



**ATKINSON ÇEVİRİMİNE GÖRE ÇALIŞAN BİR MOTORDA LPG
KULLANIMININ PERFORMANSA VE EMİSYONLARA
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Fatih Çağatay GÖK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2020

Fatih Çağatay GÖK tarafından hazırlanan “ATKİNSON ÇEVİRİMİNE GÖRE ÇALIŞAN BİR MOTORDA LPG KULLANIMININ PERFORMANSA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Can ÇINAR

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Melih OKUR

Otomotiv Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erol GÜLTEKİN

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, THK Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 17/12/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Fatih Çağatay GÖK

17 / 12 / 2020

ATKINSON ÇEVİRİMİNE GÖRE ÇALIŞAN BİR MOTORDA LPG KULLANIMININ PERFORMANSA VE EMİSYONLARA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih Çağatay GÖK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2020

ÖZET

Bu çalışmada, Otto çevrimine göre çalışan, tek silindirli, dört zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motordan dönüştürülmüş Atkinson çevrimli motorda, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) kullanımının performansa ve egzoz emisyonlarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler, motorun maksimum tork devri olan 2600 rpm hızda, gaz keleşinin tam açık pozisyonunda ve 6 farklı hava fazlalık katsayısında ($\lambda=0,8-1,3$ aralığında) gerçekleştirilmiştir. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak, tork, güç, özgül yakıt tüketimi, termik verim, hidrokarbon (HC), karbon monoksit (CO) ve azot oksit (NO_x) emisyonlarının değişimi incelenmiştir. LPG kullanımı sonucu, benzine kıyasla %40'a varan emisyon değerlerinde iyileşme, %2 termik verimde artış ve özgül yakıt tüketim değerinde %8 iyileşme olduğu görölmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek tork ve gücün $\lambda=0,9$ oranında 17,025 Nm ve 4,64 kW olarak elde edildiği görölmektedir. En düşük özgül yakıt tüketimi ve en yüksek termik verim $\lambda=1,2$ için sırasıyla 270,46 g/kWh ve %30,07 olarak elde edilmiştir. Karışım oranının fakirleşmesine bağlı olarak HC ve CO emisyonları iyileşmiştir.

Bilim Kodu : 93003

Anahtar Kelimeler : Atkinson çevrimi, motor performansı, egzoz emisyonları,
sıvılaştırılmış petrol gazı

Sayfa Adedi : 69

Danışman : Prof. Dr. Can ÇINAR

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LPG USAGE ON PERFORMANCE AND EMISSIONS IN AN ATKINSON CYCLE ENGINE

(M.Sc. Thesis)

Fatih Çağatay GÖK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2020

ABSTRACT

In this study, the effects of the use of liquefied petroleum gas (LPG) on the engine performance and exhaust emissions were investigated experimentally in an Atkinson cycle engine converted from a single-cylinder, four-stroke, spark-ignition (Otto) engine. The experiments were carried out at the maximum torque speed of the engine (2600 rpm) at 6 different excess air coefficients ($\lambda=0.8-1.3$) and full open throttle. In the experiments, the variation of torque, power, specific fuel consumption, thermal efficiency, hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) emissions were investigated depending on different lambda values. As a result of using LPG in the same engine, it has been observed that there is an improvement in emission values up to 40% compared to gasoline, an increase in thermal efficiency of 2% and an 8% improvement in specific fuel consumption. According to the experimental results, it was obtained that the maximum torque and output power were obtained as 17.025 Nm and 4.64 kW at $\lambda=0.9$ ratio. The minimum specific fuel consumption and the maximum thermal efficiency were obtained as 270.46 g/kWh and 30.07% at $\lambda=1.2$ ratio. HC and CO emissions were decreased depending on the impurities of the mixture.

