



**HAVA SOĞUTMALI BİR MOTORDA LPG
UYGULAMASININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet KUNT

DANIŞMAN

Prof. Dr. İbrahim MUTLU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 18.FEN.BİL.44 numaralı proje ile AKUBAP tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAVA SOĞUTMALI BİR MOTORDA LPG UYGULAMASININ
ARAŞTIRILMASI

Mehmet KUNT

DANIŞMAN

Prof. Dr. İbrahim MUTLU

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Mehmet KUNT tarafından hazırlanan “Hava Soğutmalı Bir Motorda LPG Uygulamasının Araştırılması” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. İbrahim MUTLU

Başkan : Doç. Dr. Ahmet KESKİN
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
Bolu Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Üye : Prof. Dr. İbrahim MUTLU
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Yaşar Önder ÖZGÖREN
Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi

İmza

.....

.....

.....

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13/06/2019

Mehmet KUNT



ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

HAVA SOĞUTMALI BİR MOTORDA LPG UYGULAMASININ ARAŞTIRILMASI

Mehmet KUNT
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. İbrahim MUTLU

Bu çalışmada, tek silindirli, hava soğutmalı, 4 zamanlı bir benzin motorunda LPG ve benzin yakıtı kullanılarak motorun performans ve egzoz emisyon testleri gerçekleştirilmiş, deneylerden elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Deneyler, benzin ve LPG ile motordan en yüksek momentin elde edildiği devirde (2600 dev/dk) %20, %40, %60, %80 ve %100 olmak üzere beş farklı gaz kelebeği açıklığında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre LPG kullanımı ile ortalama motor momentleri ve motor gücü benzine göre %4,15, özgül yakıt tüketimi ve yakıt tüketimi ise sırasıyla %16,45 ve %16,77 azalmıştır. Bununla birlikte, LPG kullanımı ile benzine göre CO, CO₂ ve HC emisyonları benzine göre sırasıyla %35, %2,5 ve %35,36 azalırken; NO_x emisyonları %88 artmıştır.

2019, xi + 48 sayfa

Anahtar Kelimeler: LPG, Benzin motoru, Motor performansı, Egzoz emisyonları.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

INVESTIGATION OF LPG APPLICATION AT AN AIR COOLED ENGINE

Mehmet KUNT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Automotive Engineering

Supervisor: Prof. İbrahim MUTLU

In this study, the performance and exhaust emission tests of a single cylinder, air cooled, 4 stroke gasoline engine using LPG and gasoline fuel were performed and the results obtained from the experiments were compared with each other. The experiments were carried out at five different throttle openings (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) at engine speed (2600 rpm), in which maximum torque is obtained, from the engine with gasoline and LPG. According to the experimental results, average engine moment and engine power decreased by 4.15%, specific fuel consumption and fuel consumption decreased by 16.45% and 16.77%, respectively, by using LPG compared to gasoline. However, when CO, CO₂ and HC emissions decreased by 35%, 2.5% and 35.36%, respectively; while NO_x emissions increased by 88% compared to gasoline.

2019, xi + 48 pages

Keywords: LPG, Spark ignition engine, Engine performance, Exhaust emissions.

TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalarım boyunca tecrübesini, bilgisini ve samimiyetini eksik etmeyen değerli danışmanım Prof. Dr. İbrahim MUTLU'ya teşekkür ederim. Bilgilerinden faydalandığım ve birçok konuda yardım eden değerli hocalarım Prof. Dr. Can ÇINAR'a, Doç. Dr. Fatih AKSOY'a, Doç. Dr. Yaşar Önder ÖZGÖREN'e ve Dr. Öğr. Üyesi Şükrü Ayhan BAYDIR'a, tezin her aşamasında hiçbir yardımını esirgemeyen sevgili abim Öğr. Grv. Muhammed ARSLAN'a ve bu tez çalışması boyunca maddi manevi hiçbir imkân ve yardımlarını eksik etmeyen aileme sonsuz saygı, sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma “18.FEN.BİL.44” numaralı ve “Hava Soğutmalı Bir Motorda LPG Uygulamasının Araştırılması” isimli AKUBAP projesi tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı AKUBAP'a teşekkür ederim.

Mehmet KUNT

AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
RESİMLER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. BENZİN MOTORLARI ve LPG	3
2.1 Benzin Motorları.....	3
2.1.1 İdeal Benzin Çevrimi (Otto Çevrimi).....	3
2.1.2 Buji Ateşlemeli Motorlarda Yanma	3
2.1.3 Buji Ateşlemeli Motorlarda Yanmaya Etki Eden Faktörler	7
2.1.4 Vuruntu.....	7
2.1.5 Benzin Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar	8
2.1.6 Buji ile Ateşlemeli Motorlardan Kaynaklanan Egzoz Emisyonları ve Çeşitli Motor Parametrelerinin Egzoz Emisyonlarına Etkisi	9
2.2 LPG.....	12
2.2.1 Otomotiv Motorlarında LPG Kullanımı	15
2.2.2 LPG'nin Yanma Denklemleri.....	16
2.2.3 LPG'nin Avantajları	17
2.2.4 LPG'nin Dezavantajları.....	18
2.2.5 İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan LPG Dönüşüm Sistemleri	19
2.2.5.1 1. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri.....	20
2.2.5.2 2. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri.....	20
2.2.5.3 3. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri.....	21
2.2.5.4 4. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri.....	23
3. MATERYAL METOD	25
3.1 Deney Motoru	26
3.2 Emisyon Cihazı.....	28
3.3 Yük Okuyucu (Laodcell)	30
3.4 Hassas Terazî	31

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
4.1 Motor Performansı Ölçüm Sonuçları.....	32
4.2 Egzoz Emisyonları Ölçüm Sonuçları.....	36
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	41
6. KAYNAKLAR.....	42
ÖZGEÇMİŞ.....	47



SİMGELER DİZİNİ

Simgeler

α_1	Tutuşma periyodu uzunluğu
α_2	Ana periyodun uzunluğu
α_3	Son periyot uzunluğu
A	Adyabatik yanmış gaz çekirdeği
BL	Yanmış gazların termal sınır tabaka
°C	Santigrad derece
C_2H_5SH	Etil merkup
C_3H_8	Propan
C_4H_{10}	Bütan
P	Basınç (Bar, atm, Pa, kPa, MPa)
$\dot{Q}$	Açık sistemlerde sisteme giren ya da sistemden çıkan ısı (kW)
SI	Kıvılcım ateşlemeli motor
U	Yanmamış gaz karışımı
$\dot{W}$	Yanmış gazlardan pistona olan iş transferi
ε	Sıkıştırma oranı
λ , HFK	Hava fazlalık katsayısı

Kısaltmalar

ABD	Amerika birleşik devletleri
AÖN	Alt ölü nokta
cm^3	Santimetre küp
CO	Karbon monoksit
CO ₂	Karbon dioksit
dev/dk	devir/dakika
ECU	Elektronik kontrol ünitesi
g/HPh	Gram/Beygir gücü saat
g/kWh	Gram/Kilowatt saat
HC	Hidrokarbon
H ₂ O	Su
Kg	Kilogram
KMA	Krank mili açısı (°)
kW	Kilowatt
kW/HP	Kilowatt/beygir gücü
l	litre
LPG	Sıvılaştırılmış petrol gazı
m^3	Metre küp
MJ	Megajoule
mm	Milimetre
MON	Motor oktan sayısı
m/s	Metre/saniye
N ₂	Azot
Nm	Newton metre
Nm/Kgm	Newton metre/Kilogram metre
NO _x	Azot oksit

Kısaltmalar(devam)

NO	Azot monoksit
NO ₂	Azot dioksit
O ₂	Oksijen
OHC	Üstten egzantrikli
RON	Araştırma oktan sayısı
T	Sıcaklık
TGKA	Tam gaz kelebek açıklığı
ÜÖN	Üst ölü nokta



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Silindir içindeki alevin yanma esnasındaki şematik görüntüsü	4
Şekil 2.2 KMA'ya bağlı olarak yanma olayında basınç ve sıcaklık değişimi.....	5
Şekil 2.3 Alevin yayılması	6
Şekil 2.4 ECE seyir çevrimine göre katalitik konvertörsüz orta büyüklükteki bir taşıtın ortalama egzoz kompozisyonu	9
Şekil 2.5 Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak egzoz emisyonlarının değişimi	10
Şekil 2.6 Ateşleme zamanının NO_x , HC emisyonları ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi.....	11
Şekil 2.7 Yüzey/hacim oranının HC konsantrasyonuna etkisi.....	11
Şekil 2.8 a) Sıkıştırma oranının HC emisyonu değişimine etkisi (Motor devri: 1500 dev/dk, $\lambda=1$ ve TGKA) b) Sıkıştırma oranının NO_x emisyonlarının değişimine etkisi.....	12
Şekil 2.9 1. nesil LPG dönüşüm sistemi.....	20
Şekil 2.10 2. nesil LPG sistemi	21
Şekil 2.11 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinin şematik görünümü	22
Şekil 2.12 Sıvı haldeki yakıtın püskürtüldüğü 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinin şematik görünümü	23
Şekil 2.13 4. nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik görünümü.....	24
Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü.....	26
Şekil 4.1 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor momenti değişimleri	33
Şekil 4.2 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor gücü değişimleri.....	34

Şekil 4.3 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri	35
Şekil 4.4 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak yakıt tüketimi değişimleri.....	36
Şekil 4.5 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO emisyonu değişimleri	37
Şekil 4.6 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO ₂ emisyonu değişimleri	38
Şekil 4.7 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak HC emisyonu değişimleri	39
Şekil 4.8 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak NO _x emisyonu değişimleri	40

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1 Çeşitli Avrupa ülkelerindeki propan/bütan oranı.....	13
Çizelge 2.2 2012'de LPG kullanan başlıca ülkeler.....	13
Çizelge 2.3 Benzin (95 oktan) ve LPG'nin termodinamik özellikleri.....	14
Çizelge 3.1 Motorun teknik özellikleri.....	27
Çizelge 3.2 Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri.	29
Çizelge 3.3 Loadcell cihazının teknik özellikleri.....	30

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 3.1 Deney düzeneğinin genel resmi	25
Resim 3.2 LGA 340 OHC	27
Resim 3.3 Benzin motoruna LPG uygulaması	28
Resim 3.4 Egzoz emisyon cihazı	29
Resim 3.5 Loadcell cihazı	30
Resim 3.6 Deneylerde kullanılan hassas terazi	31



1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artması enerji ihtiyacını da arttırmaktadır. Dünyadaki enerji kaynaklarının yarısından fazlasını fosil yakıtların bir çeşidi olan petrol yakıtları oluşturmaktadır (Çeçen 2018, Koca 2013). Küresel enerji talebindeki artıştan dolayı, fosil yakıtların tüketimi yıllar geçtikçe artmakta ve rezervleri hızla azalmaktadır. Bu artışa bağlı olarak azot oksitler (NO_x), hidrokarbonlar (HC) ve karbon monoksit (CO) gibi zararlı emisyonların miktarı gün geçtikçe artmış ve dünyanın ortalama sıcaklık değerini yükseltmiştir. Ayrıca değişen küresel iklim değişiklikleri, havayı, suyu ve toprağı kirlettiği gibi, solunum yolu hastalıkları, kanser, kalp ve damar hastalıkları gibi birçok hastalığa da neden olmaktadır (Balki 2005, Çelik 2018, Altun 2009, Engin 2018, Duc and Duy 2018, Aravind *et al.* 2015, Kim *et al.* 2016, Özgören *et al.* 2013).

Konvansiyonel fosil kökenli yakıtların olumsuz çevresel etkilerinin minimize edilmesi ve egzoz emisyonlarını azaltma uğraşları günümüzde yoğun olarak araştırılan konular arasında yer almaktadır (Keçebaş *et al.* 2010, Çiçek 2018).

Fosil yakıt kullanan motorlar konusunda yapılan araştırmaların hedefi hem egzoz emisyonlarını düşürmek hem de ekonomik bir şekilde motordan en yüksek performansı alabilmektir. Gaz yakıtlar; karışımın homojen olarak oluşturulması, ateşlenmesi, oktan sayısının yüksek olması ve diğer petrol yakıtlarına göre kirletici emisyon salınımlarının daha az olması nedeniyle alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG), yanması sırasında kirletici maddelerin ve sera gazı emisyonlarının, sıvı hidrokarbon yakıtlara göre daha düşük olmasından dolayı alternatif yakıt olarak tercih edilmektedir. Ana bileşenleri olarak Propan (C_3H_8) ve Bütan (C_4H_{10}) olan LPG, bu araştırmalarda çokça öne çıkan ve özellikle otto motorunda alternatif olarak kullanılabilecek verimli ve oldukça temiz yanan bir yakıt olarak bilinmektedir (Bilgin 2018, Kocagöz 2009, Aravind *et al.* 2015, Morganti *et al.* 2013, Elnajjar *et al.* 2013, Sulaiman *et al.* 2013, Szpica 2018). Kimyasal yapı ve özellikleri bakımından parafinler ve olefinler grubu içerisinde yer alan LPG'nin büyük bir kısmı doğal gazdan ve distilasyon yöntemi ile ham petrolden elde edilir. LPG, propan ve bütan gazlarının basınç altında hacimleri azaltılarak sıvılaştırılmış halleridir (Çınar *et al.* 2001, Morganti

et al. 2013, Mitukiewicz *et al.* 2015, Sulaiman *et al.* 2013).

Dünyadaki LPG üretiminin %39'u rafineri üretiminden elde edilirken, %61'i doğal gazdan elde edilmektedir (Sayın *et al.* 2005). Sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), ilk başlarda sabit tesis motorlarında kullanılmış daha sonra motorlu taşıtlarda kullanılmaya başlamıştır (Koca 2013). Türkiye'de ticari amaçla kullanılan LPG'nin içeriğindeki propan ve bütan oranları mevsimlere göre değişiklik gösterse de genel olarak sırasıyla %30 ve %70 civarındadır (Çiçek 2018).

LPG'nin kimyasal yapısındaki propan ve bütanın karışım oranı oktan sayısını değiştirip vuruntuya karşı direncini etkilemektedir. Hem propanın hem de bütanın oktan sayısı benzinden daha yüksek olduğu için LPG'nin oktan sayısı benzinin oktan sayısından daha yüksektir. Bundan dolayı benzine alternatif yakıt olarak kullanıldığında motorun sıkıştırma oranı değişmediğinden çalışma esnasında herhangi bir vuruntu oluşmaz (Kart 2009).

Bu çalışmada, motor performansında düşüş olmadan veya önemsenmeyecek seviyede düşüş ile hem ekonomik hem de çevreci bir yakıt olan LPG'nin kullanım oranını artırarak egzoz emisyonlarının düşürülmesi amaçlanmıştır. Tek silindirli, 4 zamanlı ve hava soğutmalı motorda LPG ve benzin yakıtları kullanılarak motor performans ve egzoz emisyon testleri gerçekleştirilmiştir.

