam olarak anlaşılamamıştır, bu da yeni yanma sistemlerinin kararlılığını güvenilir bir şekilde tahmin etmeyi çok zorlaştırmaktadır. Deneylerde, girdap jeneratörünün konumu, dinamik alev tepkisi üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Bu durum, sistem tanımlamasıyla birlikte hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak daha da araştırılmaktadır.(58)

Girdap üreteçleri (Şekil 2.16) hava ve yakıtın yanma odasına girmeden önce swirl (dönü hareketi) sayesinde yanma öncesi daha iyi karışmalarını ve daha iyi yanmalarını sağlamaktadır. Girdap üreteçlerinin dinamik alev tepkisi üzerine olan önemli etkisi, yanma kararlılığına olumlu etki yaparak, dolayısıyla yanma sistemine olumlu katkı sağlaması üzerine birçok yanma deneyinde tercih sebebi olmaktadır. (59)

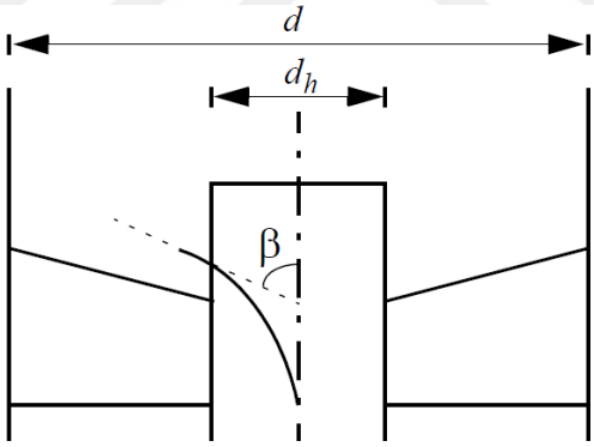


Şekil 2.16. Değişebilir Girdap Üreteçleri (Kanatçıkları)

Girdap üreteçleri swirl sayısı ile nitelendirilmektedir ve kısaca şu formül ile ifade edilir;

$$Swirl = \frac{2}{3}\left[\frac{1-\left({}^{dh}/_{d}\right)^{3}}{1-\left({}^{dh}/_{d}\right)^{2}}\right].\tan(\emptyset) \qquad (2.1)$$

Swirl formülünde; dh, üreteç merkez çap değerini; d, üretecin dış çap değerini; ∅, üreteç kanat açısını ifade etmektedir. (Şekil 2.17) Deneylerde, ${}^{dh}/_{d}$ oranını ve kanat açısı değiştirerek farkı girdap numaralı üreteçler üretilmiştir. Genellikle kullanılan swirl numaraları Tablo 2.1' de gösterilmiştir. (59) Deneyimizde 1 numaralı swirl kullanılarak yanma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.17. Swirl Değerleri Ölçütü

Tablo 2.1. Swirl Sayılarına Göre Girdap Üreteçleri ve Açıları

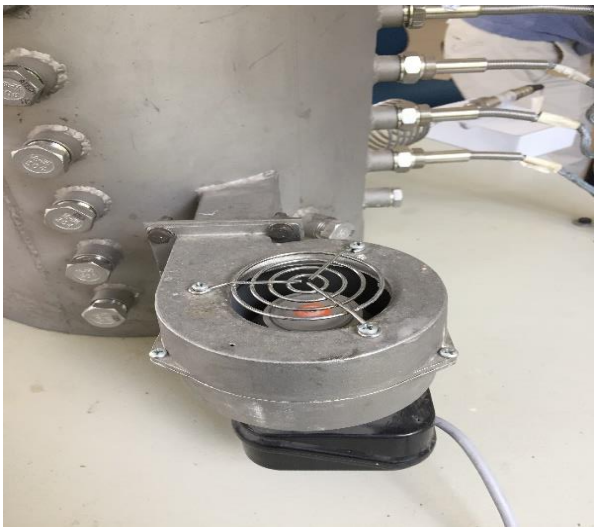
Swirl Sayısı	**dh/do**	∅
0,2	0,5	14,42°
0,4	0,5	27,2°
0,6	0,5	37,6°
0,8	0,5	45,8°
1,0	0,5	52,1°
1,2	0,5	57,05°
1,4	0,5	60,94°
1,6	0,5	64,07°

2.2.5 Yakıcı Ateşleme Ünitesi

Yanmanın başlatılması, sonlandırılması ve müdahale edilmesi için brülöre verilen komutların iletildiği ünitedir. Şekil 2.18'de gösterilen bu ünite yanma odasının ve sistem bilgisayarlarının yanında bulunmaktadır. Acil durumlarda sistemi kapatması için ″emergency″ butonu mevcuttur. Bunun yanı sıra ünitede yanma odası soğutucuları (Şekil 2.19) kontrol edilebilmekte, iyonizasyon çubuğu ve gaz besleme hatlarının kontrolü sağlanmaktadır. Brülörde bulunan iyonizasyon çubuğu alev geri tepmesi (flashback) ve alev sönmesi (blow-off) gibi durumlarda sistemi koruyan bileşendir.(60)



Şekil 2.18. Yakıcı Ateşleme Ünitesi



Şekil 2.19. Yanma Odası Soğutucu Sistemi

2.2.6 Ölçüm Cihazları ve Deney Ekipmanları

Ölçüm cihazları ve deney ekipmanları deneyimizi sayısal olarak ölçütlendirmeye ve yanma işlemi üzerinde olumlu etkileri olan yardımcı kaynaklardır.

2.2.6.1 Basınç Ölçerler

Yanma odası üzerinde değişik noktalarda bulunan basınçölçerler (Şekil 2.20) yanma odası üzerindeki basınçları ölçmeye yardımcı olurlar. Yanma odası üzerinde 2 tip basınç ölçerimiz mevcuttur. Birincisi yanma odasındaki 0-10 bar aralığını ölçmemize yarayan piezo-dirençli basınçölçer (Keller Marka), ikincisi ise dinamik basınçölçer (PR23 Series), yanma odası üzerine akustik zorlama yapıldığı zaman değişen basınç değerlerini ölçmemizi sağlar.



Şekil 2.20. Piezo-dirençli basınçölçer (Keller) ve dinamik basınçölçer (PR 23)

2.2.6.2 Isı Sensörleri (Termocouple)

Yanma deneyinin incelenmesinde önemli parametrelerden birisi olan sıcaklık, düzeneğimizde 2 tip ısı sensörü vasıtası ile ölçülür. Bunlar B tipi ve K tipi (Şekil 2.21) ısı sensörleridir. B tipi ısı sensörleri, yanma odasına daha yakın olan yüksek sıcaklıkları ölçebilen (1800 C°'ye kadar) sensörlerdir. K tipi ise yanma odasından daha uzakta

bulunan, krom-nikel alaşımından üretilen ve 1200 C°'ye kadar sıcaklık ölçebilen ısı sensörleridir.



Şekil 2.21. B ve K tipi Isı sensörleri

Termokopul ve Basınç sensörlerinin deney düzeneğimiz üzerindeki yerleşimi Şekil 2.20'da gösterilmiştir.

2.2.6.2.1 Isı Sensörleri (Termocouple) Ölçüm Hatalarının Düzeltilmesi

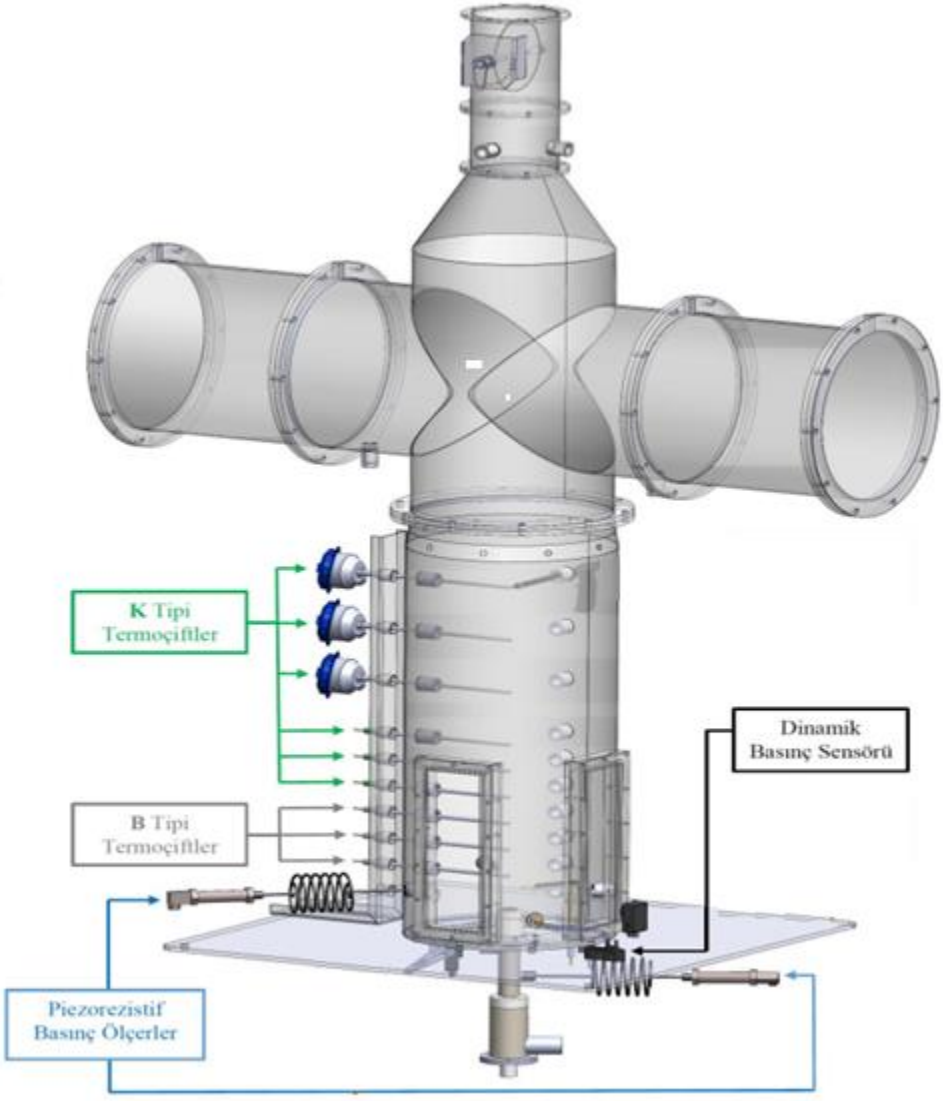
Her deney düzeneğinde olduğu gibi yapmış olduğumuz deney düzeneğinde ısıl kayıplar söz konusudur. Isıl kayıpları önlemenin temelde iki yolu vardır. Birincisi sistemde açığa çıkan ısıl değerleri gerçek anlamda ölçebilen, kayıp değerleri olmayan ısıl sensör tasarımı yapmak. İkincisi ise ısıl ölçüm cihazlarından kaynaklanan hata limitlerinin tespit edilip sistemin açığa çıkarmış olduğu gerçek ısıl değerlerinin belirlenmesidir. (61)