Science Code : 93003

Key Words : Atkinson cycle, engine performance, exhaust emissions, liquified petroleum gas

Page Number : 69

Supervisor : Prof. Dr. Can ÇINAR

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında, bilgi, yetenek ve tecrübelerini eksik etmeyen değerli danışman Hocam Prof. Dr. Can ÇINAR'a, deneylerdeki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Serdar HALİS'e ve Mehmet KUNT'a, iş hayatım ile beraber bu süreci devam ettirmeme yardımcı olan Pİ Makine Ar-Ge Merkezi çalışanlarına, ekipman ve test laboratuvarı imkanlarını sunan Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü'ne ve eğitim öğretim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyip, yanımda olan değerli aileme sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTOR ÇEVİRİMLERİ.....	5
2.1. Otto Çevrimi	5
2.2. Atkinson Çevrimi.....	8
2.2.1. Atkinson çevriminin tarihçesi	8
2.2.2. Krank-Biyel mekanizması değişikliği ile Atkinson çevrimi eldesi	9
2.2.3. Değişken supap zamanlaması metodu ile Atkinson çevrimi eldesi	10
2.3. İdeal Atkinson Çevrimi.....	13
2.4. Otto Çevrimi ile Atkinson Çevriminin Kıyaslanması.....	17
3. LPG YAKITI VE ÖZELLİKLERİ	19
3.1. LPG Yakıtının Teorik Yanma Denklemleri.....	24
4. LİTERATÜR ÖZETLERİ.....	27
5. MATERYAL METOD	41
5.1. Deney Motoru ve Test Düzenneği	42
5.2. Egzoz Gaz Analizörü	46
5.3. Hassas Terazî	47

	Sayfa
5.4. Yapılan Ölçümler.....	48
5.4.1. Motor Torku.....	48
5.4.2. Efektif motor gücü	49
5.4.3. Özgül Yakıt Tüketimi	50
5.4.4. Termik Verim	50
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	51
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	69

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Ülkelere göre LPG'nin propan ve bütan oranları	19
Çizelge 3.2. Propan, bütan ve benzinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	20
Çizelge 3.3. Benzin ve LPG yakıtı özellikleri	23
Çizelge 4.1. Farklı sıkıştırma oranları için supap kapanma zamanı stratejileri	29
Çizelge 4.2. Motor özellikleri ve farklı çalışma durumları.....	37
Çizelge 5.1. Deney motorunun teknik özellikleri	43
Çizelge 5.2. Gaz akış kontrol vanasının teknik özellikleri	45
Çizelge 5.3. Bosch BEA350 egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri	46

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Gerçek Otto ve ideal Otto çevrimlerinin karşılaştırmalı P-V diyagramları.....	6
Şekil 2.2. İdeal Otto çevrimi basınç - hacim değişim grafiği	7
Şekil 2.3. James Atkinson tarafından tasarlanan motora ait kesit görüntü	8
Şekil 2.4. Geleneksel Atkinson çevriminin zamanları.....	9
Şekil 2.5. Atkinson çevriminin Otto çevrimden farkı	11
Şekil 2.6. Otto çevrimi gerçek P-V diyagramı.....	12
Şekil 2.7. LIRC metodu uygulanmış motora ait supap zamanlaması	12
Şekil 2.8. Atkinson ve Otto çevrimi P-V diyagramı mukayesesi	13
Şekil 2.9. Atkinson çevrimine ait P-V diyagramı	14
Şekil 2.10. Otto ve Atkinson çevrimi P-V değişim diyagramı	17
Şekil 4.1. Farklı emme supabı hareket modları	28
Şekil 4.2. Özgül yakıt tüketimi değerleri	31
Şekil 4.3. Analizi gerçekleştirilen piston tasarımları	33
Şekil 4.4. İmalatı gerçekleştirilen piston tasarımları	33
Şekil 4.5. CNG yakıtının motor torkuna etkisi	36
Şekil 4.6. CO emisyonlarının motor devrine bağlı değişimi	38
Şekil 4.7. Motor devrine bağlı olarak termik verimdeki değişim	39
Şekil 5.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü	41
Şekil 6.1. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak tork değişimi.....	51
Şekil 6.2. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak motor gücü değişimi.....	52
Şekil 6.3. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak ÖYT ve termik verim değişimi.....	55
Şekil 6.4. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO emisyonlarının değişimi.....	56
Şekil 6.5. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi.....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NO _x emisyonlarının değişimi.....	60
Şekil 6.7. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığı değişimi.....	61