2. BENZİN MOTORLARI ve LPG

2.1 Benzin Motorları

2.1.1 İdeal Benzin Çevrimi (Otto Çevrimi)

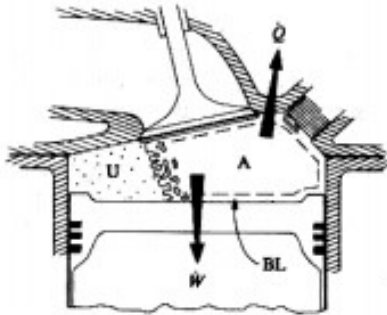
Nikolaus August Otto ve Eugen Langen tarafından 1876'da bulunan 4 zamanlı benzin çevriminin diğer ismi otto çevrimidir. Benzinli motorların çoğunda, piston ile oluşturulan dört zaman termodinamiksel olarak bir çevrim anlamına gelir. Bu esnada krank mili iki tam tur atmış olur (De Souza *et al.* 2019, Korkmaz 2008).

Otto çevrimi başlangıcında piston alt ölü noktada (AÖN) olup emme ve egzoz supapları kapalı konumdadır. Piston üst ölü noktaya (ÜÖN) doğru hareket ederken hava-yakıt karışımını sıkıştırır. Piston üst ölü noktaya varmadan hemen önce bujinin oluşturduğu kıvılcım, sıkışmış olan yakıt-hava karışımını ateşler ve yanmayı başlatır. Bu yanmanın başlamasıyla sistemin basıncı artmaya başlar. Pistonun üst ölü noktayı aşmasıyla beraber maksimum basınç elde edilir. Elde edilen basınç pistonu aşağıya doğru ittirerek yararlı güç elde edilmiş olur. Bu zaman güç ya da genişleme zamanı olarak adlandırılır. Piston alt ölü noktada iken silindir içerisinde yanmış egzoz gazları vardır. Piston yeniden üst ölü noktaya doğru ilerlerken silindir içerisindeki artık gazlar, egzoz supabının açılması ile silindirden dışarı atılır. Egzoz gazlarının silindirden dışarı atılmasına ise egzoz zamanı denir. Tamamlanan birinci çevrimin ardından piston yeniden alt ölü noktaya doğru hareketlenmesi ile emme supabı açılır ve ikinci çevrim başlamış olur. Silindirlere emilen taze hava-yakıt karışımı tekrar pistonun üst ölü noktaya çıkması ile sıkıştırılır ve çevrimin devamlılığı sağlanır. Emme zamanında silindir içersindeki basınç atmosfer basıncının biraz altındayken, egzoz zamanında ise biraz üzerindedir (Korkmaz 2008).

2.1.2 Buji Ateşlemeli Motorlarda Yanma

Geleneksel bir buji ateşlemeli motora emilen hava ve yakıt emme sisteminde karıştırılır. Emme supabının açılması ile silindire emilen ve bu esnada bir önceki çevrimden kalan

artık gazlarla da karışan üçlü karışım daha sonra sıkıştırılır. Normal çalışma şartlarında yanma, sıkıştırma zamanının sonlarına doğru, buji tırnakları arasında oluşan kıvılcım ile başlar. Tutuşmanın hemen ardından türbülanslı alev gelişir ve yanma odasının içinde ilerler. Alev yanma odası duvarına ulaşınca kadar üçlü karışım yanmaya devam eder ve daha sonra söner. Silindir içindeki gazın basıncı, sıcaklığı ve yoğunluğu, piston hareketi sebebi ile hacim değişimine yol açar. Yanma esnasında silindir içindeki basınç, yakıtın kimyasal enerjisini etrafına yayması sebebi ile artar. Yakıt-hava karışımındaki her bir elementin yoğunluğu yanması sonucunda yaklaşık 4 kat düşer. Yanma sonucu gazın çevreye doğru genişlemesi, alevin önündeki yanmamış olan karışımı sıkıştırır ve yanma odası duvarlarına doğru yer değiştirmesine neden olur. Yani bu gaz genişlemesi henüz yanmamış olan dolguyu sıkıştırarak bujiye doğru hareket ettirir. Yanma esnasında yanmamış gaz elementleri bujiden uzak noktalara doğru hareket eder (Gürbüz 2010, Topgül 2006).

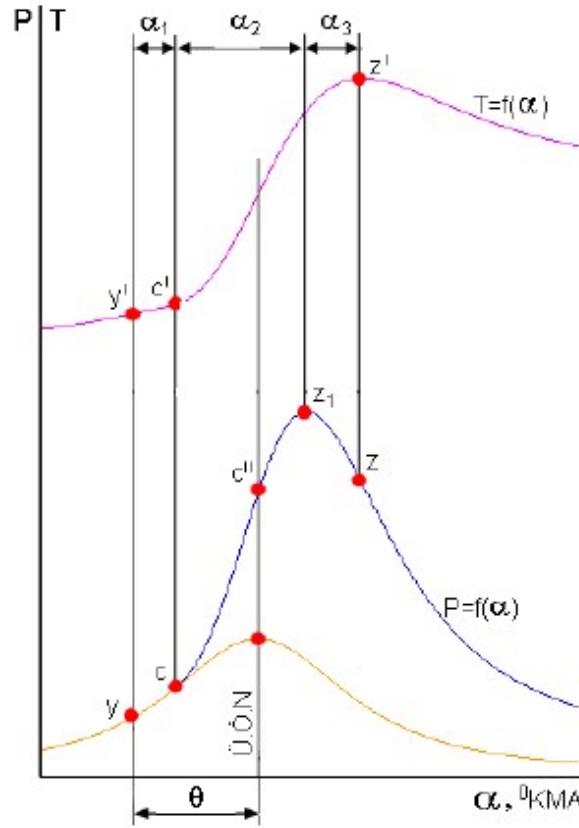


Şekil 2.1 Silindir içindeki alevin yanma esnasındaki şematik görüntüsü (Gürbüz 2010).

Yanma esnasında bir motor silindirinin şematik görüntüsünün Şekil 2.1'deki gibi olduğu düşünülürse, ÜÖN'dan önce iş transferi pistondan silindir gazlarına doğru meydana gelirken, ÜÖN'dan sonra ise silindir gazlarından pistonu doğru meydana gelir. Burada A adyabatik yanmış gaz çekirdeğini, U yanmamış gaz karışımını, W yanmış gazlardan pistonu olan iş transferini, Q yanmış gazlardan yanma odası duvarına olan ısı transferini, BL ise yanmış gazların termal sınır tabakasını ifade etmektedir. Isı transferi ilk önce yanmış gazlardan silindir duvarına doğru gerçekleşir. Maksimum gücü ve torku elde etmek için yanma aralığının ÜÖN'ya yakınlığı, optimum şekilde ayarlanmalıdır. Alevin oluştuktan sonra yayılma süresi yaklaşık olarak 30°-90° krank açısı

aralığındadır. Yanma, sıkıştırma zamanının sonuna doğru tutuşma ile başlar, iş stroğunun ilk kısmı boyunca devam eder ve maksimum silindir basıncının olduğu krank açısından sonra tamamlanır. Eğer ateşleme avansı ÜÖN'dan çok önceye alınır, sıkıştırma stroğunda, pistondan gazlara olan iş transferi artar. Eğer yanma işleminin sonu, ateşleme avansının azaltılması ile geciktirilir ise maksimum silindir basıncı, genişleme stroğunun sonlarına doğru elde edilmiş olur ve silindir basıncının şiddeti azalır (Gülbüz 2010).

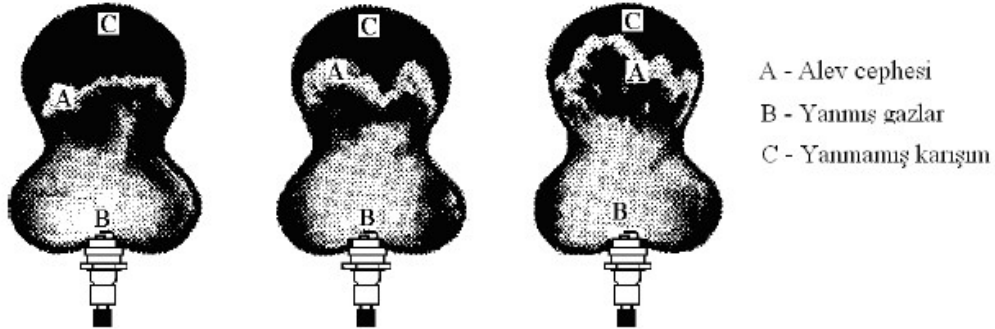
Yanma olayı, tutuşma periyodu, ana periyot ve son periyot olmak üzere üç periyotta incelenir. KMA'ya göre silindir içi basınç değişimi, yanma olayının nasıl gerçekleştiğini göstermektedir ve Şekil 2.2'de KMA'ya bağlı olarak yanma olayında basınç ve sıcaklık değişimleri verilmiştir (Arslan 2008).



Şekil 2.2 KMA'ya bağlı olarak yanma olayında basınç ve sıcaklık değişimi (Arslan 2008).

Tutuşma periyodu, bujinin kıvılcım oluşturduğu noktadan (y) itibaren, kayda değer bir basınç artışının gerçekleştiği noktaya (c) kadar geçen süredir. Diğer bir ifadeyle buji kıvılcımının oluşumundan (y) sıkıştırma eğrisinin yanmasız sıkıştırma eğrisinden ayrıldığı nokta (c) arasındaki zaman, tutuşma periyodu (α_1) olarak bilinir. Bu periyotta yanmaya maruz kalan dolgu miktarı toplam dolgunun %1'i civarındadır. Tutuşma periyodunun uzunluğu, bujiden gelen enerji miktarına, buji kıvılcımının süresine, buji elektrotları arasında ısınan bölgenin hacmine, hava-yakıt oranına ve buji önündeki akışın hızına bağlıdır (Arslan 2008).

Ana periyot, tutuşma gecikmesinin bittiği nokta ile (c noktası) maksimum basıncın oluştuğu noktaya (z_1) kadar geçen süredir. Ana periyodun uzunluğu $\alpha_2=25-30$ °KMA civarındadır. Tutuşma gecikmesi süresi sonunda basınç, sıcaklık ve karışım oranının belirlediği bir yanma hızı ile alev cephesi sürekli şekilde ilerler (Arslan 2008). Alev cephesinin bujiden itibaren yayılması Şekil 2.3'te görülmektedir.



Şekil 2.3 Alevin yayılması (Arslan 2008).

Son periyot, maksimum basıncın oluştuğu noktadan (z_1) tüm yakıtın yanmasına kadar geçen süredir (α_3). Maksimum basınç noktasından belli bir süre sonra gazların sıcaklığı (z' noktasında) maksimum değerlerine ulaşır. Sonuç olarak normal yanma şartlarında yakıtın enerjisinin %70-75'i maksimum basınca ulaşınca, %85-90'i ise maksimum sıcaklığa ulaşınca açığa çıkar. Kısmi yüklerde ise yanma hızı düşük olduğundan maksimum basınç noktasına kadar yakıt enerjisinin ancak yarısı kullanılmış olur. Dolayısıyla yanma, genişleme zamanı boyunca devam eder, bazı olumsuz şartlarda

yanma, genişleme süresinin sonunda dahi sona ermemiş olabilir. Bu durumda motorun verimi ve dolayısıyla gücü azalır (Arslan 2008).

2.1.3 Buji Ateşlemeli Motorlarda Yanmaya Etki Eden Faktörler

Motorun her türlü çalışma koşulunda maksimum verimin elde edilebilmesi için ateşleme noktasının uygun seçilmesi gerekir. Avansın seçimini belirleyen ana etkenler yanma hızı ve tutuşma gecikmesidir. Bunlara etki eden faktörler de genelde sıcaklık, basınç, karışım oranı ve türbülans şiddetidir. Motorun çalışması sırasında sıcaklık, basınç, karışım oranı ve türbülans şiddetine etki eden her faktör dolaylı olarak yanma hızına da etki etmektedir. Bu faktörler motorun dönme hızı, emme sıcaklığı ve basıncı, hava fazlalık katsayısı (λ), önceki çevrimden kalan artık gaz miktarı, sıkıştırma oranı (ϵ) ve yanma odası şekli olarak sıralanabilir.

2.1.4 Vuruntu

Buji ile ateşlemeli motorlarda emme sıcaklığı ve basıncının yüksek olması, yakıtın tutuşma gecikmesi süresini kısaltmaktadır. Ancak bu sürenin aşırı kısılması istenen bir durum değildir. Dolgu, buji kıvılcımı ile yanma yerine yüksek basınç ve sıcaklıktan dolayı kendiliğinden yanmaktadır. Bunun sonucunda yanma sonu basınç ve sıcaklığı aşırı yükselir ve bujinin oluşturacağı yanma olayı dışında başka bir yanma daha gerçekleşmiş olur. Bu durum vuruntu olarak isimlendirilir. Vuruntunun etkileri ise yüksek basınç ve sıcaklığa bağlı olarak motor parçalarına binen yüksek termal ve mekanik yük, aşırı yüksek frekanslı ses ve titreşim seviyeleri olarak sıralanabilir. Vuruntu esnasında yanma hızı 600 m/s civarına çıkarken, silindir içi basınç nominal değerinin iki katı civarına ulaşmaktadır. Yükselen silindir içi basınç ve sıcaklığı, supaplar, piston tepesi ve yanma odasında aşınmalara sebep olmakta, devamında motor parçalarının ömrü azalmakta ve kaçaklarla birlikte performans düşüşü meydana gelmektedir. Vuruntuya sebep olabilecek faktörler emme ve egzoz basınçları, motor dönme hızı, dolgu sıcaklığı, silindir geometrisi, yakıtın vuruntuya karşı direnci (oktan sayısı) ve sıkıştırma oranı olarak sıralanabilir (Arslan 2008, Erkoca 2010, Kart 2009, Topgül 2006).

2.1.5 Benzin Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Enerji güvenliği ve endişeleri nedeniyle, alternatif yakıtlara olan ilgi dünya genelinde hızla artmaktadır. İçten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıtlardan beklenen özellikler şu şekilde sıralanabilir:

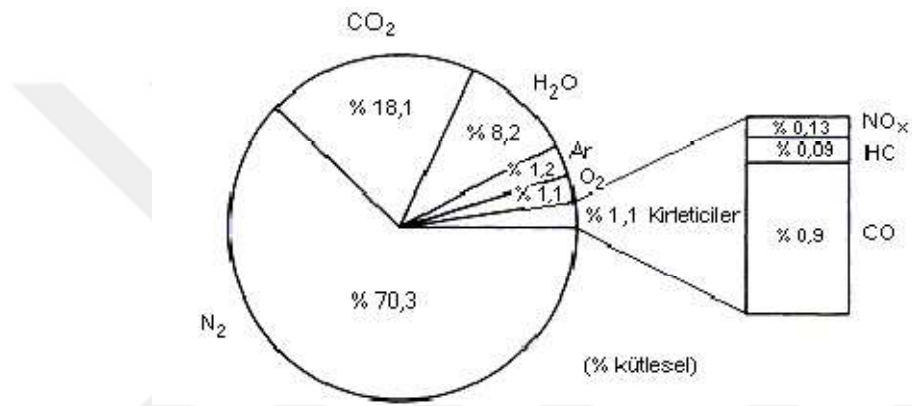
- Az maliyetli olmalı,
- Üretimi kolay olmalı,
- Çevre dostu olmalı,
- Motor performansını arttırmalı veya en azından düşürmemeli,
- Büyük modifikasyonlar gerektirmeden kullanılabilmelidir (Başoğlu 2008).