Deney düzeneğimizde ölçümleri gerçekleştirdiğimiz aletlerin hata limitleri ve sistem kayıpları olduğu için bu deneyde ikinci yol kullanılmıştır. Kullanmış olduğumuz ölçüm cihazlarındaki ısı kayıpları, sensörler içerisinde yer alan teller arasında iletimden kaynaklı ısı kayıpları ve ışınım yoluyla yanma duvarlarının ısıtılması dolayısıyla gerçekleşen ısıl

kayıplar ile gerçekleşmektedir. Bu kaybı önlemek amacıyla Denklem 2.1 de sadeleştirilmiş hali verilen formül kullanılmıştır.(62)

$$T_{Gaz} = T_{Tel} + \frac{\sigma\varepsilon \mathrm{Tel}(T_{Tel}^4 - T_{Duvar}^4)}{h} \qquad (2.1)$$

Yakıtların yanması sonucu gerçekte açığa çıkan sıcaklık değerlerini belirtmek için, sıcaklık kayıpları aletin ölçmüş olduğu sıcaklık değerlerine eklenerek yanma sonucu açığa çıkan net sıcaklık değerleri düzenlenmiştir.



Şekil 2.22. Düzenek Üzerinde Termocouple ve Basınçölçerler

2.2.6.3 Emisyon Ölçüm Cihazı

Doğaya en çok zarar veren kirleticilerden olan egzoz emisyonları deneyimiz için çok önemlidir. Bu değerleri ulaşıp değerlendirmemiz için yanma düzeneğimizde, NOVA Plus RCU emisyon cihazı (Şekil 2.23) kullanılmıştır. Emisyon ölçüm cihazı, O2, CO, CO2, NOx (NO ve NO2) ve SO2 gibi gazları ölçebilmektedir ve değerleri aşağıda Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Emisyon Cihazı Ölçüm Parametreleri

Emisyon Gazları	Hata Oranları	Ölçüm Aralığı
O2	+/- %0.2	-
CO	+/- %5 ya da +/-5 ppm*	0-4000 ppm
CO	+/- %10	>4000 ppm
NO	+/- %5 ya da +/-10 ppm*	0-1000 ppm
NOx	+/- %10	>1000 ppm
CO2	+/- %0.3	-

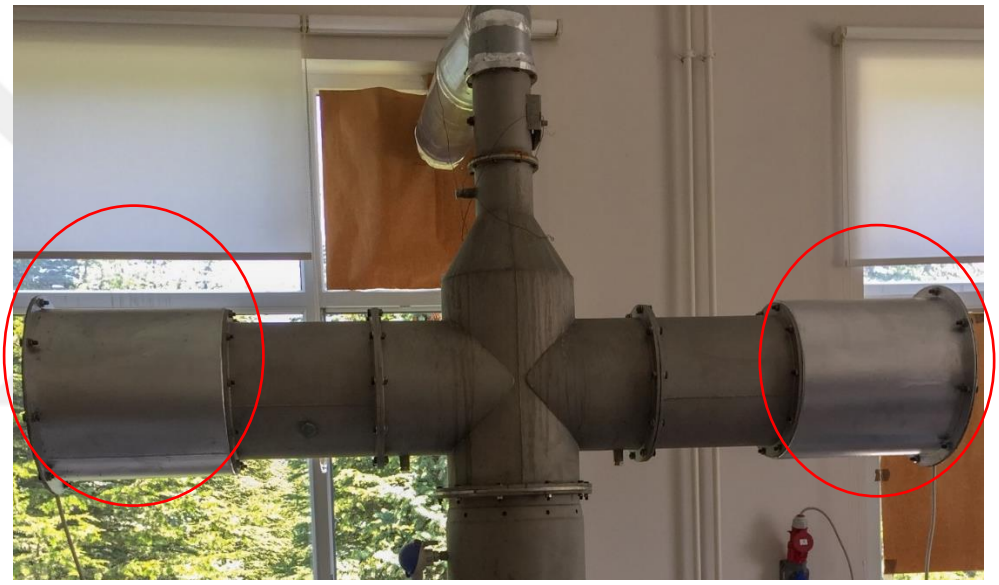
*CO ve NO için ölçülen değerlerden hangisi yüksek ise o alınır.



Şekil 2.23. Emisyon Ölçüm Cihazı

2.2.6.4 Hoparlör Akustik Zorlayıcı

Yanmanın daha kararlı hale gelmesi alev dağılmasını önlemek amacıyla yanma odasının üst kısımlarında bulunan kulakçıklara iki taraflı sökülüp takılabilen hoparlörler yerleştirilmiştir. Hoparlör Pioneer marka olup her biri 700W çıkış gücü ile sisteme toplam 1400 W ses gücü verebilmektedir. 95 dB hassasiyeti, 20-125 Hz çalışma aralığı ve 4 ohm empedansı vardır. Kulakçıklarda muhafaza edilen hoparlörlerin çapı 30,48 cm'dir. Şekil 2.24'te yanma düzeneğindeki kulakçıklar ve Şekil 2.25' te kulakçık içindeki hoparlörler gösterilmiştir.



Şekil 2.24. Yanma düzeneğinde içinde hoparlör bulunan kulakçıklar



Şekil 2.25. Hoparlör

Yanmanın baskılanması, kararlılığın oluşması ve alevin dağılmaması gibi büyük etkileri olan akustik zorlamanın deneyimizde büyük bir önemi vardır. Yanma düzeneği üzerinde akustik zorlamayı sağlayan hoparlöre gelerek dalgalarının yayılmasında görev alan yardımcı kaynaklarımız vardır. Bunlar; fonksiyon jeneratörü, amplifikatör ve osiloskoptur.

Sırasıyla ses dalgalarının hoparlöre gitmesinde yardımcı olan ekipmanların görevleri şu şekildedir. Fonksiyon jenaratörü (Şekil 2.26) sesin oluşmasında, 0.5 Hz ile 5 MHz arasında sinyalleri üretebilen bir ses üretecidir. Sonrasında oluşturulan sinyallerin toplanarak düzenlendiği ve güçlendirildiği yer olan amplifikatör (kuvvetlendirici), Behringer Europower Marka olup (Şekil 2.27) sinyalleri 20 Hz ile 20 kHz' ye kadar yükseltebilmektedir. 4 kW güç sağlamaktadır.



Şekil 2.26. Fonksiyon Jeneratörü



Şekil 2.27. Amplifikatör

Güçlendirilen dalgaların hoparlöre gitmeden önceki son durağı Osiloskoptur. (Şekil 2.28) Burada üretilen sinyallerin hoparlöre gitmesiyle oluşabilecek faz farklarının, takip edildiği ve faz farkının fark edilip engellendiği duraktır. Faz farkı yanma üzerinde dengesiz dinamik hareketler sağlayarak yanmayı olumsuz etkiler.



Şekil 2.28. Osiloskop

3. BÖLÜM

DENEY SONUÇLARI

3.1 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Yanma Üzerine Etkisi

Yapılan araştırmalar sonucunda Türkiye'de artan enerji ihtiyacına bağlı, kullanılan enerji kaynaklarının petrol, linyit ve taş kömürü gibi fosil kaynaklı yakıtlar olması sonucu karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO) gibi emisyonlar artmaktadır. İnsanlara ve doğaya zararlı olan emisyon gazlarını azaltmak için fosil kaynaklı yakıtların kullanımının azaltılması kaçınılmazdır. Bu amaçla hemen hemen hiç CO, CO_2 gibi zararlı emisyonlar üretmeyen yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, kömür ve ağır petrol yakıtları yerine doğalgaz kullanımı önemli ölçüde emisyon oluşumunun önlenmesine katkı sağlayacaktır.(63)

Deneyimizde Propan gazını metan gazı ile zenginleştirerek yanma deneyini gerçekleştirdik. Metan gazını seçmemizde, metanın yanma üzerine olumlu kimyasal ve termal birçok özelliğinin olması, rahatlıkla temin edilebilir olması ve ucuz olması gibi sebepler etken olmuştur. Bunun yanı sıra doğalgazın yapıtaşını oluşturan metan, alkan grubunun en basit üyesidir ve hidrojen karbon oranının 4'e 1 olması nedeniyle benzine kıyasla %20 daha düşük CO2 emisyonu üretmektedir.(27)

Propan gazının özelliklerinin metan gazının özelliklerine benzer olduğu açıktır ve metanın potansiyel uygulaması olan her yerde, propan genellikle dikkate alınır ve söz sahibidir. Propan, metan ile karşılaştırıldığında, daha düşük bir özgül enerjiye ve daha düşük bir soğutma kapasitesine sahiptir. Bununla birlikte, daha yüksek kaynama noktası daha kolay kullanım anlamına gelir.(18, 19)

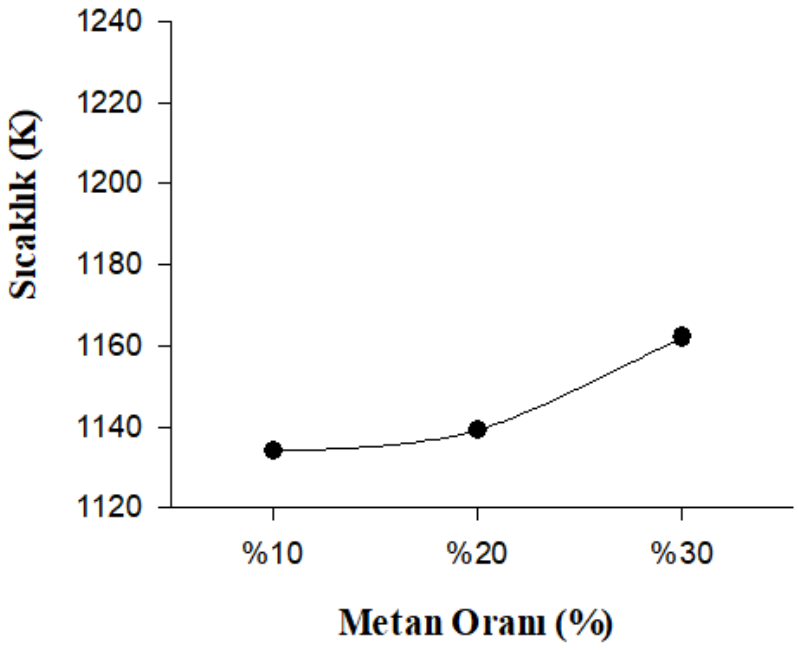
Metanın yüksek karbon-hidrojen bağ enerjisine sahip olması, diğer hidrokarbonlara kıyasla yüksek tutuşma sıcaklığı, düşük alev hızı ve düşük reaktiviteye sahip olmasını

sağlamaktadır.(64) Bu deneyde sırasıyla %10, %20 ve %30 oranında metan gazı ile zenginleştirme yapılmıştır.