Doğal gaz, LPG, hidrojen ve biyoyakıt gibi alternatif yakıtlar, birçok uygulama için potansiyel adaylardır. Bununla birlikte, bulunabilirlik ve ekonomik boyutlar; doğal gaz, LPG ve hidrojeni, biyoyakıtlara göre daha gerçekçi çözümler haline getirmektedir. Her ne kadar hidrojenle çalışan içten yanmalı motorlar ağırlık ve maliyet avantajı sunsa da, düşük verimlilik gibi ciddi bir dezavantajı vardır. Sonuç olarak, şimdi ve yakın gelecek için, alternatif yakıt olarak doğal gaz ve LPG, yaklaşmakta olan emisyon düzenlemelerini karşılamak için en iyi çözümlerdir. Çünkü doğal gaz ve LPG, bileşimleri sayesinde, geleneksel yakıtlara kıyasla çok daha az kirlenici emisyon üreten ve temiz yanan fosil yakıtlardır (Djermouni and Ouadha 2017).

Bir başka alternatif yakıt olarak Metanol, geleceğin motorları için en uygun yakıtlardan biri olarak kabul edilir. Ancak, soğuk çalıştırma zorluğu ve daha fazla formaldehit ve yanmamış metanol emisyonu gibi dezavantajlar taşıtlardaki kullanılabilirliği azaltmaktadır. Özellikle, ortam sıcaklığı 16 °C'nin altında olduğunda, kıvılcım ateşlemeli (SI) motorların ek sistemler olmadan metanol ile çalıştırılması oldukça zordur. Daha önce yapılan çalışmalarda yaklaşık 15 °C'nin altındaki ortam sıcaklığında soğuk çalıştırma için tamamen metanol kullanmanın oldukça zor olduğu belirlenmiş ve soğuk çalıştırma sorunlarını çözmek için %85 metanol ve %15 benzin karışımı önerilmiştir (Gong *et al.* 2018).

2.1.6 Buji ile Ateşlemeli Motorlardan Kaynaklanan Egzoz Emisyonları ve Çeşitli Motor Parametrelerinin Egzoz Emisyonlarına Etkisi

İçten yanmalı motorlardan kaynaklanan hava kirliliği en önemli çevre problemlerinden birisidir. Katalitik dönüştürücüye sahip olmayan orta büyüklükteki bir taşıtın ortalama egzoz salınımları Şekil 2.4'te verilmiştir. Yanma sonu ürünler içerisinde yer alan HC, CO ve NO_x emisyonları çevre kirleticisi gazlar olarak nitelendirilmektedir. Bu emisyonların asıl sebepleri hava/yakıt oranı ve kullanılan yakıt tipidir (Topgül 2006).

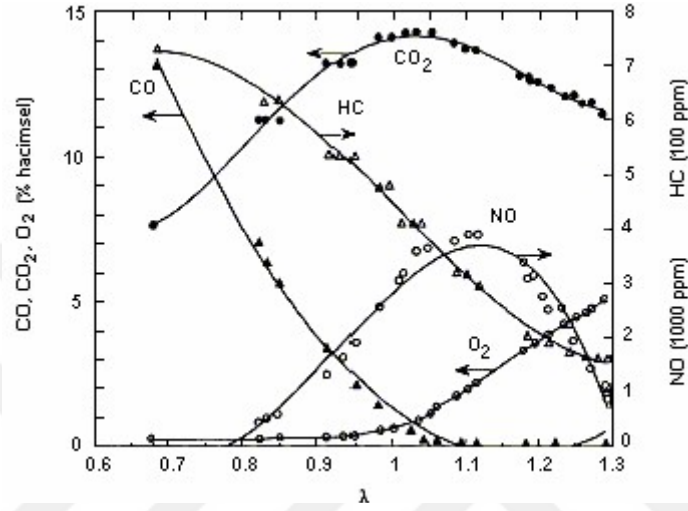


Şekil 2.4 ECE seyir çevrimine göre katalitik konvertörsüz orta büyüklükteki bir taşıtın ortalama egzoz kompozisyonu (Topgül 2006).

Egzoz gazında bir eksik yanma ürünü olan CO emisyonu bulunmasının sebebi yanma odasındaki oksijen miktarının gerekenden daha az olmasıdır. CO emisyonu büyük ölçüde hava fazlalık katsayısına bağlı olarak değişse de alevin yayılma hızının düşük olmasından dolayı, fakir karışımlarda CO'nun CO₂'ye dönüşümü tam olarak gerçekleşemez (Topgül 2006).

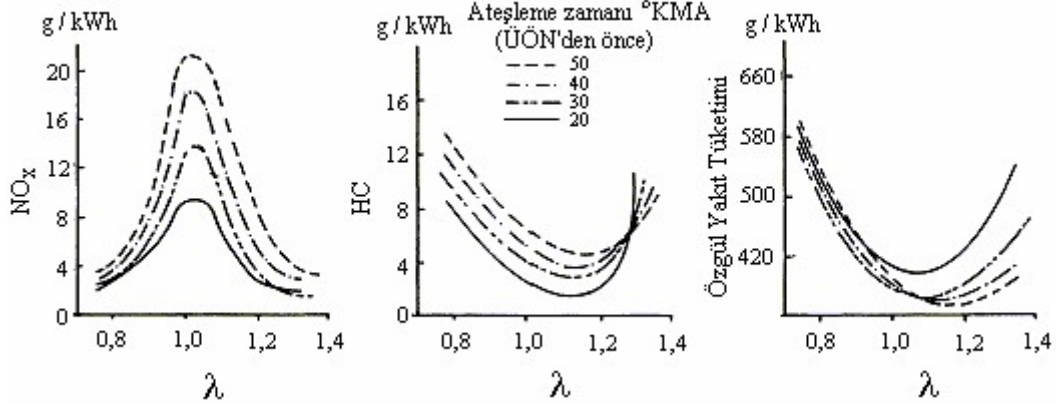
Fakir karışımdan dolayı sıcaklık miktarının düşük olması, zengin karışımdan dolayı oksijen miktarının az olması ya da zamanın yetersiz olmasından dolayı yanma tamamlanamaz ve egzoz emisyonları içerisinde HC emisyonları bulunur. Bunlarla beraber HC emisyonlarını arttıran bir diğer unsur ise silindir içerisindeki ısı kayıpları sebebiyle soğuk cidarlara ulaşan alevin sönmesidir (Topgül 2006).

Yüksek yanma sıcaklıklarında (1600°C 'nin üzerinde) azot, silindir içerisindeki oksijenle birleşerek NO_x emisyonlarını (NO , NO_2) oluşturur. Yanma odasının sıcaklık miktarı ve hava/yakıt oranı NO_x emisyonlarının oluşumunu etkilemektedir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi HFK 1,1 civarlarında iken NO emisyonu oldukça fazla açığa çıkmaktadır (Topgül 2006).



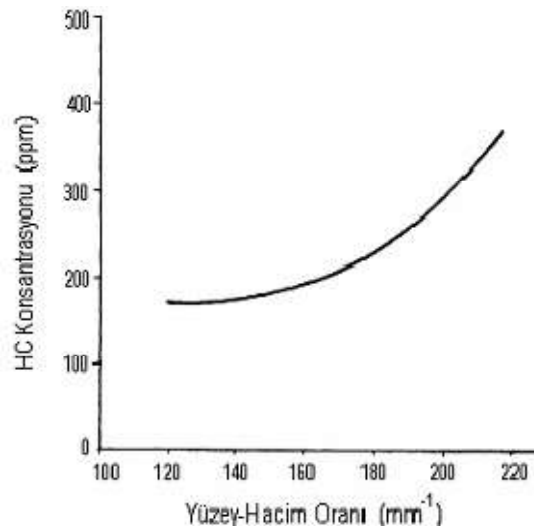
Şekil 2.5 Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak egzoz emisyonlarının değişimi (Topgül 2006).

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi otto motorlarında ateşleme zamanının, motordan alınan güç, özgül yakıt sarfıyatı ve egzoz emisyonları üzerinde oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Ateşleme avansının artırılması HFK değerine bakılmaksızın NO_x emisyonlarını arttırmaktadır. Özellikle $\lambda=1$ durumunda ateşleme avansının artırılması durumunda NO_x oranlarındaki artış çok daha yüksektir. HC emisyonları da NO_x emisyonlarına benzer bir eğilim göstermektedir. Ateşleme avansının arttırılmasıyla egzoz sıcaklığı azalmakta ve buna bağlı olarak HC emisyonlarında artış meydana gelmektedir (Topgül 2006).



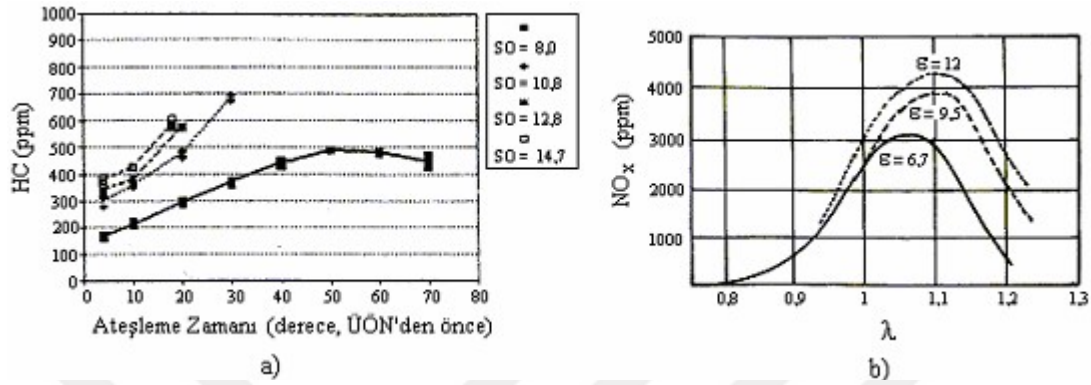
Şekil 2.6 Ateşleme zamanının NO_x , HC emisyonları ve özgül yakıt tüketimi üzerindeki etkisi (Topgül 2006).

Emisyonlar yanma odası geometrisine, çap/strok ve yüzey/hacim oranına ve sıkıştırma oranına bağlıdır. Sıkıştırma oranı değiştirilmeden yanma odasının geometrisinin değiştirilmesi hem egzoz emisyonlarını hem de motorun vuruntu direncini etkiler. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi yanma odasının yüzey alanı genişledikçe cidarlarlara olan ısı taşınımı artacağından alevin sönme bölgesi genişleyerek HC emisyonlarını artırır. Fakat yanma odasından cidarlara olan ısı taşınımı ile sıcaklık bir miktar azalacağından NO_x emisyonları da azalır. CO emisyonu oluşumunda hava/yakıt oranından daha çok sıcaklığın etkili olmasından dolayı yüzey/hacim oranının etkisi daha düşüktür (Topgül 2006).



Şekil 2.7 Yüzey/hacim oranının HC konsantrasyonuna etkisi (Topgül 2006).

Sıkıştırma oranının artması yüzey/hacim oranının artmasına sebep olduğundan HC emisyonlarının yükselmesine sebep olur (Şekil 2.8a). Buna bağlı olarak yüksek sıcaklık ile NO_x emisyonları artmaktadır (Şekil 2.8b) (Topgül 2006).



Şekil 2.8 a) Sıkıştırma oranının HC emisyonu değişimine etkisi (Motor devri: 1500 dev/dk, $\lambda=1$ ve TGKA) b) Sıkıştırma oranının NO_x emisyonlarının değişimine etkisi (Topgül 2006).

Yanma odasındaki hava hareketlerinin artırılması alev hızını artırmakta ve alev sönme bölgesinin kalınlığı azalmaktadır. Bu durum HC emisyonlarının azalmasına neden olurken, sıcaklık artışı NO_x emisyonlarını artırmaktadır (Topgül 2006).

2.2 LPG

LPG (Auto Gas) kullanımı, ev tipi sobalar, otomobiller ve sabit enerji üretimi gibi çeşitli uygulamalar için son yıllarda itibar kazanmaya başladı (Aravind *et al.* 2015). LPG, işlenmemiş petrolün işlenmesiyle veya belirli bölgelerde doğadan serbest olarak elde edilir. Propan ve bütan karışımından meydana gelen ve hafif bir gaz olan LPG, ülkemizde genellikle %70 bütan ve %30 propan karışımı olarak kullanılmaktadır. Bu oran yakıtın kullanıldığı bölgenin sıcaklığına göre değişim gösterir. Soğuk iklim bölgelerinde propan oranı yüksek tutulurken, sıcak bölgelerde ise bütan oranı artırılır (Kızıllan 2003, Balki 2005). Çizelge 3.1’de çeşitli Avrupa ülkelerinde kullanılan LPG yakıtı için propan/bütan oranları verilmiştir.

Çizelge 2.1 Çeşitli Avrupa ülkelerindeki propan/bütan oranı (Balki 2005).

Ülkeler	Propan/Bütan Oranı	
	Yaz	Kış
İngiltere	Propan	Propan
Avusturya	20/80	80/20
Belçika	30/70	50/50
Almanya	Propan	Propan
Danimarka	50/50	50/50
Hollanda	30/70	70/30
İsveç	Propan	50/50
İsviçre	Propan	Propan

LPG, endüstriyel, evsel ve özellikle de otomotiv sektörlerinde popüler olan alternatif bir yakıttır. LPG, kıvılcım ateşlemeli (SI) motorlarda kullanım için gereken temel özelliklerin neredeyse hepsine sahiptir. Çizelge 2.2 LPG tüketimini, tüketimin küresel tüketime oranını ve 2012 yılındaki ilk sekiz ülke için araç sayısını içermektedir. LPG'nin yakıt olarak kullanımı hem bu ülkelerde hem de küresel bazdaki tüketimi son yıllarda hızla artmaktadır. LPG'nin yakıt olarak kullanılması, özellikle çevresel kaygılar nedeniyle dünyanın bir çok yerinde teşvik edilmektedir. Örneğin Avrupa ülkelerinde LPG, 7 milyon yolcu aracında kullanılmaktadır (Liang *et al.* 2010, Setiyo *et al.* 2017, Kim *et al.* 2017, Szpica 2016).

Çizelge 2.2 2012'de LPG kullanan başlıca ülkeler (Ceviz *et al.* 2015).

Ülkeler	LPG Tüketimi (x 1000 ton)	Tüketim Oranı	Araç Sayısı (x 1000)
Güney Kore	4126	17,3	2433
Türkiye	2727	11,4	3650
Rusya	2650	11,1	2500
Polonya	1601	6,7	2615
İtalya	1352	5,7	1867
Tayland	1061	4,4	1014
Japonya	1053	4,4	280
Avustralya	947	4,0	511

LPG yakıtlı motorlar, temel olarak LPG'nin moleküler yapısındaki yüksek hidrojen/karbon oranından dolayı, benzinli motorlara kıyasla daha az zararlı egzoz emisyonu üretirler. Araştırmacılar, LPG yakıtlı motorların performansını daha yüksek sıkıştırma oranı, süper şarj ve turboşarj teknikleri kullanarak ve hem dört hem de iki zamanlı, kıvılcım ve sıkıştırma ateşlemeli motorlarda, kıvılcım zamanlamasını değiştirerek birçok çalışma yapmışlardır. LPG yakıt enjeksiyon sistemleri teknolojisi, benzin enjeksiyon sistemleri teknolojisine dayanmaktadır ve benzin enjeksiyon sistemleri teknolojisinin gelişimini takip etmiştir (Ceviz *et al.* 2015, Sulaiman *et al.* 2013).

LPG yüksek oktan sayısı, yüksek buhar basıncı, kabul edilebilir yanma kararlılığı ve yüksek termal verimliliğe sahiptir. Özellikle enjeksiyon ile yönlendirilen LPG sistemlerinde, homojen olarak karışabilme özelliği, homojen ve stokiyometrik yanma, düşük karbon salınımı ve tanecikli madde emisyonlarında benzine göre belirgin bir azalma sağlamaktadır (Kim *et al.* 2017). Çizelge 2.3'te benzin (95 oktan) ve LPG'nin termodinamik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 Benzin (95 oktan) ve LPG'nin termodinamik özellikleri (Suyabodha 2017).

Özellikler	Benzin (95 Oktan)	LPG
Stokiyometrik Oran	14,7/1	15,6/1
Alt Isıl Değer (MJ/l)	33,50	28,06
Enjeksiyonun Fazı	Sıvı	Gaz
Alevin Yayılma Hızı (m/s)	0,48	0,5
Oktan Sayısı	80-95	106-111
Kendi Kendine Tutuşma Sıcaklığı (°C)	246-280	405-470

Modern LPG yakıt enjeksiyon sistemleri daha verimli olduklarından motor çıkış gücü kaybı önceki sistemlerden çok daha azdır. LPG yakıt enjeksiyon sistemlerinde, LPG yakıtı depoda yüksek basınç altında sıvı haldedir. Yakıt deposundan sonra LPG, sıvı fazdan gaz faza geçtiği basınç regülatörüne akar. Basınç regülatörü, faz değişimi sırasında sıcaklığın aşırı düşmemesi ve LPG'nin buharlaşması için gereken ısıyı motor

soğutma suyundan sağlar. Motor çalıştırıldıktan sonra motor soğutma suyu sıcaklığı artar ve soğutma suyunun ısı enerjisinin bir kısmı, basınç regülatöründe LPG'ye aktarılır. Bununla birlikte, motor soğutma suyu sıcaklığı sabit durum seviyesine yaklaştığında, LPG sıcaklığı aşırı artar. Böylece silindire giren şarj sıcaklığı artar ve motorun hacimsel verimliliğinde azalma meydana gelir. LPG kullanan kıvılcım ateşlemeli motorlardaki gücün azalmasının bir sebebi de budur. Ayrıca yüksek basınç ve yoğunluk değişimlerinden dolayı, nispi hava-yakıt oranının kontrolü, benzinli motorlara göre daha zordur. Motor devri, motor yükü, LPG'nin akış hızı, motor soğutma sıvısı sıcaklığı, LPG regülatör devrelerinde akan akışkanın hızı ve ortam sıcaklığı gibi parametreler basınç regülatörünün çıkışındaki LPG sıcaklığını belirler (Ceviz *et al.* 2015).

267 m³ hacmindeki gaz, sıvılaştırıldığında 1 m³'lük bir hacme sığar. Bu durum sıvı halinin, gaz halinden 230-267 kat daha yoğun olduğu anlamına gelir. LPG'nin buharlaşma sıcaklığının 0 °C'nin altında olmasından dolayı ve yüksek basınç gerektirmesinden dolayı araçlarda kullanılan LPG basınca dayanıklı tanklarda depolanmaktadır. Tüp gaz olarak da bilinen LPG renksiz ve kokusuzdur. Bu yüzden güvenlik önlemi olarak üreticiler tarafından etil merkup (C₂H₅SH) ile kokulandırılırlar (Balki 2005).

2.2.1 Otomotiv Motorlarında LPG Kullanımı

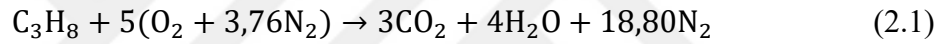
Ülkemiz otomotiv sektöründe LPG kullanımı çevreci olmasından ziyade fiyat cazibesi ile kabul görmektedir. LPG yakıt sistemlerinin otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanması, 1996 yılında ticari amaçla kullanılan taşıtların talebi ile ortaya çıkmıştır. 1998 yılında teknik ve yasal düzenlemeler ve standartlara ulaşma süreçlerinin ardından yaygınlaşmaya başlamıştır. Türkiye'de LPG kullanımı, 2000 yılından sonra kayda değer bir gelişme göstererek 1,3 milyon tona kadar yükselmiştir (Çiçek 2018).

2.2.2 LPG'nin Yanma Denklemleri

LPG'nin motorda yanması için gereken oksijen atmosferden karşılanır. Atmosfer havası, %78,09 Azot, %20,95 Oksijen, %0,93 Argon ve %0,03 Karbon monoksitten oluşmaktadır. Havanın diğer bileşenleri önemsenmeyecek seviyede olduklarından yanma denklemlerinde yalnızca Azot (%79) ve oksijen (%21) hesaba katılır. Bu bileşimdeki havanın molekül ağırlığı 28,851'dir. Bu bileşim içerisindeki bir mol oksijene karşılık 3,76 mol azot bulunmaktadır (Balki 2005).

Hacimsel olarak %50 bütan ve %50 propandan oluşan LPG karışımının yanma denklemleri aşağıda gösterilmiştir.

Propanın yanma eşitliği;



şeklindedir. Bu eşitlikte kimyasal olarak teorik tam yanma için (hiç oksijen artmayacak şekilde, minimum seviyede oksijen ile yanma) hava kullanılmıştır. Reaksiyonda hava (h) / yakıt (y) mol oranı;

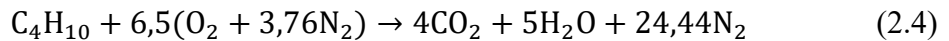
$$\frac{h}{y} = \frac{5}{1} \text{ kmol hava/kmol yakıt} \quad (2.2)$$

ağırlık oranı ise;

$$\frac{h}{y} = \frac{5 \cdot (32 + 3,76 \cdot 28)}{12 \cdot 3 + 8 \cdot 1} = \frac{15,6}{1} \quad (2.3)$$

kg hava/ kg yakıt olmaktadır.

Bütanın yanma denklemi;



Reaksiyonun hava (h) / yakıt (y) mol oranı;

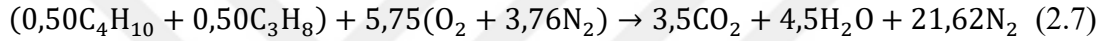
$$\frac{h}{y} = \frac{6,5}{1} \text{ kmol hava / kmol yakıt} \quad (2.5)$$

Kütlesel oranı ise,

$$\frac{h}{y} = \frac{5 \cdot (32 + 3,76 \cdot 28)}{12 \cdot 4 + 10 \cdot 1} = \frac{11,83}{1} \text{ kg hava / kg yakıt} \quad (2.6)$$

olmaktadır.

Dolayısıyla %50 bütan ve %50 propandan oluşan karışıma ait yanma denklemi;



olur.

Bütan ve propan karışımı için reaksiyonun hava / yakıt mol oranı;

$$\frac{h}{y} = \frac{5,75}{1} \text{ kmol hava / kmol yakıt} \quad (2.8)$$

Ağırlık oranı ise;

$$\frac{h}{y} = \frac{5,75 \cdot (32 + 3,76 \cdot 28)}{0,5 \cdot (12 \cdot 4 + 10 \cdot 1) + 0,5 \cdot (12 \cdot 3 + 8 \cdot 1)} = \frac{15,47}{1} \text{ kg hava / kg yakıt} \quad (2.9)$$

olarak hesap edilmektedir.

2.2.3 LPG'nin Avantajları

- LPG sıvı fazda depolanıp gaz fazda kullanılabilir (Kızıllan 2003).
- Isıl değeri benzinin ısıl değerinden yüksektir (Ceviz *et al.* 2015).
- LPG uygulanan araçlarda düzgün bir işçilik ve kalibrasyonla hem benzinden daha düşük sıcaklıkta buharlaşması hem de benzine göre daha homojen bir

karişim oluşturabilmesi sebebiyle benzinli araçlara göre çok daha düşük egzoz emisyon değerlerine sahiptir.

- Kullanım maliyeti olarak LPG, benzine göre daha ekonomik bir yakıttır.
- LPG temiz bir yanma sağladığından; pistonların, segmanların, supapların, bujilerin ve yanma odasının aşınması sonucu oluşan kurşun, vernik ya da karbon atığı ortaya çıkarmaz.
- LPG tankının içerisindeki yakıt kendinden basınçlı olduğu için, benzinli motorlarda kullanılan yakıt pompasına ihtiyaç yoktur.
- Tamamen kapalı bir yakıt sistemi içerdiğinden sızıntı ve buharlaşma riski yoktur.
- LPG yakıtlı motorlar benzin yakıtlı motorlara göre daha az aşınacağından kullanım maliyetleri çok daha dşktir.
- Benzine göre %50 daha az CO, %65 daha az HC, %40 daha az NO_x ve %87 daha az ozon içeren emisyon üretirken, motorine göre ise %90 daha az partikül, HC, CO ve %50 daha az NO_x emisyonu üretir (iek 2018, Szpica 2016).
- Ierisindeki oktan sayısı benzinin oktan sayısından fazla olduğu için benzine göre vurutuya karşı daha iyi direnç gösterir. Böylece daha büyük sıkıştırma oranlarına çıkılarak motordan daha iyi bir performans almak mümkün olabilmektedir (Ceviz *et al.* 2015).
- LPG gaz fazında yakıldığı için motorun çalışma karakteri benzine göre daha yumuşaktır (Sulaiman *et al.* 2013).
- LPG sistemlerinin Türkiye’de artan kullanımı ile beraber yeni iş alanları doğmuş ve istihdam oluşturmuştur (iek 2018).
- Benzinli araçlara uygulanan LPG dönüşümü sistemleri nispeten düşük maliyetlidir (Morganti *et al.* 2013).
- Düzgün bir montaj ve bakımla birlikte oldukça güvenilir bir yakıt sistemidir (Sulaiman *et al.* 2013).

2.2.4 LPG’nin Dezavantajları

- Oldukça düşük sıcaklıklarda buharlaşması sebebi ile sıvı gazın insan vücudu ile teması sonucunda önemli deri yanıklarına sebep olabilmektedir (iek 2018).

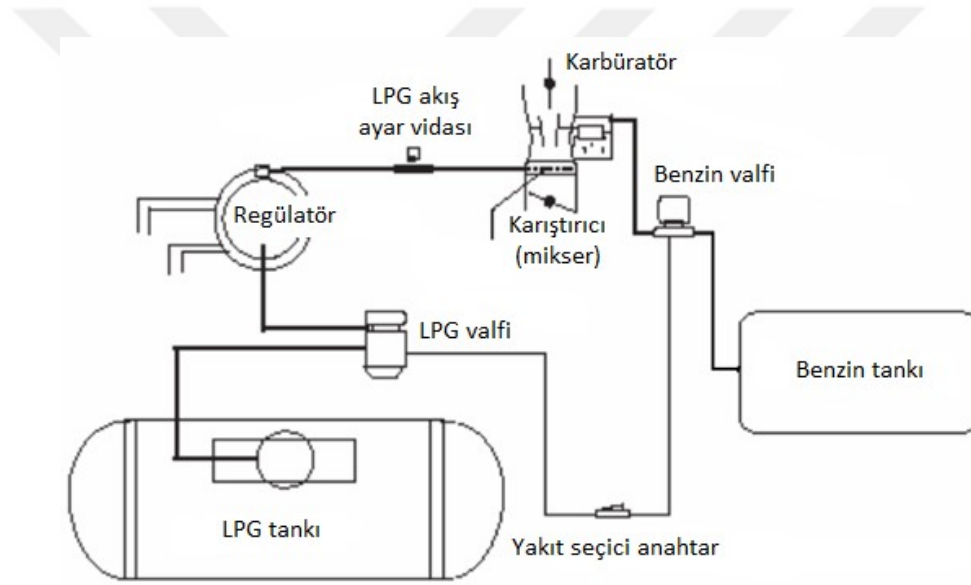
- Sıcaklık ile birlikte basıncı da arttığı için standartlara uygun LPG ekipmanlarının kullanılmaması halinde, taşıtlarda kullanılması güvenli olmamaktadır (Balki 2005, Çiçek 2018).
- Ülkemizde kullanılan LPG'nin yaklaşık %70'i ithal edilmektedir.
- Sıvı yakıtlara göre depolama ve taşıma maliyetleri daha yüksektir (Balki 2005).
- Karakteristik özelliklerine göre değişmekle beraber motor performansında bir miktar azalma görülmektedir (Çiçek 2018).
- Yüksek oktan sayısına sahip olması sebebiyle özellikle yüksek sıkıştırma oranlı motorlarda kullanıldığında motorun NO_x emisyonunda bir miktar artış söz konusudur (Balki 2005, Çiçek 2018).
- Kütle başına ısı değeri benzininkine yakın olmasına rağmen; hacimsel olarak LPG'nin ısı değeri daha düşüktür. Bu yüzden LPG'li bir araç, benzinli bir araca göre aynı mesafede %10 daha fazla yakıt tüketir (Çiçek 2018).
- SI motorlarda benzin, emme manifoldunda sıvı fazdan gaz fazına dönüşür ve faz dönüşümü sırasında bir soğutma etkisi yaratır. Bu soğutma etkisi ile emme havasının yoğunluğunu ve motorun hacimsel verimini artırır. Öte yandan, LPG yakıtlı SI motorlarda, yakıt motor emme manifolduna gaz fazında aktarılır. Gaz halindeki LPG, motorun emme manifoldunda %15-%20 daha fazla hacim kaplar. Ayrıca, LPG'nin giriş havası üzerinde bir soğutma etkisi de yoktur. Gaz halinde olması ve soğutma etkisinin olmaması, LPG kullanımında benzine göre hem hacimsel verimliliği hem de motor performansını düşürmektedir. Bu gerçeklerden dolayı, LPG yakıtlı motorların güç çıkışı, benzin yakıtlı motorlara göre %5–10 oranında daha düşüktür (Ceviz *et al.* 2015, Sulaiman *et al.* 2013).

2.2.5 İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılan LPG Dönüşüm Sistemleri

LPG, güç kaybını önlemek ve egzoz emisyon değerlerini yeni normlara uygun hale getirmek için, benzinli sistemlerdeki gelişmelere paralel olarak kendini yenilemiştir. LPG dönüşüm sistemleri, 1. nesil LPG dönüşüm sistemleri, 2. nesil LPG dönüşüm sistemleri, 3. nesil LPG dönüşüm sistemleri ve 4. nesil LPG dönüşüm sistemleri olmak üzere dört ana sınıfa ayrılmaktadır.