3.1.1 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Sıcaklık Üzerine Etkisi

Yanma kararlılığını etkileyen önemli değerlerden biri de yanma sıcaklığıdır. Gerçekleştirdiğimiz deneyde sıcaklık parametreleri, yanma odasının farklı noktalarına yerleştirilmiş olan ısı sensörleri vasıtasıyla ölçülmüştür. Kullandığımız ısı sensörleri B ve K tipi olup yanmanın gerçekleştiği noktaya yakın olanlar B tipi, daha uzak noktada daha düşük sıcaklıklar ölçebilen sensörler K tipi sensörlerdir. 2B konumlu ısıl sensörlerden aldığımız sıcaklık değerleri sırası ile %10, %20 ve %30 metan oranlarında 1134 K, 1139 K ve 1162 K değerleridir. Metan oranı arttıkça sıcaklık değerinin artması metanın öz ısısının propanın öz ısısından yüksek olması ile açıklanmaktadır.(18)

Şekil 3.1'de 2B konumlu ısıl sensörlerden alınan %10, %20 ve %30 oranlarında metan içeren propan-metan yakıtının sıcaklık değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Metan oranına sıcaklığa etkisi

Baca gazı emisyon cihazı NOVA Plus RCU ile ölçüm yaptığımızda sırasıyla %10, %20 ve %30 metan oranlarında 193°C, 198°C ve 205°C değerleri kaydedilmiştir.

Deneyimizde metan oranını arttırdığımızda baca gazı sıcaklığının arttığı tablo 3.1'de gösterilmektedir.

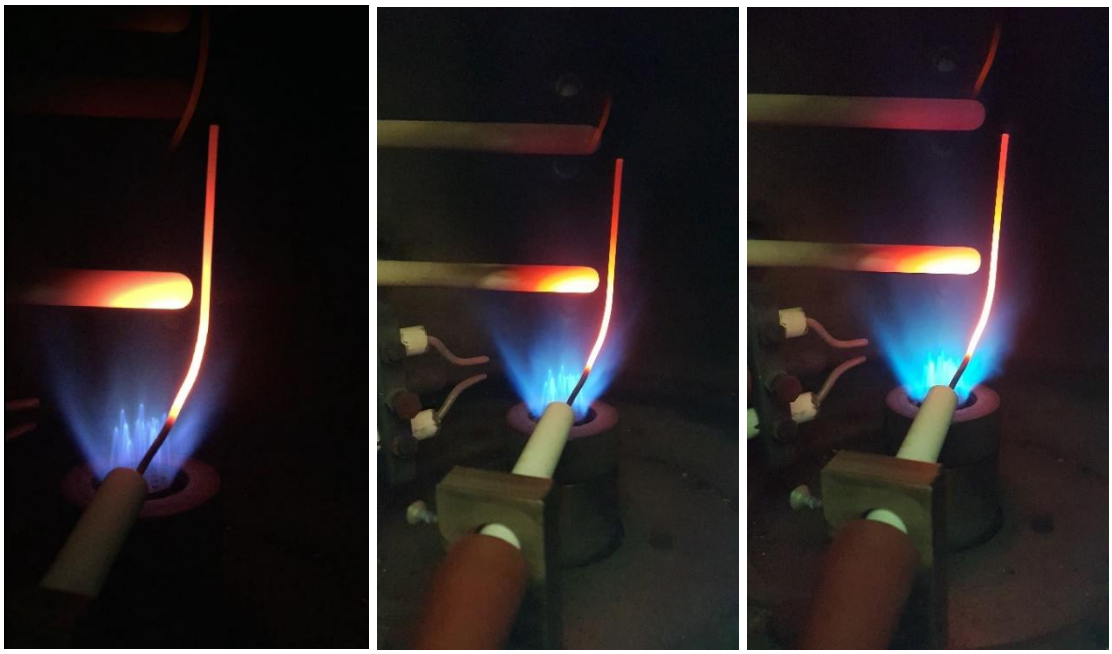
Tablo 3.1. Artan Metan Oranlarına Göre Değişen Baca Gazı Sıcaklığı

%10 Metan	**%20 Metan**	**%30 Metan**
193°C	198°C	205°C

Sonuç olarak değerlendirdiğimizde 2B konumlu ısıl sensörler ve baca gazı emisyon cihazı ile yapılan ölçümler sonucunda, metan oranı arttıkça açığa çıkan sıcaklık değerinin benzer şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

3.1.2 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin Alev Üzerine Etkisi

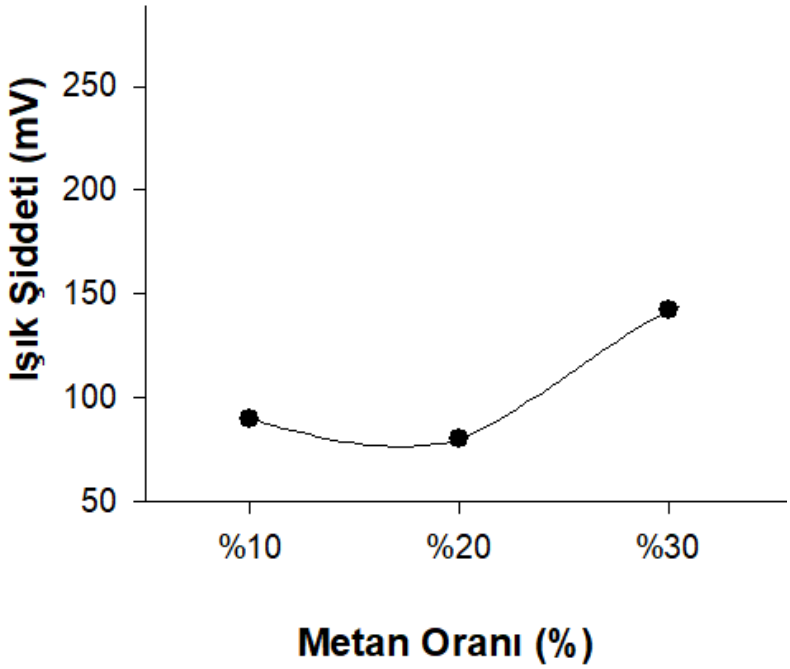
Alternatif yakıt ihtiyacının karşılanması adına yapmış olduğumuz deneyde, propan gazına metan gazını ekleyerek metan ile zenginleştirme gerçekleştirdik. Şekil 3.2' de gösterilen 3 farklı deney sonucunda metan oranının artması ile alev parlaklığının ve canlılığının arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca %10 metan oranından %30 metan oranına geçildiği zaman, alev genişliği ve alev boyunun arttığı fark edilmektedir.



%10 Metan %20 Metan %30 Metan

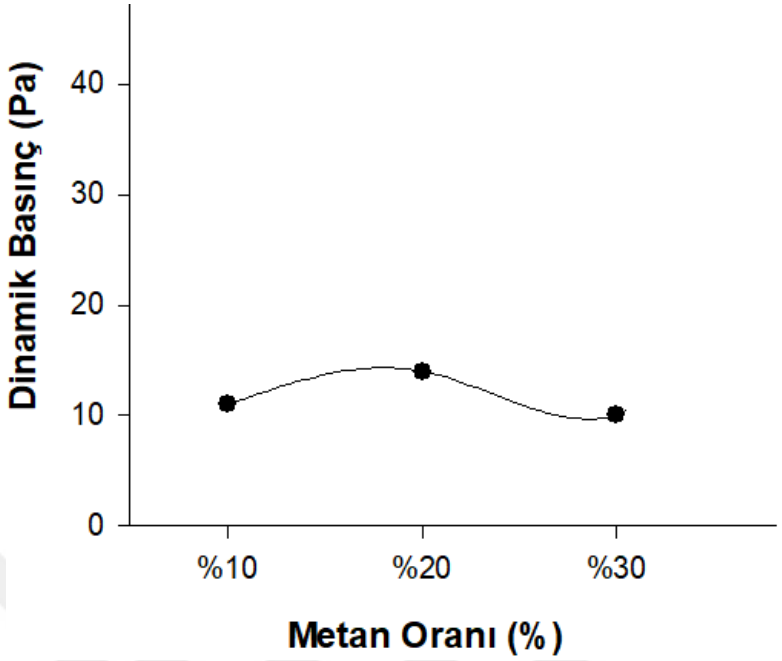
Şekil 3.2. Metan oranının alev parlaklığına etkisi

Metan oranının artması ile değişen bir diğer faktör ışık şiddetidir. Metan oranını %10, %20 ve %30 değerlerine çıkarttığımız zaman oluşan ışık şiddetleri ortalama sırasıyla 89,84 mV, 80,15 mV ve 141,92 mV'dir. Alevin çıkarmış olduğu ışık şiddeti anlık olarak değişkenlik gösterdiği için değerler ortalama alınmıştır. Metan oranının %10'dan %20'ye çıkarılması ile çok fazla ışık şiddeti değişmez iken %30 oranına çıkardığımızda fark edilebilir miktarda ışık şiddeti artmaktadır. Termal özelliklerinden dolayı metan oranını, %10 seviyesinden %30 seviyesine çıkardığımız zaman ışık şiddetinin ve ışık yoğunluğunun arttığını görmekteyiz.(18) Şekil 3.3'te metan oranına göre değişen ışık şiddeti gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Metan oranına göre değişen ışık şiddeti