2.2.5.1 1. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri

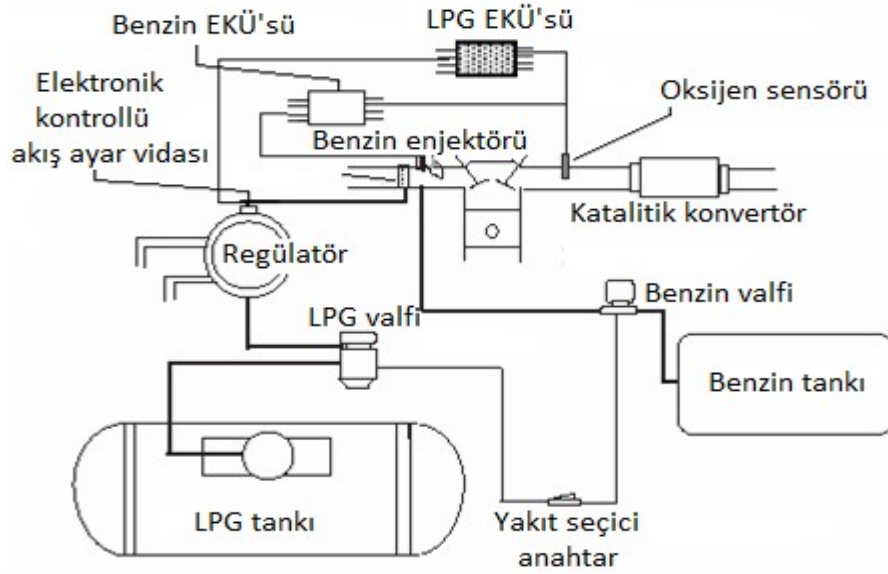
1. nesil LPG dönüşüm sistemleri, karbüratörlü motorların dönüşümünde kullanılmaktadır. Yakıt kontrolünün bir karıştırıcı (mikser) ve basınç düzenleyicisi (regülatör) ile sağlandığı en basit yapıli sistemlerdir. Yakıt deposunda sıvı halde bulunan yakıt, öncelikle bir regülatör ile buharlaştırılır. Gaz haline dönüşen yakıt daha sonra mikserde hava ile karıştırılır ve böylece hava-yakıt karışımı silindirlere gönderilmeye hazır hale gelmiş olur. Sistem mekanik olduğundan yeni nesil sistemlere göre performans-emisyon açısından verimsizdirler (Şekil 2.9) (Erkuş 2011, Mitukiewicz *et al.* 2015, Aydın 2006).



Şekil 2.9 1. nesil LPG dönüşüm sistemi (Erkuş 2011).

2.2.5.2 2. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri

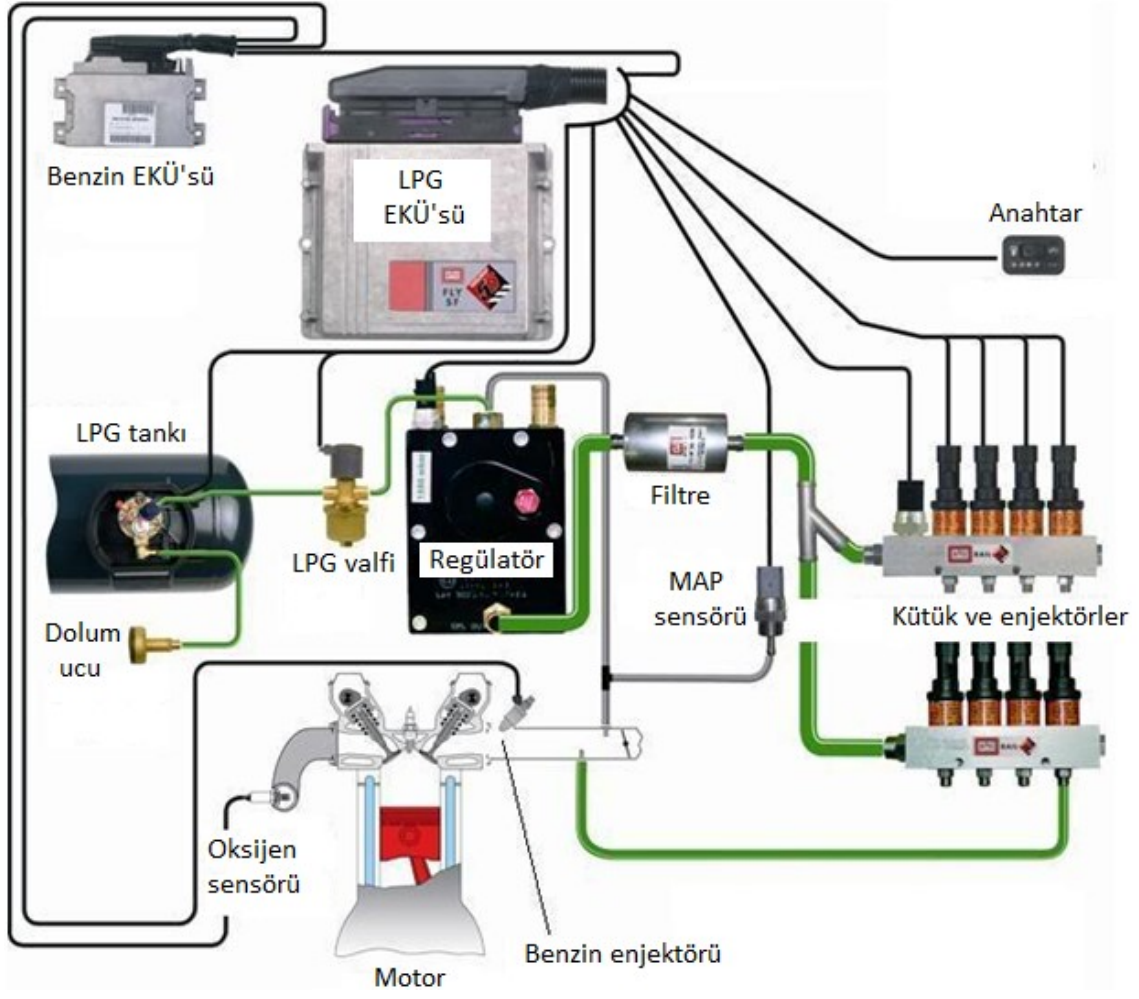
2. nesil LPG dönüşüm sistemlerinde yakıt kontrolü, elektronik kontrollü karıştırıcı ve basınç düzenleyici ile sağlanmaktadır. Motorun elektronik kontrol ünitesi (ECU), motor devri ve oksijen (lambda) sensörü verilerini kullanarak daha verimli bir yanma gerçekleşmesi için yakıtın kontrolünü sağlar (Erkuş 2011, Mitukiewicz *et al.* 2015, Aydın 2006).



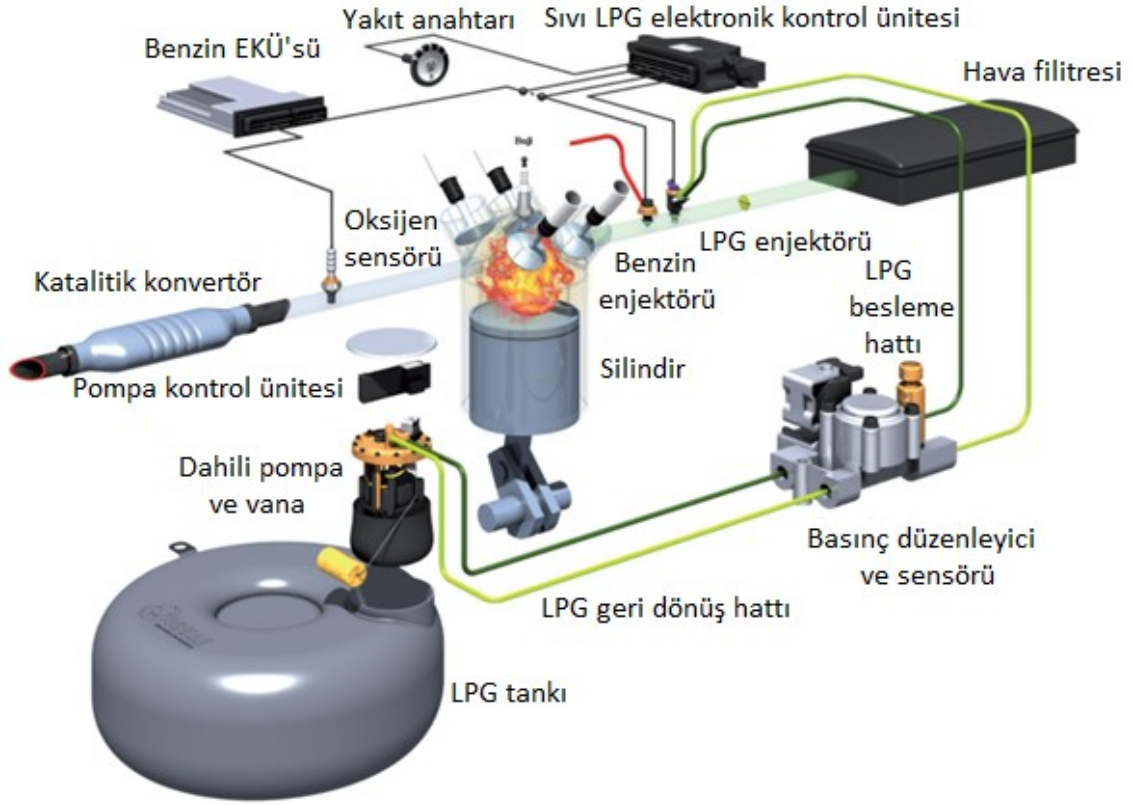
Şekil 2.10 2. nesil LPG sistemi (Erkuş 2011).

2.2.5.3 3. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri

3. nesil LPG dönüşüm sistemleri çok noktalı enjeksiyon sistemleri veya sıralı sistemler olarak bilinirler. Bu sistemlerde yakıt hem sıvı haldeyken hem de gaz haldeyken enjeksiyon gerçekleştirilebilir. Şekil 2.11’de 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinin şematik görünümü ve Şekil 2.12’de sıvı haldeki yakıtın püskürtüldüğü 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinin şematik görünümü verilmiştir. Yakıt, emme manifolduna, her bir silindirin emme subabının arkasına enjekte edilir ve böylece her silindire eşit ve gerekli miktarda yakıt gönderilir. Bir önceki nesilde olduğu gibi bu sistemlerde kapalı döngü kontrol mantığıyla çalışırlar. Sıvı haldeki yakıtın püskürtüldüğü 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinde yakıt manifold içerisinde gaz haldeki LPG’ye göre daha az yer kapladığından bu sistemlerin hacimsel verimleri daha yüksektir (Erkuş 2011).



Şekil 2.11 3. nesil LPG dönüşüm sistemlerinin şematik görünümü (Erkuş 2011).



Şekil 2.12 Sıvı haldeki yakıtın püskürtüldüğü 3. nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik görünümü (Erkuş 2011).

2.2.5.4 4. Nesil LPG Dönüşüm Sistemleri

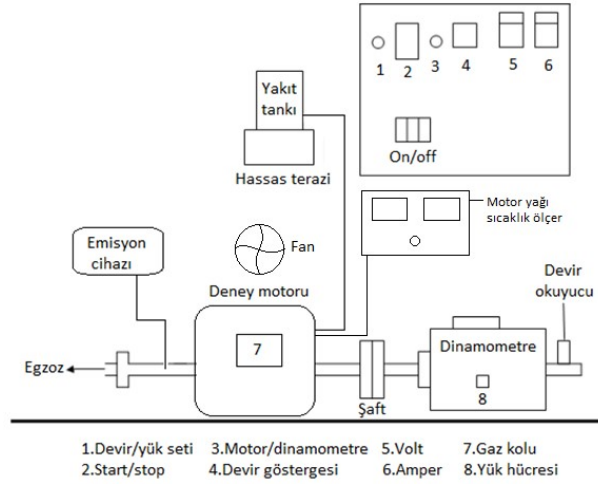
4. nesil LPG dönüşüm sistemlerinde yakıt enjeksiyonu direkt olarak silindir içerisine yapılmaktadır. Yakıt, emme manifolduna püskürtülmediğinden manifoldda kaplayacağı hacmi hava doldurmaktadır. Dolayısıyla bu sistemlerin hacimsel verimleri, 3. nesil manifolda püskürtme LPG dönüşüm sistemlerine göre daha yüksek olmakta, yanma daha verimli hale gelmekte ve CO₂ emisyonları iyileşmektedir (Erkuş 2011). Şekil 2.13'te 4. nesil LPG dönüşüm sisteminin şematik görünümü verilmiştir.

3. MATERYAL METOD

Deneylerde benzin yakıtlı, hava soğutmalı ve tek silindirli Lombardini marka LGA 340 OHC model motora LPG uygulaması yapılarak LPG'nin motorun performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Bunun için motora 1. nesil Atiker marka LPG dönüşüm sistemi uygulanmıştır. Deney düzeneği, Lombardini marka motor, KEMSAN marka dinamometre, ESIT marka loadcell, BİLSA marka emisyon cihazı, Densi marka hassas terazi'den oluşmaktadır. Deneyler, benzin ve LPG ile motorun maksimum tork devrinde (2600 dev/dk) %20, %40, %60, %80 ve %100 olmak üzere beş farklı gaz keleşi açıklığında ve motor yağı sıcaklığı yaklaşık 90 °C civarında tutularak gerçekleştirilmiştir. Deneyler Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakóltesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Test Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Resim 3.1'de, şematik görünümü ise Şekil 3.1'de verilmiştir.



Resim 3.1 Deney düzeneğinin genel resmi.



Şekil 3.1 Deney düzeneğinin şematik görünümü.

3.1 Deney Motoru

Deneylerde hava soğutmalı olan Lombardini LGA 340 OHC model motor kullanılmıştır. Bu motorun teknik özellikleri Çizelge 3.1’de, motorun görseli ise Resim 3.2’de gösterilmiştir. Benzin motoruna LPG uygulaması yapılmış ve Resim 3.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 Motorun teknik özellikleri.

Soğutma Sistemi	Hava
Motor Tipi	4 zamanlı
Supap Mekanizması	Üstten Tek Egzantrik
Silindir sayısı	1
Silindir çapı (mm)	82
Strok (mm)	64
Motor hacmi (cm³)	338
Sıkıştırma oranı	8,5 / 1
Max. Güç (kW/HP) (DIN 70020)	7,4/10 – 8,1/11
Max. tork (Nm/Kgm)	23,7 / 2,4
Yağ kapasitesi (l)	1,2
Yağ tüketimi (g/kWh-g/HPh)	342-251
Motorun boş ağırlığı (Kg)	30
Buji	Champion RC12YC
Ateşleme sistemi	Elektronik



Resim 3.2 LGA 340 OHC.



Resim 3.3 Benzin motoruna LPG uygulaması.

3.2 Emisyon Cihazı

Deneylerde Bilsa MOD 2210 WIN-XP marka egzoz emisyon cihazı kullanılmıştır. Kullanılan egzoz emisyon cihazı Resim 3.4'te, teknik özellikleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Resim 3.4 Egzoz emisyon cihazı.

Çizelge 3.2 Egzoz emisyon cihazının teknik özellikleri.

Parametreler	Ölçme Sınırı	Hassasiyet
CO	0-%10	%0, 001
CO ₂	0-%20	%0, 001
HC	0-10000	1 PPM
O ₂	0-%25	%0, 01
CO Corr	0-%10	%0, 001
NO _x	0-5000	1 PPM
Lambda	0-5, 000	0,001
AFR	0-5, 000	
Motor yağ ısısı	0-150 °C	1 °C
Devir (RPM)	0-9990 d/dak.	10 d/dak.
Opasite (pusluluk derecesi)	%0-100	%0, 1
K (karartma katsayısı)	0-9,99	0, 01m ⁻¹
Çalışma ortam sıcaklığı	0 °C/+40 °C	%0, 01
Algılama süresi	< 5 sn.	
Ölçüm odası sıcaklığı	70-100°C	
Besleme voltajı	230 V AC	
Besleme frekansı	50 Hz	
Debi	Min. 2 lt/sn-Nom. 4 lt/sn	

3.3 Yük Okuyucu (Laodcell)

Deneyde kullanılan ESIT marka loadcell cihazı Resim 3.5'te, teknik özellikleri ise izelge 3.3'de verilmiştir.



Resim 3.5 Loadcell cihazı.

Çizelge 3.3 Loadcell cihazının teknik zellikleri.

Loadcell	8 adet (350 ohm)
Giriş hassasiyeti	0.5 μ V/dijit
Hassasiyet	%0.003
Stabilite	3.6 ppm/ $^{\circ}$ C
A/D dönüştürücü	24 bit Sigma-Delta
Okuma frekansı	50 Hz
Uyarım voltajı	10V DC
Çalışma sıcaklığı aralığı (OIM onaylı)	-10 $^{\circ}$ C/+40 $^{\circ}$ C
Depolama sıcaklığı aralığı	-20 $^{\circ}$ C/+70 $^{\circ}$ C
Çalışma voltajı ve gç	10-35V DC/5W
Ağırlık	1 kg
Yük göstergesi	4.5 mm, 40 pixel, LCD, 2x16 digit

3.4 Hassas Terazi

Deneylerde, tüketilen yakıt miktarını ölçmek için 30 kg'ye kadar ölçüm yapabilen 1 gram hassasiyetine sahip Densi PC-100W-30SS marka hassas terazi kullanılmıştır (Resim 3.6).



Resim 3.6 Deneylerde kullanılan hassas terazi.

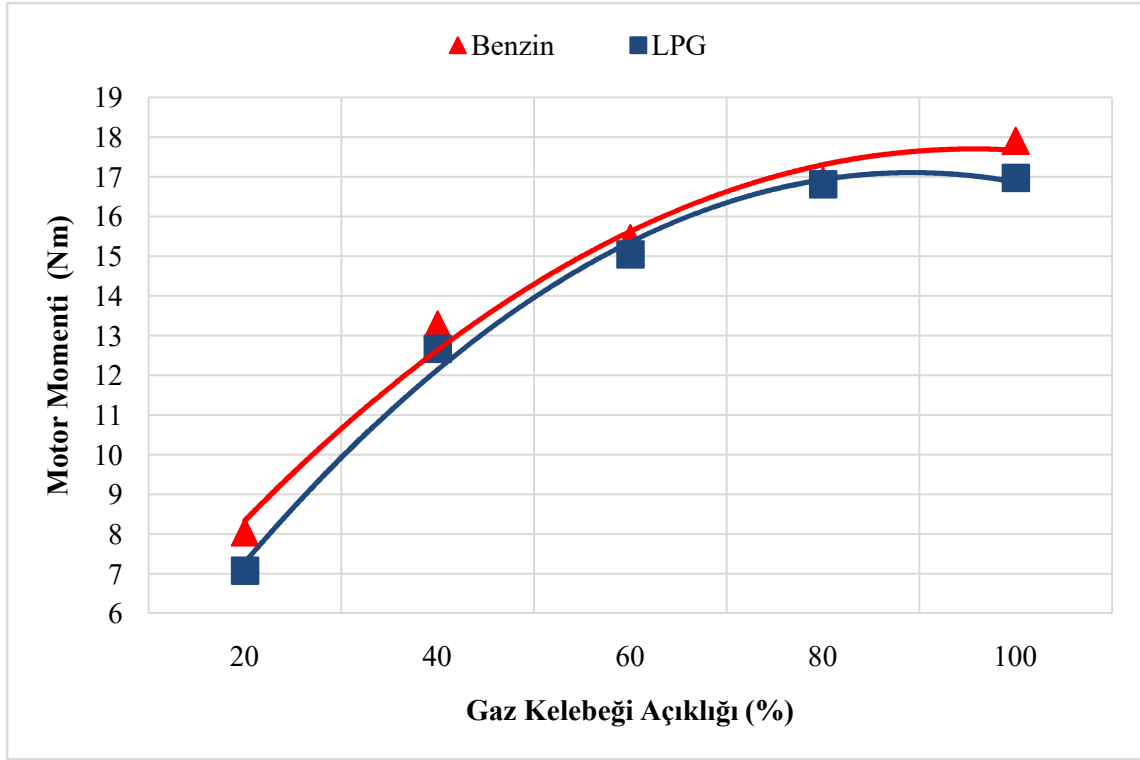
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Hava soğutmalı, buji ile ateşlemeli motorun LPG montajı tamamlandıktan sonra deney düzeneği oluşturulmuş ve motorun maksimum tork devri olan 2600 dev/dk sabit motor devrinde, farklı gaz kelebeği açıklıklarında gerçekleştirilmiştir. Gaz kelebeği açıklıkları %20, %40, %60, %80 ve %100 olarak belirlenmiş ve gaz kelebeği açıklığı arttıkça motora uygulanan yük artırılarak motor devri sabit tutulmuştur. Deneylerde motor performansı ve egzoz emisyonları benzin ve LPG yakıtları için farklı gaz kelebeği açıklıklarına bağlı olarak ölçülmüştür.

4.1 Motor Performansı Ölçüm Sonuçları

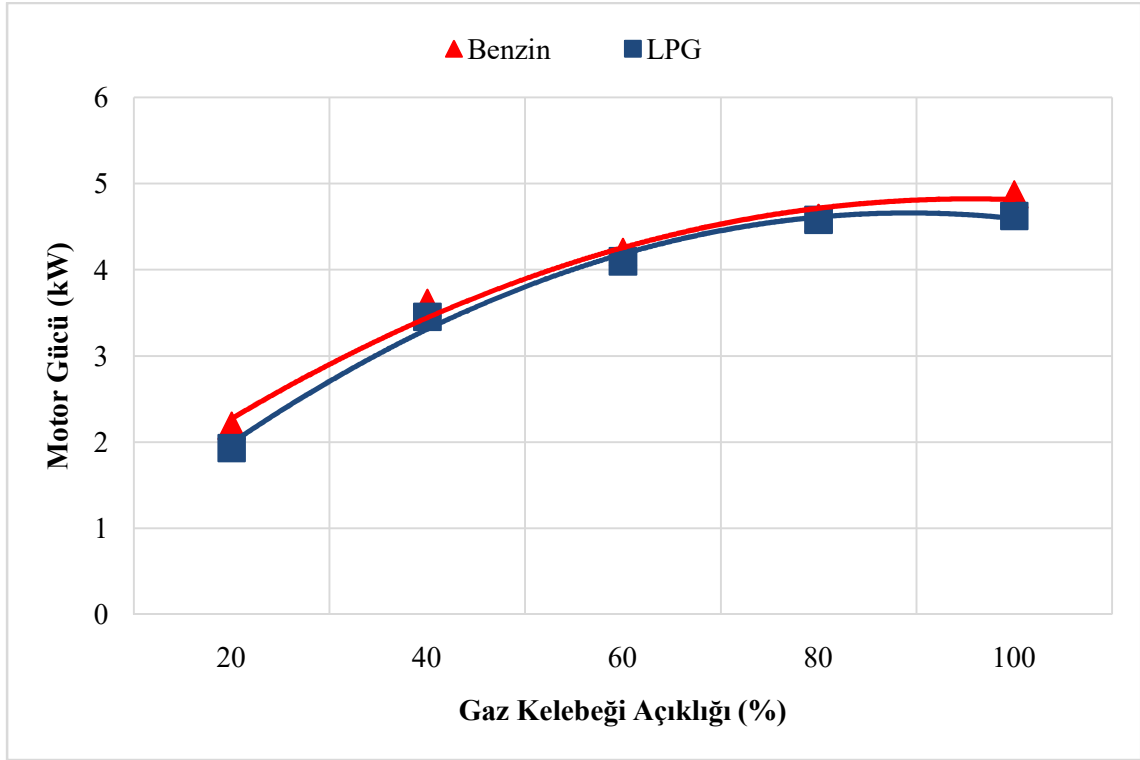
Hava soğutmalı motorda, motor gücü, motor momentı ve özgül yakıt tüketimi değerleri farklı gaz kelebeği açıklıklarına bağlı olarak ölçülmüştür. Benzin ve LPG yakıtları kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen performans değerleri birbiriyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.1’de benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor momentı değişimleri verilmiştir. Motorun maksimum momentı benzin ve LPG yakıtları için %100 gaz kelebeği açıklığında sırasıyla 17,9 Nm ve 16,97 Nm olarak elde edilmiştir. Ortalama motor momentı LPG kullanımı ile benzine göre %4,15 azalmıştır. Şekil 4.1 incelendiğinde her iki yakıt içinde artan gaz kelebeği açıklığı ile motora daha fazla hava-yakıt karışımı alındığından motor momentinin artış gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte, LPG yakıtı karbüratörde gaz halde bulunduğundan motora alınan hava miktarını ve dolayısıyla hacimsel verimi düşürmektedir. Bu yüzden LPG kullanımı ile motor momentı benzine göre kısmen düşmektedir (Duc and Duy 2018).



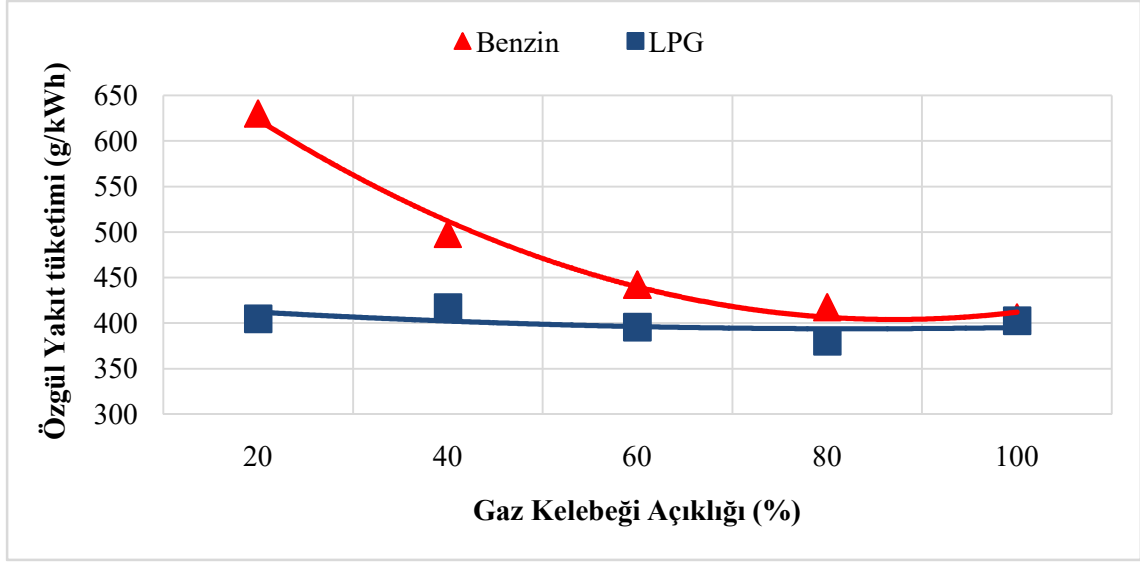
Şekil 4.1 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor momenti değişimleri.

Şekil 4.2’de benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor gücü değişimleri verilmiştir. Motorun maksimum gücü benzin ve LPG yakıtları için %100 gaz kelebeği açıklığında sırasıyla 4,87 kW ve 4,62 kW olarak elde edilmiştir. Ortalama motor gücü LPG kullanımı ile benzine göre %4,15 daha düşük çıkmıştır. Şekil 4.2 incelendiğinde artan gaz kelebeği açıklığı ile motora daha fazla hava-yakıt karışımı alındığından motor gücünün her iki yakıt türü için de artış gösterdiği görülmektedir. Motor gücü, motor momenti ve motor devriyle doğru orantılı olarak değişmektedir. Sabit motor devrinde artan gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor momentinin artmasıyla motor gücü de artış göstermektedir. Bununla birlikte, LPG yakıt karbüratörde gaz halinde bulunduğundan motora alınan hava miktarı ve dolayısıyla motorun hacimsel verimi düşmektedir. Bu yüzden LPG kullanımı ile motor gücü benzine göre kısmen düşmektedir (Duc and Duy 2018).



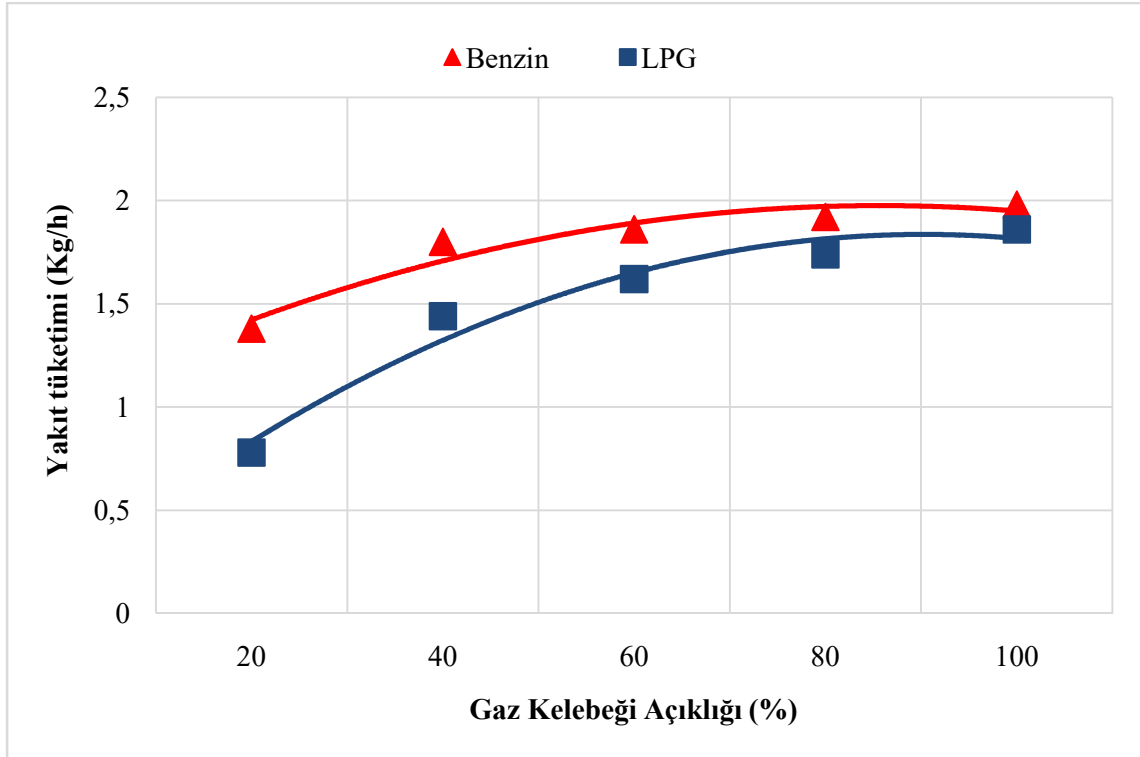
Şekil 4.2 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak motor gücü değişimleri.