Metan oranını arttırılması ile değişen diğer faktörleride etkileyen parametre dinamik basınçtır. Dinamik basınç sistemde %10 metan var iken ortalama 11 Pa değerinde ölçülmüştür. Metan oranını %20'ye çıkardığımızda ise ortalama 14 Pa değerine ulaşarak dinamik basıncın arttığı gözlemlenmektedir. Son olarak metan oranını %30 seviyesine çıkardığımızda sistemde ölçülen ortalama dinamik basınç değeri 10 Pa değerine ulaşmış olup yanmanın hareketli davranışlarından dolayı 10-14 Pa aralığında çok büyük bir farklılık gözlemlenmemiştir. Şekil 3.4'te metan oranının arttırılmasına bağlı değişen dinamik basınç değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Metan Oranına Bağlı Dinamik Basınç (ppm)

3.1.3 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin NOx Emisyonu Üzerine Etkisi

Yanma sonucu açığa çıkan NO ve NO emisyonunun oksitlenmesi sonucu oluşan NO_2 emisyonlarının oluşturduğu genel isme NO_X emisyonu denilmektedir. Formülden de anlaşılacağı üzere NO_X emisyonunun oluşması için oksijen (O_2) olması gereklidir. Ayrıca NO_X oluşumunu tetikleyen bir diğer faktör yüksek yanma sıcaklığıdır. (18, 27)

Zeldovich reaksiyon sürecinde açıklandığı gibi NOx oluşumu, Tablo 3.2'de kimyasal denklemle tarif edilebilen azotun endotermik oksidasyonunda gösterilmiştir.

$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$ tepkimesinin Zeldovich mekanizmasına göre basitleştirilmiş hali şu şekildedir;

Tablo 3.2. Zelvodich'e Göre NO_X Oluşum Tablosu

N2 + O = NO + N,
N + O2 = NO + O,
N + OH = NO + H.

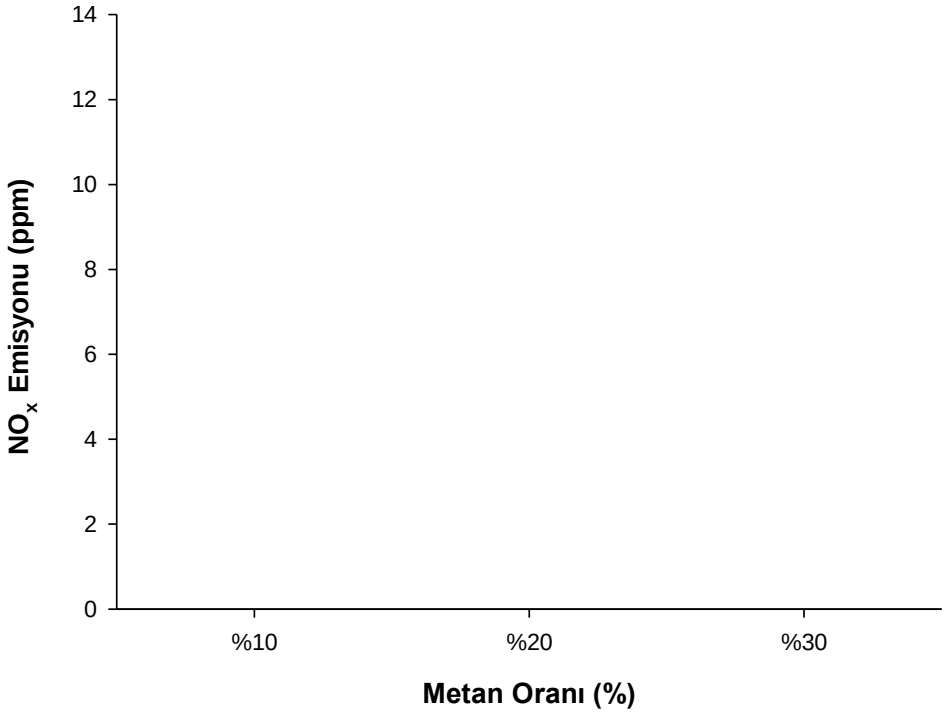
Tablo 3.2'deki Zelvodich mekanizmasına göre NO_X moleküllerinin oluşması için tepkimenin girenler kısmında oksijen ve türevlerinin bulunması gereklidir. Deneyimizde

%10, %20 ve %30 oranında metan gazı ile zenginleştirme yapılmıştır. Yanma sonucunda sırasıyla; %4.7, %4.9 ve %3 O_2 açığa çıkmıştır. NO_x oluşum mekanizmasında da bahsettiğimiz üzere tepkimeye ne kadar fazla O_2 girerse, NO_x miktarı aynı oranda artacaktır. Deneyimizde de bu sonuçla paralel şekilde sırasıyla 10 ppm, 13 ppm ve 9 ppm NO_X açığa çıkmıştır. Fakat açığa çıkan NO_X değerleri NOVA Plus RCU cihazının Tablo 2.2'de gösterildiği parametre tablosunda +-10 ppm hata oranında ölçüm yaptığı dolayısıyla dikkate alınamayacak kadar küçük değerler olduğu belirlenmiştir. Tablo 3.3' te oksijen miktarına göre değişen NO_X değerleri gösterilmiştir.

Tablo 3.3. Metan oranlarına göre NO_x değerleri

	%10 Metan	**%20 Metan**	**%30 Metan**
O_2	**4,7**	**4,9**	**3**
NO_X	**10**	**13**	**9**

Şekil 3.5'te %10, %20 ve %30 metan oranlarında açığa çıkan çok düşük miktardaki NO_X değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Metan Oranına Bağlı NO_x Değerleri

3.1.4 Metan Gazı İle Zenginleştirmenin CO Emisyonu Üzerine Etkisi

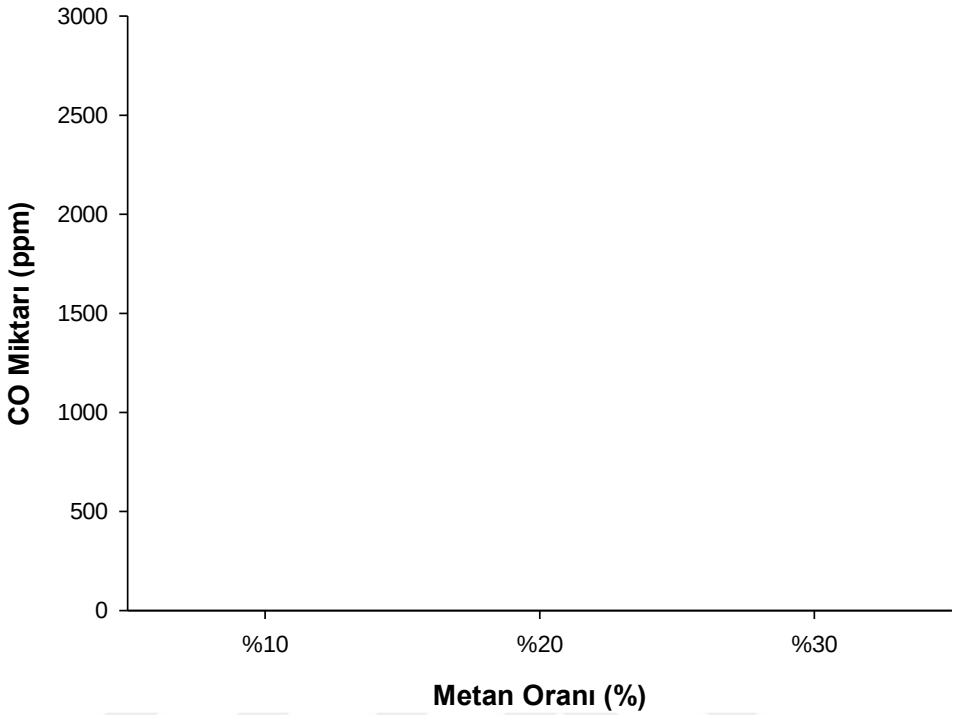
Karbon monoksit (CO), renksiz, kokusuz ve sağlık açısından kandaki hemoglobine (oksijen taşıyıcısı) bağlanarak vücudun oksijen kapasitesini düşürerek asfiksiye (oksijen yetersizliğinden ileri gelen boğulma) ve hatta ölüme neden olabilecek zararlı bir gazdır.(65) Bilimsel yanma deneyleri açısından ise, genellikle tepkimeye giren oksijen miktarının eksikliğinde, uygun hava yakıt oranının olmaması halinde, eksik yanma gerçekleşerek yakıtı oluşturan karbonların tam olarak yanmadığı durumlarda açığa çıkmaktadır.(45)

Anlaşıldığı üzere yakıtla, yani karbonlarla ne kadar çok oksijen tepkimeye girerek tam yanma gerçekleşirse o kadar az CO emisyonu açığa çıkar. Yapmış olduğumuz deneyde metan oranını %10, %20 ve %30 seviyelerine çıkardığımızda yanma sonucunda açığa çıkan oksijen miktarları sırası ile %4.7, %4.9 ve %3 'tür. Yani yanma sonucunda bacada ölçülen emisyon değerlerinde ne kadar az oksijen çıktıysa o kadar çok oksijen tepkimeye katılmıştır. Sonuç olarak %3 oksijen çıkan %30 metan oranında 1620 ppm CO açığa çıkmış, %4.7 oksijen çıkan % 10 metan oranında 2560 ppm CO açığa çıkmış ve %4.9 oksijen çıkan %20 metan değerinde 2700 ppm CO açığa çıkarak en fazla bu oranda CO tespit edilmiştir. Tablo 3.4' te değişen O_2 değerlerine göre artan CO değerleri gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Metan oranlarına göre CO değerleri

	%10 Metan	**%20 Metan**	**%30 Metan**
O_2	**4,7**	**4,9**	**3**
CO	**2560**	**2700**	**1620**

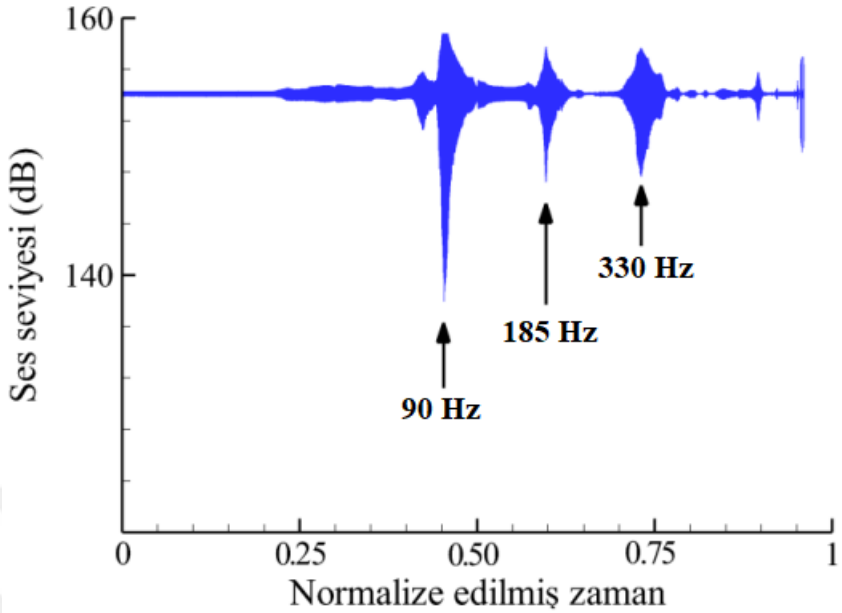
Şekil 3.6'da %10, %20 ve %30 metan oranlarında açığa çıkan CO değerleri gösterilmektedir.