Şekil 4.3'te benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri verilmiştir. Motorun minimum özgül yakıt tüketimi benzin ve LPG yakıtları için sırasıyla %100 gaz kelebeği açıklığında 406,18 g/kWh ve %80 gaz kelebeği açıklığında 380 g/kWh olarak elde edilmiştir. Ortalama özgül yakıt tüketimi LPG kullanımı ile benzine göre %16,45 azalma göstermiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde artan gaz kelebeği açıklığı ile özgül yakıt tüketiminin her iki yakıt içinde genel olarak azaldığı görülmektedir. Özgül yakıt tüketimi, anlık yakıt tüketimiyle doğru, motor gücüyle ise ters orantılı olarak değişen bir parametredir. Artan gaz kelebeği açıklığı ile motor gücü arttığından özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Bununla birlikte, LPG motora gaz halinde alındığından hava ile daha iyi karışmakta ve böylece yanmayı iyileştirmektedir. Bu yüzden LPG kullanımı ile benzine göre daha düşük bir özgül yakıt tüketimi elde edilmiştir (Duc and Duy 2018).



Şekil 4.3 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değişimleri.

Şekil 4.4'te benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak yakıt tüketimi değişimleri verilmiştir. Motorun minimum yakıt tüketimi benzin ve LPG yakıtları için %20 gaz kelebeği açıklığında sırasıyla 1,38 kg/h ve 0,78 kg/h olarak elde edilmiştir. Ortalama yakıt tüketimi LPG kullanımı ile benzine göre %16,77 azalma göstermiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde artan gaz kelebeği açıklığı ile motora daha fazla hava-yakıt karışımı alındığından her iki yakıt türünde de yakıt tüketimi artmıştır. Bununla birlikte benzinin ısı değeri LPG'ye göre düşük olduğundan LPG'den elde edilen enerjinin benzinele elde edilmesi için daha fazla benzin tüketilmektedir (Ceviz *et al.* 2015, Sulaiman *et al.* 2013).

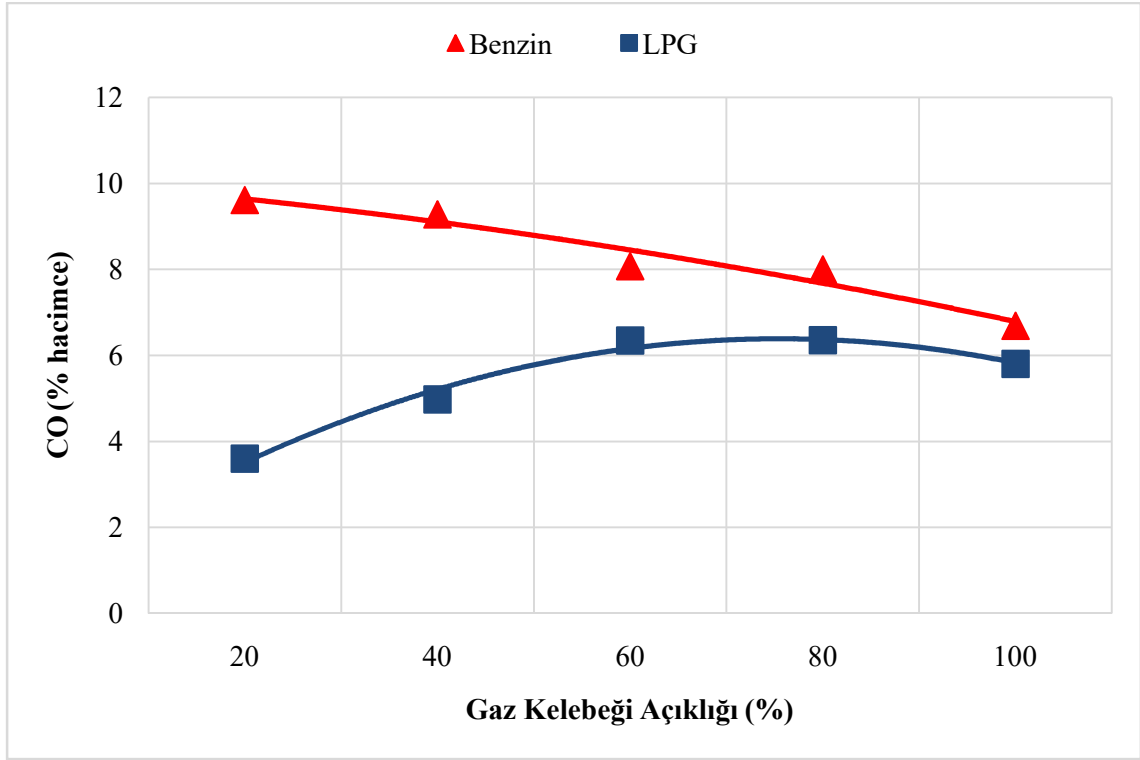


Şekil 4.4 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak yakıt tüketimi değişimleri.

4.2 Egzoz Emisyonları Ölçüm Sonuçları

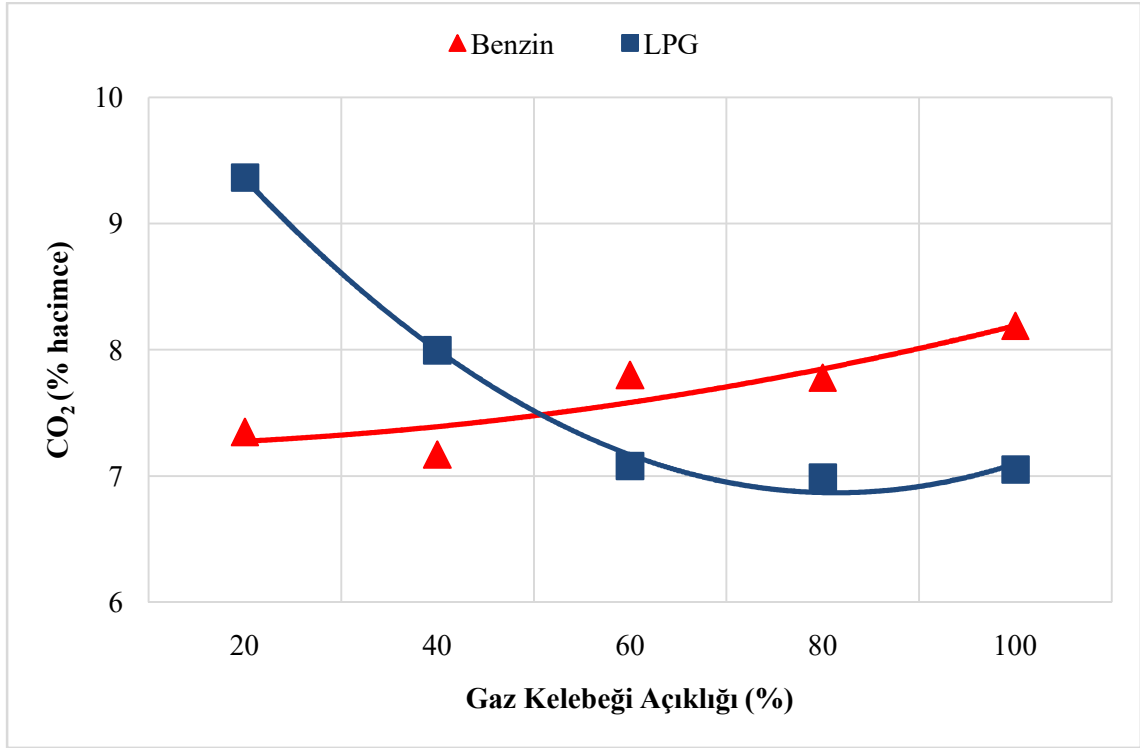
Hava soğutmalı motor, benzin ve LPG yakıtları ile çalıştırılarak elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. CO, CO₂, HC ve NO_x emisyonları motorun farklı gaz kelebeği açıklıkları için değerlendirilmiştir.

Şekil 4.5'te benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO emisyonu değişimleri verilmiştir. Motorun minimum CO emisyonu benzin ve LPG yakıtları için sırasıyla %100 gaz kelebeği açıklığında %6,68 ve %20 gaz kelebeği açıklığında %3,59 olarak belirlenmiştir. Ortalama CO emisyonu LPG kullanımı ile benzine göre %35 azalmıştır. LPG gaz halde bulunduğundan hava ile daha iyi karışmakta ve yanmayı iyileştirmektedir. Bu sayede CO emisyonu LPG kullanımı ile azalmaktadır (Duc and Duy 2018).



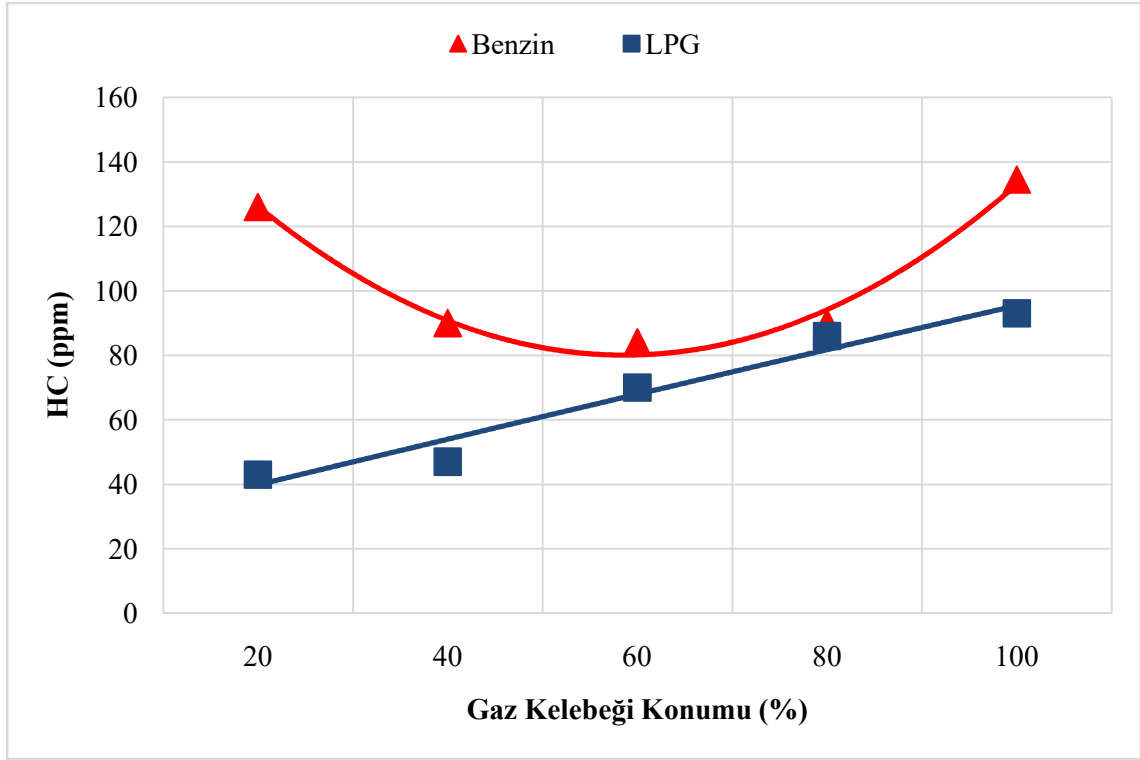
Şekil 4.5 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO emisyonu değişimleri.

Şekil 4.6’da benzin ve LPG yakıtları için farklı gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri verilmiştir. Motorun minimum CO₂ emisyonu benzin ve LPG yakıtları için sırasıyla %40 gaz kelebeği açıklığında %7,17 ve %80 gaz kelebeği açıklığında %6,98 olarak belirlenmiştir. Ortalama CO₂ emisyonu LPG kullanımı ile benzine göre %2,5 azalmıştır. Şekil 4.6’da LPG eğrisi incelendiğinde %80 gaz kelebeği açıklığına kadar artan gaz kelebeği açıklığı ile içeriye alınan hava-yakıt karışımının ve eksik yanmanın arttığı anlaşılmaktadır. Şekil 4.4’te görülen CO ve Şekil 4.5’te görülen CO₂ emisyonu değişimlerinin birbiri ile zıt şekilde değiştiği belirlenmiştir. %80 gaz kelebeği açıklığından sonra artan gaz kelebeği açıklığı ile hava yakıt karışımının daha homojen bir hale gelmesi sonucunda silindir içerisindeki yanma iyileşmiş olup Şekil 4.4’te CO emisyonlarının azalıp, Şekil 4.5’te CO₂ emisyonlarında bir miktar artış olduğu görülmektedir.



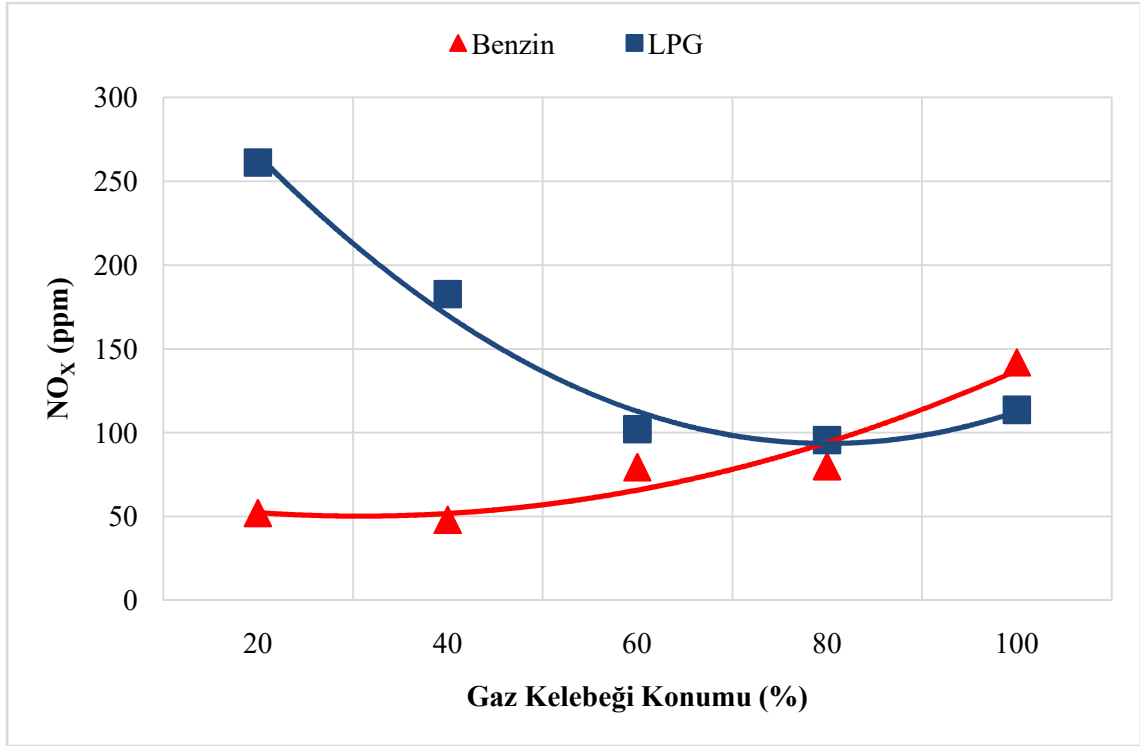
Şekil 4.6 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak CO₂ emisyonu değişimleri.