Şekil 3.6. Metan Oranına Bağlı CO Değerleri

3.2 Akustik Zorlamanın Yanma Üzerine Etkisi

Deneyimizin ilk aşamasında, zorlamasız olarak yaktığımız %10, %20 ve %30 oranlarında metan ile zenginleştirilmiş propan yakıtı, değişen koşullar altında incelendi. İkinci aşamada ise propan-metan karışımlı yakıtı akustik zorlama altında yakarak oluşan NO_X, CO gibi emisyon değerleri, akustik zorlamanın sıcaklık üzerine olan etkileri ve akustik zorlamanın alev üzerine olan etkileri incelenmiştir. Akustik zorlamayı deney düzeneğinin iki tarafına yerleştirilen hoparlörler aracılığı ile gerçekleştirdik. Fonksiyon jeneratöründen çıkarak hoparlöre giden 30-400 Hz aralığında ses frekans dalgaları incelenerek ani basınç değişimlerinin gerçekleşmiş olduğu 3 farklı frekans noktası tespit edilmiştir. Bu frekans noktaları 90 Hz, 185 Hz ve 330 Hz'dir. Şekil 3.7'de, Y ekseni üzerinde belirgin basınç değişimlerinin olduğu frekans noktaları akustik zorlanın belirleyici olduğu frekans noktalarını bulmamızı sağlarken, X ekseni üzerinde bulunan 0-1 aralığındaki normalize edilmiş zaman değeri deneyin akustik zorlama altında gerçekleştiği zaman aralığının net görülmesi için belirli oranlarda minimize edilerek deney süresince geçen zamanı 0-1 arasında göstermektedir.



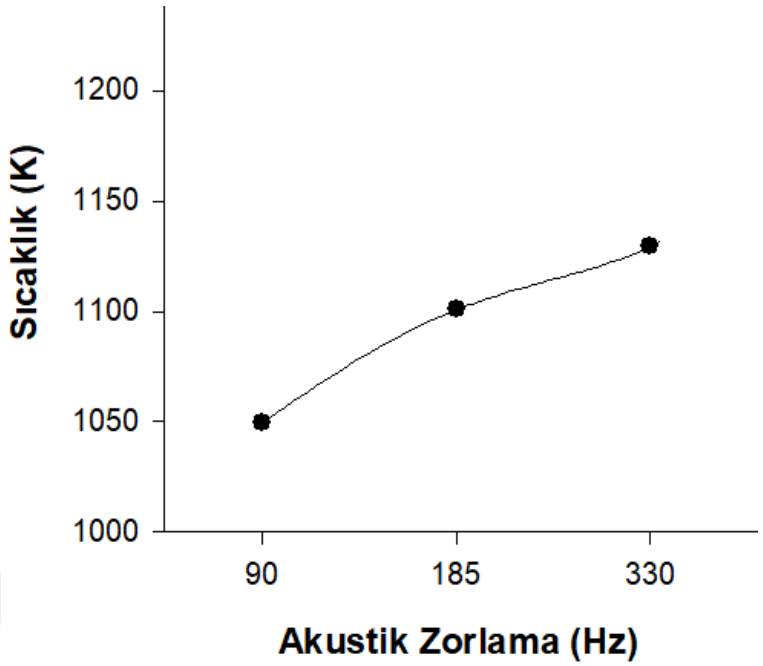
Şekil 3.7. Akustik Zorlama Frekans Noktaları

3.2.1 Akustik Zorlamanın Sıcaklık Üzerine Etkisi

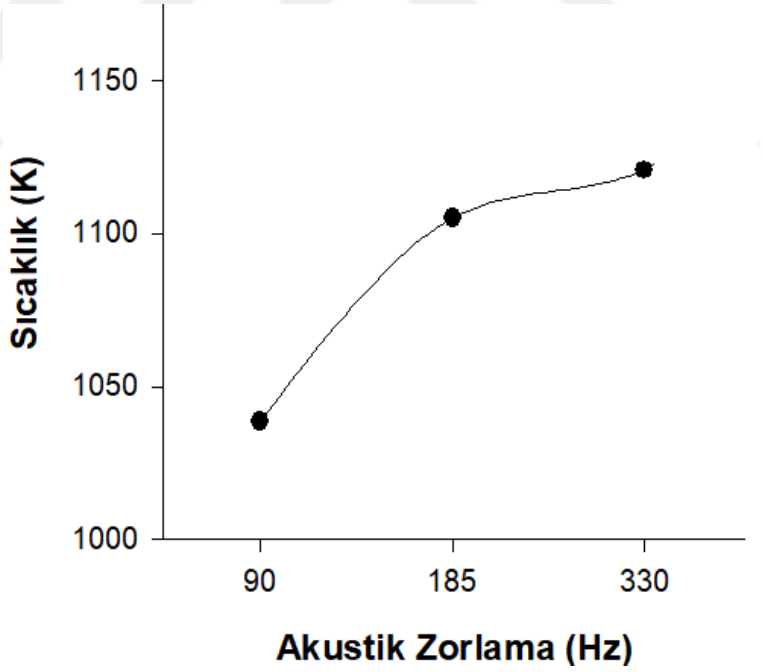
Yanma odasına yakın olan 2B konumlu ısıl sensörlerden alınan veriler sonucunda elde edilen ortalama sonuçlar Tablo 3.5'te gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre %10 ve %20 Metan oranında akustik zorlamalı olarak yapılan deneylerde, akustik zorlama 90Hz, 185 Hz ve 330 Hz'e çıktığında açığa çıkan sıcaklık değerinin zorlamaya bağlı olarak doğru orantıda artttığı Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da görülmektedir. %30 Metan oranında ise açığa çıkan sıcaklık miktarının akustik zorlamaya bağlı olarak çok değişmediği yaklaşık olarak aynı kaldığı Şekil 3.10'da görülmektedir.

Tablo 3.5. Akustik Zorlama Frekansına Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri

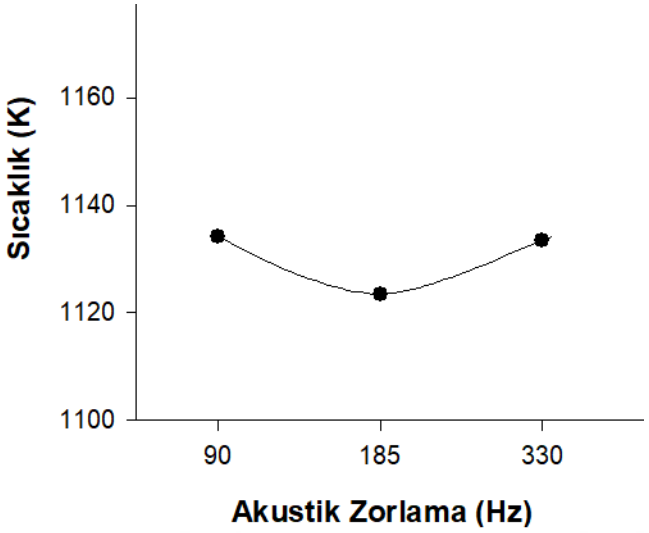
Frekans	%10	%20	%30
90HZ	**1049,6K**	**1038,6K**	**1134,2K**
185HZ	**1100,8K**	**1105,2K**	**1123,5K**
330HZ	**1129,4K**	**1120,8K**	**1133,4K**



Şekil 3.8. %10 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri



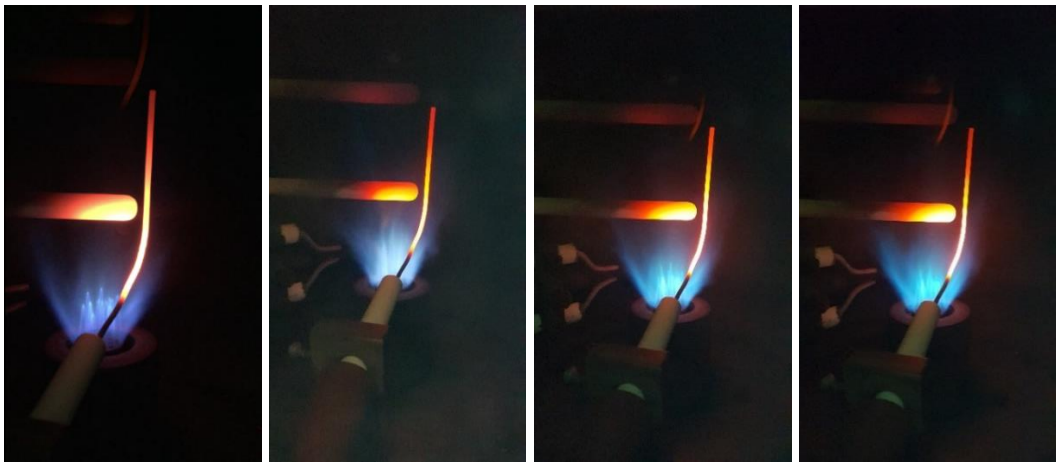
Şekil 3.9. %20 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri



Şekil 3.10. %30 Metan Oranında Akustik Zorlamaya Bağlı Değişen Sıcaklık Değerleri

3.2.2 Akustik Zorlamanın Alev Üzerine Etkisi

Metan oranının %10 olduğu ve zorlamasız olarak gerçekleştirilen deneyde Şekil 3.11'de birinci resimde görüldüğü gibi swirl noktalarından çıkan alev noktaları farkedelirken, 90 Hz akustik zorlama altında ikinci resimde alevin parladığı ve swirl noktalarından çıkan alev noktalarının kaybolduğu görülmektedir. 185 Hz ve 330 Hz akustik zorlama altında alev merkezinin baskılanarak toparlandığı şiddetinin ve yoğunluğunun arttığı görülmektedir.



Zorlamasız 90 Hz 185 Hz 330 Hz

Şekil 3.11. %10 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi

Şekil 3.12’ de gösterilen metan oranının %20 olduğu deneyde birinci resimde gösterilen zorlamasız yanmada alev boyunun ve genişliğinin 90-185-330 Hz’e göre daha küçük olduğu gözlemlenirken akustik zorlamanın başladığı 90 Hz’de alev boyunun ve genişliğinin artarak alev parlaklığının ve canlılığının arttığı fark edeilmektedir. Ayrıca akustik zorlama 330 Hz’e çıkartıldığında ışınımın ve alev boyunun uzadığı görülmektedir.



Zorlamasız 90 Hz 185 Hz 330 Hz

Şekil 3.12. %20 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi

Metan oranının son olarak %30 a çıkardığımızda %10 ve %20 metan oranlarına kıyasla alev şiddetinin önemli oranda arttığı Şekil 3.13’ te alev üzerinde bulunan ikinci çubuğun kırmızı renk tonundan fark edilmektedir. Akustik zorlama arttıkça 90 Hz’den 330 Hz’e alevin parlaklığı ve ışınımının arttığı gözlemlenmiştir.



Zorlamasız 90 Hz 185 Hz 330 Hz

Şekil 3.13. %30 Metan Oranının Akustik Zorlama Altında Alev Parlaklığına Etkisi

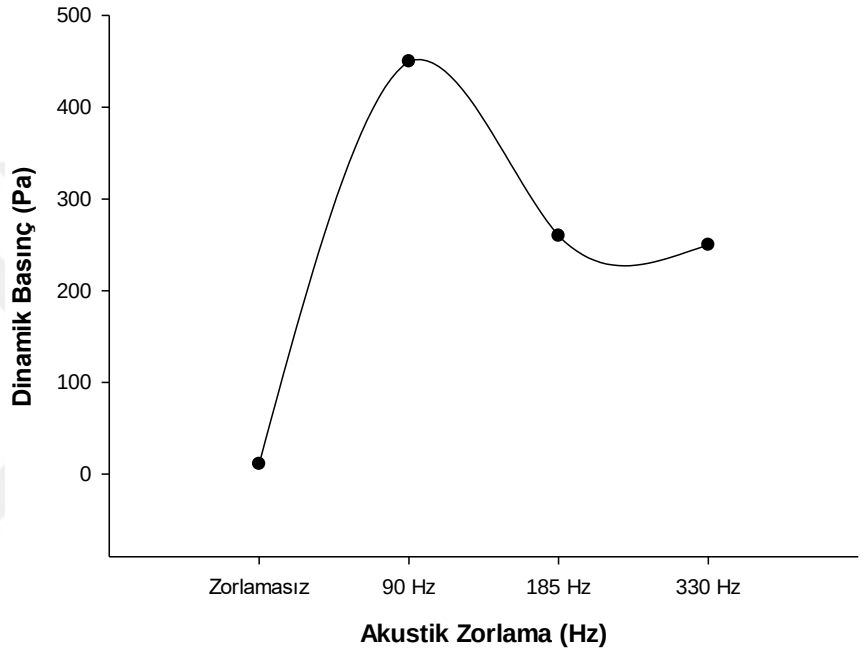
Akustik zorlamanın alev üzerine etkilerinden olan ışık şiddeti (mV); %10,%20 ve %30 metan oranlarında 90-185-330 Hz akustik zorlama altında incelenmiştir. Tablo 3.6'ya sağdan sola doğru baktığımızda metan oranının artması ile ışık şiddetinin arttığı görülmektedir. Tabloya yukarıdan aşağıya doğru baktığımızda ise %10 ve %20 metan oranlarında zorlamasız yanmadan sonra 90 Hz'lik bir akustik zorlama uygulandığında ışık şiddetinin düştüğü, frekans değerlerinin 185 ve 330 Hz' e çıkardığımızda ise yaklaşık aynı seviyelerde kaldığı görülmektedir.

Akustik zorlamasız olarak başladığımız deneyde, %10, %20 ve %30 metan oranlarında sırasıyla 11 Pa, 14 Pa ve 10 Pa değerlerinde düşük dinamik basınç açığa çıkarak çok büyük bir farklılık gözlemlenmemiştir. Akustik zorlamayı 90 Hz, 185 Hz ve 330 Hz değerlerinde uyguladığımız zaman açığa çıkan dinamik basınç değerinin ciddi bir oranda arttığı ortalama 175 Pa ile 900 Pa arasında değiştiği Tablo 3.6' da görülmektedir

Tablo 3.6. Akustik Zorlama Altında Dinamik Basınç Değerleri

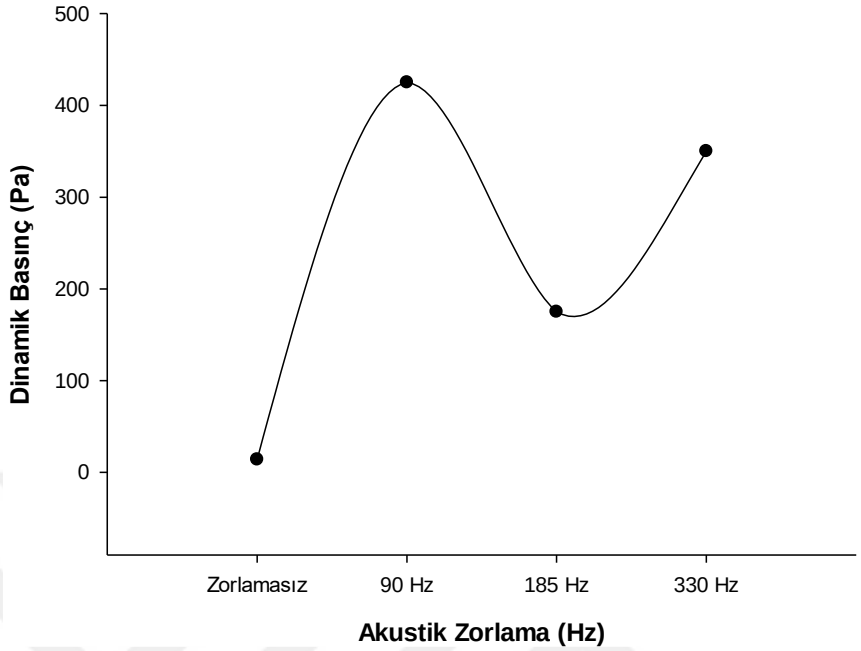
DİNAMİK BASINÇ TABLOSU (Pa)	%10 Metan	%20 Metan	%30 Metan
Zorlamasız	11 Pa	14 Pa	10 Pa
90 Hz	450 Pa	425 Pa	210 Pa
185 Hz	260 Pa	175 Pa	175 Pa
330 Hz	250 Pa	350 Pa	175 Pa

Şekil 3.14 incelendiğinde %10 metan oranında 90-185-330 Hz akustik zorlama altında yapılan deneyde akustik zorlamasız 11 Pa ölçülen basıncın, akustik zorlamanın sisteme uygulanması ile 90 Hz'de ciddi bir miktar yükselerek 450 Pa değerine ulaştığı ve sonrasında 185-330 Hz aralığında ortalama 250-260 Pa değerine düşerek sabit kaldığı görülmektedir.



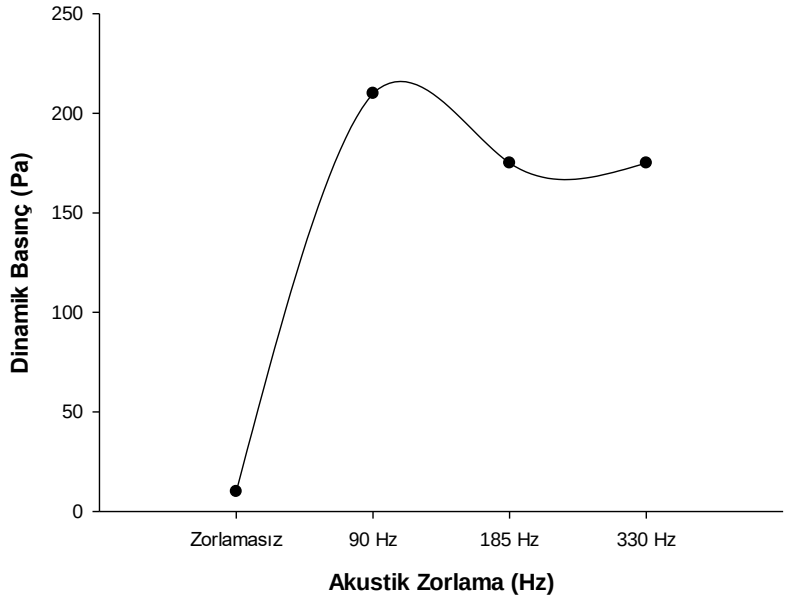
Şekil 3.14. %10 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa)

Şekil 3.15 incelendiğinde %20 metan oranında 90-185-330 Hz akustik zorlama altında yapılan deneyde akustik zorlamasız 14 Pa ölçülen dinamik basıncın, akustik zorlamanın sisteme uygulanması ile 90 Hz'de ciddi bir miktar yükselerek 425 Pa değerine ulaştığı, sonrasında 185 Hz aralığında ortalama 175 Pa değerine düştüğü ve 330 Hz basınç altında 350 Pa değerine çıktığı görülmektedir.



Şekil 3.15. %20 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa)

Şekil 3.16 incelendiğinde %30 metan oranında 90-185-330 Hz akustik zorlama altında yapılan deneyde akustik zorlamasız 10 Pa ölçülen basıncın, akustik zorlamanın sisteme uygulanması ile 90 Hz'de ciddi bir miktar yükselerek 210 Pa değerine ulaştığı ve sonrasında 185-330 Hz aralığında ortalama 175 Pa değerine düşerek sabit kaldığı görülmektedir.