Şekil 4.7’de benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak HC emisyonu değişimleri verilmiştir. Motorun minimum HC emisyonu benzin ve LPG yakıtları için sırasıyla %60 gaz kelebeği açıklığında 84 ppm ve %20 gaz kelebeği açıklığında 43 ppm olarak belirlenmiştir. Ortalama HC emisyonu LPG kullanımı ile benzine göre %35,36 azalmıştır. LPG gaz halde bulunduğundan hava ile daha iyi karışmakta ve yanmayı iyileştirmektedir. Bu sayede HC emisyonu LPG kullanımı ile azalmaktadır (Duc and Duy 2018).



Şekil 4.7 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak HC emisyonu değişimleri.

Şekil 4.8’de benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri verilmiştir. Motorun minimum NO_x emisyonu benzin ve LPG yakıtları için sırasıyla %40 gaz kelebeği açıklığında 48 ppm ve %80 gaz kelebeği açıklığında 95,5 ppm olarak belirlenmiştir. Ortalama NO_x emisyonu LPG kullanımı ile benzine göre %88 artmıştır. Şekil 4.8’de benzin eğrisi incelendiğinde artan gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak NO_x emisyonlarında düzenli bir artış görülmektedir. Artan gaz kelebeği açıklığı ile motora daha fazla hava-yakıt karışımı alınmakta ve dolayısıyla yanma sonu sıcaklığına bağlı olarak NO_x miktarı artmaktadır. LPG eğrisi incelendiğinde ise %20 ve %70 gaz kelebeği açıklıkları arasında gaz kelebeği açıklığının artması ile NO_x emisyonlarında azalma görülmektedir. LPG yakıtı daha fazla hacim kapladığından motorun volümetrik verimi düşmekte ve yanma sonu sıcaklığına bağlı olarak NO_x emisyonları da azalmaktadır.



Şekil 4.8 Benzin ve LPG yakıtları için gaz kelebeği açıklığına bağlı olarak NO_x emisyonu değişimleri.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Günümüzde buji ile ateşlemeli motorlarda yaygın olarak benzin yakıtı kullanılmaktadır. Benzin, içten yanmalı motorlarda her ne kadar yüksek performans sağlasa da, yüksek seviyelerde kirletici egzoz emisyonları açığa çıkarmakta ve atmosfere yayılmaktadır. Ancak gaz yakıtlar, benzin yakıtına yakın seviyelerde motor performansı sağlarken, daha düşük değerlerde egzoz emisyonları açığa çıkarmaktadırlar. Bu çalışmada, hava soğutmalı, 4 zamanlı, tek silindirli buji ile ateşlemeli motorda benzin ve LPG yakıtlarının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkileri incelenmiş ve deneylerden elde edilen sonuçlar birbiri ile karşılaştırılmıştır. Deneyler Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda LPG yakıtının benzin yakıtına yakın seviyelerde motor performansı sağladığı ve daha düşük değerlerde kirletici egzoz emisyonları açığa çıkardığı görülmüştür.

LPG yakıtı, yüksek oktan sayısı ve ısı değeri ile daha yüksek sıkıştırma oranlarında da çalışabilmektedir. Bununla birlikte LPG fiyatları benzinden daha düşüktür. Araçlarda kullanılan LPG sistemlerinde, LPG yakıtı sıvı olarak depolanmakta ve gaz formuna dönüştürülerek kullanılmaktadır. Gaz olarak kullanımı, motorda hava-yakıt karışımının homojen olmasını ve egzoz emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte gaz fazında ki LPG zaten basınçlı durumda olduğundan, benzin yakıtı gibi bir yakıt pompası gerektirmemektedir.

Diğer yönden, deneyler yeni nesil enjeksiyon sistemleri ile gerçekleştirildiğinde, daha iyi bir hava-yakıt karışımı elde edilebileceğinden motor performansı ve egzoz emisyonları iyileşebilecektir. LPG yakıtı, yüksek oktan sayısına sahip olduğundan, daha yüksek sıkıştırma oranına sahip motorlarda daha verimli çalışacaktır. Bunlarla birlikte yüksek gaz keleşliği açıklıklarında regülatörden geçen LPG'nin debisi arttığından LPG'nin buharlaştırılması zorlaşmaktadır. Daha sonra yapılacak çalışmalarda motora giren LPG yakıtının yeterli sıcaklığa ulaştırılmasıyla daha iyi buharlaşma sağlanabilir.

6. KAYNAKLAR

- Altun, Ş. (2009). Hayvansal Yağlardan Biyo-Yakıt Üretimi ve Bir Dizel Motorunda Kullanılabilirliğinin Deneysel Araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Aravind, B., Kishore, V.R., Mohammad, A. (2015). Combustion Characteristics of the Effect of Hydrogen Addition on LPG-Air Mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*, **40**: 16605-16617.
- Arslan, Ö. (2008). Benzin Motorlarında Yanma Hızının Performansa Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Aydın, F. (2006). Sıralı Gaz Fazı Lpg Enjeksiyon Sisteminin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Balki, M.K. (2005). Buji Ateşlemeli Motorlarda Farklı Sıkıştırma Oranlarında LPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi. Bilim Uzmanlığı Tezi, Zonguldak Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Başoğlu, Y. (2008). Benzinli Bir Motorda Terebentin Kullanımının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Bilgin, H.Y. (2018). Yakıt Türüne Göre Motosiklet Seçimi ve Yeni Bir Tasarım. Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ceviz, M.A., Kaleli, A., Güner, E. (2015). Controlling LPG Temperature for SI Engine Applications. *Applied Thermal Engineering*, **82**: 298-305.
- Çeçen, M. (2018). Sürdürülebilir Çevre Vizyonu Açısından Türkiye'nin Enerji Politikalarında Güneş Enerjisinin Geleceği. Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Manisa.
- Çınar, C., Sekmen, Y., Akbaş, A., Balcı, M. (2001). Buji ile Ateşlemeli Motorlarda Kısmi Gaz Kelebek Açıklığında LPG Kullanımı Üzerine Deneysel Bir Çalışma. *Teknoloji*, **1**: 69-74.

- Çelik, M. (2018). Buji Ateşlemeli Motorlarda Ek Yakıt Olarak Hidrojen İlavesinin Vuruntuya Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
- Çiçek, A. (2018). Oksijen ile Zenginleştirilmiş Emme Havaasının LPG Yakıtlı Buji Ateşlemeli Bir Motorun Performans ve Egzoz Emisyonları Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- De Souza, G.R., Pellegrini, C.D.C., Ferreira, S.L., Pau, F.S., Armas, O. (2019). Study of Intake Manifolds of an Internal Combustion Engine: A New Geometry Based on Experimentals Results and Numerical Simulations. *Thermal Science and Engineering Progress*, **9**: 248-258.
- Djermouni, M., Ouadha, A. (2017). Comparative Assessment of LNG and LPG in HCCI Engines. *Energy Procedia*, **139**: 254-259.
- Doğan, B., Erol, D., Yaman, H., Kodanlı, E. (2017). The effect of ethanol-gasoline blends on performance and exhaust emissions of a spark ignition engine through exergy analysis. *Applied Thermal Engineering*, **120**: 433-443.
- Duc, K.N., Duy, V.N. (2018). Study on Performance Enhancement and Emission Reduction of Used Fuel-Injected Motorcycles Using Bi-Fuel Gasoline-LPG. *Energy For Sustainable Development*, **43**: 60-67.
- Elnajjar, E., Selim, M.Y.E., Hamdan, M.O. (2013). Experimental Study of Dual Fuel Engine Performance Using Variable LPG Composition and Engine Parameters. *Energy Conversion and Management*, **76**: 32-42.
- Engin, P. (2018). Türkiye’de Enerji Yönetim Sistemi Uygulamalarının Sanayi Kuruluşları ve Sanayide Enerji Verimliliği Projeleri Açısından Etkinliklerinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- Erkoca, M.C. (2010). Alternatif Yakıt Olarak Etanol Kullanılan Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Vuruntu Sınırının Deneysel Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

- Erkuş, B. (2011). Otto Motorlarında Farklı Yakıt Tiplerinde Optimum Performanslarının Araştırılması. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Gong, C., Wei, F., Si, X., Liu, F. (2018). Effects of Injection Timing of Methanol and LPG Proportion on Cold Start Characteristics of SI Methanol Engine with LPG Enriched Port Injection Under Cycle-By-Cycle- Control. *Energy*, **144**: 54-60.
- Gürbüz, H. (2010). Tek Silindirli Buji Ateşlemeli Hidrojen Motorunda Yanma Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kart, A. (2009). LPG ile Çalışan Bir Benzin Motorund Ekserji Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Keçebaş, A., Gedik, E., Kayfeci, M. (2010). Fosil Yakıtların Kullanımından Kaynaklanan Hava Kirliliği Üzerine Jeotermal Enerji ve Doğal Gaz Kullanımının Etkisi: Afyon Örneği. *Electronic Journal of Machine Technologies*, **7**: 23-30.
- Kızıllhan, H. (2003). LPG-Hava Karıştırma (Fakirleştirme) Sistemleri. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kim, T.Y., Park, C., Oh, S., Cho, G. (2016). The Effects of Stratified Lean Combustion and Exhaust Gas Recirculation on Combustion and Emission Characteristics of an LPG Direct Injection Engine. *Energy*, **115**: 386-396.
- Kim, K., Kim, J., Oh, S., Kim, C., Lee, Y. (2017). Evaluation of Injection and Ignition Schemes for the Ultra-Lean Combustion Direct-Injection LPG Engine To Control Particulate Emissions. *Applied Energy*, **194**: 123-135.
- Koca, D.Ö. (2013). Diesel Motorlarında Motorin ve LPG Yakıtlarının Birlikte Kullanımının Deneysel Olarak Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kocagöz, S. (2009). Çift Yakıtlı (LPG-Benzin) Buji Ateşlemeli Bir Motorda Hacimsel Verimin Performans ve Emisyonlara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Korkmaz, S. (2008). Buji ile Ateşlemeli Motorda Farklı Oktanlı Yakıt Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Liang, B., Balasubramanian, S., Wang, B., Yang, A., Kennedy, D., Le, W., Legaspi, J., Southem, J. (2010). LPG Characterization and Production Quantification for Oil and Gas Reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **2**: 244-252.
- Morganti, K.J., Foong, T.M., Brear, M.J., Da Silva, G., Yang, Y., Dryer, F.L. (2013). The Research and Motor Octane Numbers of Liquefied Petroleum Gas (LPG). *Fuel*, **108**: 797-811.
- Mitukiewicz, G., Dychto, R., Leyko, J. (2015). Relationship Between LPG Fuel and Gasoline Injection Duration for Gasoline Direct Injection Engines. *Fuel*, **153**: 526-534.
- Özgören, Y.Ö., Çetinkaya, S., Sarıdemir, S., Çiçek, A., Kara, F. (2013). Predictive Modelling of Performance of a Helium Charged Stirling Engine Using and Artificial Neural Network. *Energy Conversion and management*, **67**: 357-368.
- Sayın, C., Çanakçı, M., Kılıçaslan, İ. (2005). Benzinli Bir Motorda Benzin+LPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **21**: 117-127.
- Setiyo, M., Soeparman, S., Hamidi, N., Wahyudi, S. (2017). Cooling Effect Characteristics of A ½ Cycle Refrigeration System on An LPG Fuel System. *International Journal of Refrigeration*, **82**: 227-237.
- Sulaiman, M.Y., Ayob, M.R., Meran, I. (2013). Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG. *Procedia Engineering*, **53**: 579-585.
- Suyabodha, A. (2017). Comparison the Rate of Energy Consumption Between Gasoline95 and LPG in Spark Ignition Engine Under Real Driving Conditions. *Energy Procedia*, **118**: 164-171.
- Szpica, D. (2018). Validation of indirect methods used in the operational assessment of LPG vapor phase pulse injectors. *Measurement*, **118**: 253-261.

- Szpica, D. (2016). The influence of selected adjustment parameters on the operation of LPG vapor phase pulse injectors. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **34**: 1127-1136.
- Topgöl, T. (2006). Buji ile Ateşlemeli Motorlarda Etil Alkol-Benzin Karışımı Kullanımında Optimum Çalışma Parametrelerinin Araştırılması. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet KUNT
Doğum Yeri ve Tarihi : Merkez/Mersin 01.01.1995
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0 539 209 21 12/mehmet5164@hotmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : MTSO Anadolu Lisesi (2009-2013)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi,
Otomotiv Mühendisliği (2013-2017)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü,
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı (2017-2019)

Yayınları (SCI ve diğer):

Talaş Ş., Kunt M., Çakmakkaya M., “Tig Welding of Aliminium Engine Block Alloy With Chancing Heat Treatment Temperature” 5.Uluslararası Kaynak Teknolojileri Konferansı ve Sergisi, 21, Sarejevo, 26-28 Eylül 2018.

Çengelci E., Bayrakçeken H., Şimşir E., Kunt M., “Farklı Motor Türlerinin Taşıt İç Gürültüsüne Etkisi”, 1. International Engineering and Technology Symposium, 120-123, Batman, 3-5 Mayıs 2015.

Mutlu İ., Bayrakçeken H., Yavuz İ., Çengelci E., Kunt M., “Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Sera Gazı Emisyonları ve Önleme Yöntemleri”, 14. International Combustion Sysmposium, Karabük Üniversitesi, 240-244, Karabük, 25-27 Nisan 2018.

Mutlu İ., Bayrakçeken H., Yavuz İ., Çengelci E., Kunt M., “Türkiye’de Doğalgazın Otomotiv Yakıtı Olarak Kullanımı ve Çin Örneği”, 14. International Combustion Sysmposium, Karabük Üniversitesi, 780-783, Karabük, 25-27 Nisan 2018.

Mutlu İ., Yavuz İ., Kunt M., Akbulut F., Koca M., “Fren Balatalarında Dolgu Maddesi Olarak Kullanılan Perlitin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, 1. International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Karabük Üniversitesi, 341-344, Karabük, 22-24 Mart 2018.

Talaş Ş., Mutlu İ., Kunt M., “Kıvılcım Biriktirme Yöntemi ile İçten Yanmalı Motor Gövde Alaşımının Isıl Bariyer Amaçla Kaplanması ve Karakterizasyonu”, 1. International Symposium on Light Alloys and Composite Materials, Karabük Üniversitesi, 385, Karabük, 22-24 Mart 2018.

Şimşek M., Mutlu İ., Çengelci E., Yavuz İ., Kunt M., “Peltier Modül ile Taşıt Klima Tasarımı”, 9. International Automotive Technologies Congress, 1823, Bursa, 7-8 Mayıs 2018.

Mutlu İ., Türkbay T., Çengelci E., Kunt M., “Otomobil Klima Sisteminin Farklı Devirlere Bağlı Olarak Soğutma Performansının Analizi”, 9. International Automotive Technologies Congress, 1824, Bursa, 7-8 Mayıs 2018.

Çakmakkaya M., Kunt M., “Aks Köprügünün Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması”, 4th International Scientific Research Congress, 221-228, Yalova, 14-17 Şubat 2019.