Şekil 3.16. %30 Metan Oranında Dinamik Basınç (Pa)

3.2.3 Akustik Zorlamanın NOx Emisyonu Üzerine Etkisi

Yanma düzeneğinde alev üzerine uygulanan akustik ses dalgalarının, emisyon değerleri üzerinde etkileri fark edilmektedir. Başlangıçta akustik zorlamasız ve sonrasında 90 Hz, 185 Hz ve 330 Hz akustik zorlama frekans değerlerinde zorlanarak açığa çıkan emisyon değerleri kaydedilmiştir. Bu noktada Tablo3.8'de yer alan NO_X emisyon değerleri neredeyse yok denilecek miktarda az çıkmıştır. Tez çalışmamızın; 2.2.6.3 Emisyon Ölçüm Cihazı kısmında yer alan NOVA Plus RCU markalı emisyon cihazı ile elde edilen sonuçlarda NO_X için verilen tolerans aralığı olan +- 10 ppm değeridir. Dolayısıyla Tablo 3.7'de yer alan değerler +-10 ppm tolerans değerine çok yakın değerler çıkması bu sonucu elde etmemizde referans olmuştur.

Tablo 3.7. Akustik Zorlama Altında NO_x Emisyon Değerleri

NO_X EMİSYONU TABLOSU (ppm)	%10 Metan	%20 Metan	%30 Metan
Zorlamasız	10	13	9
90 Hz	10	5	11
185 Hz	12	10	10
330 Hz	14	12	9

Sonuç olarak akustik zorlama ile artan dinamik basınç değerlerinde NO_X değerleri yok denilecek kadar azdır. Yakıt-hava karışımını vorteksler oluşturarak ideal hale getiren akustik zorlama, aynı zamanda düşük NO_x oluşumu ile yanmaya katkı sağlayan önemli bir faktördür.(66)

3.2.4 Akustik Zorlamanın CO Emisyonu Üzerine Etkisi

Akustik zorlamasız olarak başladığımız deneyde %10, %20 ve %30 metan oranlarında sırasıyla 2560 ppm, 2700 ppm ve 1620 ppm değerlerinde CO açığa çıkmıştır. Sonrasında akustik basınç altında uyguladığımız deneylerde açığa çıkan bu değerlerin frekans arttıkça azaldığı görülmektedir. Tablo 3.9'da %30 Metan-Propan yanmasında öncelikli zorlamasız olarak gerçekleştirilen yanmada açığa çıkan CO değeri 1620 ppm, 90 Hz akustik zorlama altında 1540 ppm'e düşmüştür. Sonrasında 185 Hz'lik bir akustik zorlamada bu değer 1335 ppm'e düşmüş ve en son uygulanan 330 Hz'lik akustik zorlama altında 1306 ppm' e düşerek en düşük miktarda CO açığa çıkmıştır. %10 ve %20 metan değerlerinde de benzer şekilde akustik zorlama altında açığa çıkan CO değerlerinin

akustik zorlamasız yanma sonucu açığa çıkan CO değerlerinden daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 3.8. Akustik Zorlama Altında CO Emisyon Değerleri

CO EMİSYONU TABLOSU (ppm)	%10 Metan	%20 Metan	%30 Metan
Zorlamasız	2560	2700	1620
90 Hz	2147	2050	1540
185 Hz	2290	2570	1335
330 Hz	2414	2620	1306

Akustik zorlama sonucunda artan dinamik basınç, CO emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Yanma odası tasarımının uygun olmaması, yakıt-hava karışımlarının yetersiz olmasından dolayı meydana gelen eksik yanma sonucunda CO açığa çıkmaktadır.(28, 67) Akustik zorlamasız yanmada, hava-yakıt karışımı serbestçe hareket edebilmektedir ve dolayısıyla yanmamış hava-yakıt karışımları açığa çıkmaktadır. Akustik zorlama sonucu dinamik basınç sayesinde yanmamış hava yakıt karışımlarını alev noktasında toplayarak yanması sağlanmaktadır. Dolayısıyla yanmamış yakıtlardan dolayı açığa çıkan CO'lar yanarak yok olmaktadır. %10 Metan oranında gerçekleştirilen deneyde akustik zorlama sonucunda artan dinamik basınç değerleri ve buna bağlı azalan CO değerleri Tablo 3.9' da gösterilmektedir.

Tablo 3.9. Akustik Zorlama Altında Dinamik Basınç Değerleri

%10 Metan	**DİNAMİK BASINÇ (Pa)**	**CO EMİSYONU (ppm)**
Zorlamasız	11 Pa	2560
90 Hz	900 Pa	2147
185 Hz	260 Pa	2290
330 Hz	250 Pa	2414

4.BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında ana yakıt olarak tercih edilen propan gazı (C_3H_8) kullanılmıştır. LPG'yi oluşturan bileşenlerden olan propan gazının tercih edilmesinde günümüz şartlarında çok yaygın olması, fiyat olarak diğer petrol türevli kaynaklara göre ucuz ve doğaya karşı daha az zarar vermesi nedeniyle temiz bir yakıt olması önemli faktörlerdir.

Deneyde ikincil yakıt olarak ise metan kullanılmıştır. Doğalgazı oluşturan temel gazlardan olan metan gazı, yanma özellikleri ve propan gazına benzer şekilde yaygın, temiz bir alternatif yakıt olduğu için tercih edilmiştir.

Propan gazını %10, %20 ve %30 oranlarında metan gazı ile zenginleştirerek yanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yanma üzerine etkisini incelemek amacıyla deney düzeneğinin iki tarafına yerleştirilen hoparlörler sayesinde sistem 90 Hz, 185 Hz ve 330 Hz Frekans değerlerinde akustik zorlamaya tâbi tutulmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda; sıcaklık parametreleri, alev görüntüleri incelenmesi, ışık şiddeti, dinamik basınç değerleri ve emisyon değerleri incelenmiştir.

Deneysel tez çalışmamızda elde edilen sonuşlar şu şekildedir:

Akustik zorlamasız %10, %20 ve %30 metan oranlarında gerçekleştirilen deneylerde;

1) Propan gazının %10, %20 ve %30 metan oranı ile zenginleştirerek yakılması sonucunda metan oranı arttıkça sıcaklıks değerlerinin arttığı sonucuna varılmıştır.

2) Akustik zorlamasız yanma fotoğraflarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda propan gazı içerisindeki metan oranı arttıkça alev parlaklığı, alev genişliği ve alev boyunun arttığı gözlemlenmiştir.
3) Akustik zorlamasız yanmada ölçüm cihazlarından alınan veriler sonucunda ışık şiddetinin metan oranı %10- %20 arasında çok değişmez iken metan oranının %30'a yükselmesi ile belirgin miktarda arttığı fark edilmektedir. Dinamik basıncın ise akustik zorlamasız yanmada metan oranına bağlı ciddi oranda değişmediği gözlemlenmiştir.
4) Önemli parametrelerden olan emisyon değerlerinin akustik zorlamasız yanma deneyinde metan oranına bağlı olarak; NO_X değerlerinin yok denilecek miktarda az olduğu gözlemlenirken, CO değerinin sistemde bulunan oksijen miktarına bağlı olarak azaldığı fark edilmiştir.

Akustik zorlamanın 90Hz, 185 Hz ve 330 Hz olarak %10, %20 ve %30 metan oranlarında uygulandığı deneylerde;

1) Akustik zorlama frekans değerleri, dolayısıyla dinamik basınç arttıkça sıcaklık değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir.
2) Yanma fotoğraflarından elde edilen sonuçlar doğrultusunda alev üzerinde genel olarak akustik zorlama arttıkça alev parklaklığı, alev genişliği ve boyunun arttığı gözlemlenmiştir.
3) Işık şiddetinin yanma üzerine incelemesi yapıldığında aynı frekans değerlerinde ışık şiddetinin çok fazla değişmezken, metan oranı %30' a geldiğinde ışık şiddeti farkedilir miktarda yükselmiştir. Dinamik basınç değerleri ise akustik zorlama altında, zorlamasız yanmaya göre ciddi miktarda artmıştır.
4) Emisyon değerleri ise; NO_X için yok sayılacak kadar küçük değerler olduğu için akustik zorlama altında benzer şekilde önemsiz miktarlarda açığa çıkmıştır. CO miktarı ise akustik zorlama altında zorlamasız yanmaya göre azaldığı gözlemlenmiştir.

4.2 Öneriler

Gerçekleştirilen yanma deneyleri sonucunda deneyimlenen tecrübeye bağlı olarak öneriler şu şekildedir:

1) Yanma fotoğraflarına bağlı olarak yapılan alev değişimleri gözlem sonuçlarının daha net ve objektif olması açısından deney sisteminin termal özelliklerine uyumlu sabit ve çözünürlüğü yüksek bir kamera kullanılması deneylerin bu kısmının daha iyi sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır.
2) Deney düzeğininin farklı noktalarına monte edilmiş ve portatif yerleştirilen ölçüm ekipmanlarının ölçüm hassasiyetinin daha iyi olması açısından daha iyi sonuçlar veren aletler ile değiştirilebilir.
3) Ölçüm aletlerinin dışında kalan termal kayıpları önlemek maksadıyla yanma odası ve duvarları üzerinde modifikasyonlar yapılabilir.
4) Propan gazını metan gazı ile zenginleştirmenin yanma açısından olumlu veya olumsuz yönlerini karşılaştırmak için propan gazını metan gazı olmaksızın %100 saf halde benzer şekilde akustik zorlamalı ve zorlamasız yakılması önerilir.

KAYNAKÇA

1. Hanif MA, Nadeem F, Tariq R, Rashid U. 2021. Renewable and Alternative Energy Resources: Academic Press.
2. Zięb ik A, Hoinka K. 2012. Energy systems of complex buildings: Springer Science & Business Media.
3. Fahad S, Hasanuzzaman M, Alam M, et al. 2020. Environment, climate, plant and vegetation growth: Springer.
4. Yevich R, Logan JA. 2003. An assessment of biofuel use and burning of agricultural waste in the developing world. **Global biogeochemical cycles. 17**.
5. Sarkar N, Ghosh SK, Bannerjee S, Aikat K. 2012. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. **Renewable energy. 37**:19-27.
6. Turkenburg WC, Faaij A. 2000. Renewable energy technologies. UNDP/UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy.
7. Kralova I, Sjöblom J. 2010. Biofuels–renewable energy sources: a review. **Journal of Dispersion Science and Technology. 31**:409-25.
8. Dincer I. 2001. Environmental issues: Ii-potential solutions. **Energy sources. 23**:83-92.
9. Ghosh T, Prelas M. 2011. Renewable Resources. **Energy Resources & Systems. 2**.
10. Fridleifsson IB. 2001. Geothermal energy for the benefit of the people. **Renewable and sustainable energy reviews. 5**:299-312.
11. Çengel Y, Boles M. 1996. Termodinamiğin Temel Kavramları. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik. 2-31.
12. Kayataş N, Baştürk G, Albayrak B. 2005. Bir Propan-Hava Yakıcısında Yerel Entropi Üretimi. **Politeknik Dergisi. 8**:161-72.
13. Mokhatab S, Poe WA, Mak J. 2018. Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices: Gulf professional publishing.
14. Araçlarda L. 2000. Dönüşümü Mühendis El Kitabı. TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

15. Dinler N. 2001. Benzinli Motorlarda Yakıt Olarak LPG Kullanılması ve Katalitik Konvertör Uygulamasının Motor Performansına ve Egzoz Emisyonlarına Olan Etkisinin İncelenmesi: Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Ocak.
16. Boretti A. 2017. Numerical study of the substitutional diesel fuel energy in a dual fuel diesel-LPG engine with two direct injectors per cylinder. **Fuel Processing Technology.161**:41-51.
17. Ryu K. 2013. Effects of pilot injection timing on the combustion and emissions characteristics in a diesel engine using biodiesel–CNG dual fuel. **Applied Energy. 111**:721-30.
18. Lefebvre AH, Ballal DR. 2010. Gas turbine combustion: alternative fuels and emissions: CRC press.
19. Lee S, Speight J, Loyalka S. 2007. Clean liquid fuels from coal. Handbook of Alternative Fuel Technologies.97-140.
20. Raihan MS. 2014. A comparative study of diesel ignited methane and propane dual fuel low temperature combustion in a single cylinder research engine: Mississippi State University.
21. Gibson C, Polk A, Shoemaker N, Srinivasan K, Krishnan S. 2011. Comparison of propane and methane performance and emissions in a turbocharged direct injection dual fuel engine. Journal of engineering for gas turbines and power. 133.
22. Polk AC, Carpenter CD, Scott Guerry E, et al. 2014. Diesel-ignited propane dual fuel low temperature combustion in a heavy-duty diesel engine. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**. 136.
23. Boretti A. 2013. Conversion of a heavy duty truck diesel engine with an innovative power turbine connected to the crankshaft through a continuously variable transmission to operate compression ignition dual fuel diesel-LPG. **Fuel processing technology. 113**:97-108.
24. Elnajjar E, Selim MY, Hamdan MO. 2013. Experimental study of dual fuel engine performance using variable LPG composition and engine parameters. **Energy conversion and Management. 76**:32-42.
25. Prabhakar B, Jayaraman S, Vander Wal R, Boehman A. 2015. Experimental studies of high efficiency combustion with fumigation of dimethyl ether and propane into diesel engine intake air. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.** 137.

26. Bibler CJ, Marshall JS, Pilcher RC. 1998. Status of worldwide coal mine methane emissions and use. **International Journal of Coal Geology. 35**:283-310.
27. Van Basshuysen R. 2014. Natural gas and renewable methane for powertrains. Futur Strateg Clim Mobil, 1st edn Springer, Berlin. 973-8.
28. Turns SR. Introduction to combustion: McGraw-Hill Companies New York, NY, USA; 1996.
29. Goodger EM. 2000. Transport Fuels Technology: From Well to Wheels, Wings, and Water: Landfall Press.
30. Eisenberg JD, Shovlin MD, Whitlow Jr J. 1966. Potential of liquid-methane fuel for Mach-3 commercial supersonic transports.
31. Yaffee M, Refocused SPE. Aviation Week and Space Technology. May; 1968.
32. Guerry ES, Raihan MS, Srinivasan KK, Krishnan SR, Sohail A. 2016. Injection timing effects on partially premixed diesel–methane dual fuel low temperature combustion. **Applied energy. 162**:99-113.
33. Merker GP, Schwarz C, Teichmann R. 2011. Combustion engines development: mixture formation, combustion, emissions and simulation: Springer Science & Business Media;.
34. Evans RL. Automotive Engine Alternatives 2013.
35. Stewart J, Clarke A, Chen R. 2007. An experimental study of the dual-fuel performance of a small compression ignition diesel engine operating with three gaseous fuels. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: **Journal of Automobile Engineering. 221**:943-56.
36. Liu Z, Karim GA. 1995. The ignition delay period in dual fuel engines. **SAE transactions.** 354-62.
37. Papagiannakis R, Hountalas D. 2003. Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine. **Applied Thermal Engineering. 23**:353-65.
38. Papagiannakis R, Rakopoulos C, Hountalas D, Rakopoulos D. 2010. Emission characteristics of high speed, dual fuel, compression ignition engine operating in a wide range of natural gas/diesel fuel proportions. **Fuel. 89**:1397-406.
39. Jian D, Xiaohong G, Gesheng L, Xintang Z. 2001. Study on diesel-LPG dual fuel engines. **SAE Technical Paper, 0148**-7191.

40. Abd Alla G, Badr O, Soliman H, Rabbo AM. 2000. Exhaust emissions from an indirect injection dual-fuel engine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: **Journal of Automobile Engineering. 214**:333-40.
41. Shenghua L, Ziyan W, Jiang R. 2003. Development of compressed natural gas/diesel dual-fuel turbocharged compression ignition engine. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, **Part D: Journal of Automobile Engineering. 217**:839-45.
42. Seaton A, Godden D, MacNee W, Donaldson K. 1995. Particulate air pollution and acute health effects. **The lancet. 345**:176-8.
43. Bahr D, editor. 1991. Aircraft Engines NO x Emissions—Abatement Progress and Prospects. Proceedings of Tenth International Symposium on Air-breathing Engines, Nottingham, England;.
44. Bahr D, editor. 1992. Aircraft turbine engine NOx emission limits: status and trends. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air; American Society of Mechanical Engineers.
45. Rink K, Lefebvre A. 1986. Influence of fuel drop size and combustor operating conditions on pollutant emissions. Society of Auto Engineers, Warrendale, PA,.
46. Kang J, Chu S, Lee J, Kim G, Min K. 2018. Effect of operating parameters on diesel/propane dual fuel premixed compression ignition in a diesel engine. **International Journal of Automotive Technology. 19**:27-35.
47. Özde Koca D. 2013. Diesel motorlarında motorin ve LPG yakıtlarının birlikte kullanımının deneysel olarak araştırılması.
48. Ngang EA, Abbe CVN. 2018. Experimental and numerical analysis of the performance of a diesel engine retrofitted to use LPG as secondary fuel. **Applied Thermal Engineering.** 136:462-74.
49. Krishnan SR, Srinivasan KK, Raihan MS. 2016. The effect of injection parameters and boost pressure on diesel-propane dual fuel low temperature combustion in a single-cylinder research engine. **Fuel.184**:490-502.
50. Polifke W. 2004. Combustion instabilities. Advances in aeroacoustics and applications. 5.
51. McManus K, Poinsot T, Candel SM. 199. A review of active control of combustion instabilities. **Progress in energy and combustion science. 19**:1-29.

52. McManus K, Vandsburger U, Bowman C. 1990. Combustor performance enhancement through direct shear layer excitation. **Combustion and Flame. 82**:75-92.
53. Yu K, Trouve A, Candel S, editors. 1991. Combustion enhancement of a premixed flame by acoustic forcing with emphasis on role of large-scale vortical structures. 29th Aerospace Sciences Meeting.
54. Martin RJ. 2022. Thermal Systems Design: Fundamentals and Projects: Wiley.
55. Alabaş B. Oksijenle zenginleştirilen sentetik gaz yakıtların yanma kararsızlığının deneysel incelenmesi.
56. 946 MS. Vacuum System Controller: Operation and Maintenance Manual. HPS Products.134.
57. Çam Ö. Sentetik yakıtların yanma kararsızlığının deneysel incelenmesi.
58. Komarek T, Polifke W. 2010. Impact of swirl fluctuations on the flame response of a perfectly premixed swirl burner. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**. 132.
59. Yilmaz İ, Yilmaz H, Çam Ö. Sentetik Gaz Yakıtların Yanma Kararsızlıklarının Deneysel İncelenmesi".
60. Alabaş B, Tunç G, Taştan M, Yilmaz İ. 2020. Experimental investigation of the oxygen enrichment in synthetic gases flames. **Fuel. 270**:117482.
61. West W, Westwater J. 1953. Radiation-conduction correction for temperature measurements in hot gases. **Industrial & Engineering Chemistry. 45**:2152-6.
62. Kim C, Hong S, Kim Y. 2012. Radiation-corrective gas temperature measurement in a circular channel. **WIT Transactions on Engineering Sciences. 75**:157-67.
63. Altintaş H. 2013. Türkiye'de birincil enerji tüketimi, karbondioksit emisyonu ve ekonomik büyüme ilişkisi: eşbütünleşme ve nedensellik analizi. **Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi. 8**:263-94.
64. Turns SR, Haworth DC. 2021. An Introduction to Combustion: Concepts and Applications: McGraw-Hill.
65. Türkoğlu A, Tokdemir M, Şen M, Börk T, Tunçez FT, Yaprak B. Elaziğ'da 2006-2012 Yillari Arasinda Otopsisi Yapilan Karbonmonoksit Zehirlenmesine Bağli Ölümlerin Değerlendirilmesi.

66. Oh J, Heo P, Yoon Y. 2009. Acoustic excitation effect on NOx reduction and flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air. **International journal of hydrogen energy. 34**:7851-61.
67. Keating E. 1993. Applied Combustion. Marcel Decker. Inc New York.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Kuzey Emre ER

Uyruğu: Türkiye (T.C)

Doğum Tarihi ve Yeri:

Medeni Durum:

e-mail:

Yazışma Adresi:

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı	2023
Lisans	Erciyes Üniversitesi, Uçak Gövde-Motor	2019
Lise	Bünyan Fen Lisesi	2015

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görev
2019-2021	THY Teknik A.Ş.	2 Yıl 10 ay

YABANCI DİL

İngilizce

YAYINLAR