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. Motor test dinamometresi	42
Resim 5.2. LPG kiti ve motor bağlantısı.....	46
Resim 5.3. DC Dinamometre.....	44
Resim 5.4. Gaz akış kontrol vanası.....	45
Resim 5.5. Test ünitesi gösterge paneli	46
Resim 5.6. Bosch BEA350 egzoz gaz analizörü.....	47
Resim 5.7. Hassas terazinin ölçüleri	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
B	Yakıt tüketimi, g/h
be	Özgül yakıt tüketimi, g/kWh
C_p	Sabit basınçta ısı kapasitesi, kJ/kgK
C_v	Sabit hacimde ısı kapasitesi, kJ/kgK
D	Silindir çapı, m
F	Kuvvet, N
h	Supap kalkma miktarı, m
l	Moment kol uzunluğu, m
L_k	Kurs boyu, m
M	Tork, Nm
n	Devir, rpm
P	Basınç, bar
P_e	Efektif motor gücü, kW
r_v	Sıkıştırma oranı
r_r	Ön sıkıştırma oranı
T	Sıcaklık, K
u	İç enerji, kJ/kg
V_k	Kurs hacmi, m ³
Q_{gtr}	Sisteme giren ısı, kJ
$Q_{çık}$	Sistemden atılan ısı, kJ
W_{net}	Net iş, kJ
W_{gir}	İş girdisi, kJ
$W_{çık}$	İş çıktısı, kJ
η_t	Termik Verim

Simgeler λ **Açıklamalar**

Lambda

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternatif akım

AÖN

Alt ölü nokta

BSFC

Fren özgül yakıt tüketimi

CO

Karbonmonoksit

CO₂

Karbondioksit

CNG

Sıkıştırılmış doğal gaz

DC

Doğru akım

GDI

Doğrudan benzin enjeksiyonu

HC

Hidrokarbon

HEV

Hibrit elektrikli taşıt

HFK

Hava fazlalık katsayısı

HCCI

Homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşleme

IMEP

İndike ortalama efektif basınç

KMA

Krank mili açısı

LPG

Sıvılaştırılmış petrol gazı

LIVC

Emme supabının geç kapatılması

MON

Motor oktan sayısı

NO_x

Azot oksit

OHC

Üstten eksantrikli

ÖYT

Özgül yakıt tüketimi

PPM

Milyonda bir madde

Pb(C₂H₅)

Kurşuntetraetil

Kısaltmalar**Açıklamalar****RON**

Araştırma oktan sayısı

SI

Buji ile ateşleme

TÜPRAŞ

Türkiye Petrol Rafinerileri Anonim Şirketi

ÜÖN

Üst ölü nokta

VCR

Değişken sıkıştırma oranı

VVA

Değişken supap hareketi

1. GİRİŞ

Günümüzde, içten yanmalı motorların geliştirilmesi, performansının iyileştirilmesi, yakıt tüketiminin ve atmosfere salınımı yapılan zararlı gazların azaltılmasına yönelik birçok araştırma konusu üzerinde çalışmalar yapılmaktadır [1]. Mevcut içten yanmalı motorların geliştirilmesi noktasında yapılan çalışmaların başında, değişken supap zamanlaması sistemleri, yakıt püskürtme sistemlerinde yapılan optimizasyonlar ve alternatif yanma modları gelmektedir.

Fosil türevi yakıtların mevcut rezervinde meydana gelen hızlı azalma ve enerji gereksiniminde olan artış, içten yanmalı motorlarda kullanılabilecek alternatif yakıtların geliştirilmesi veya türetilmesi konularında çalışmalar yapılmasını zorunlu unsurlar haline getirmiştir [2]. İçten yanmalı motorlarda, benzin ve dizel yakıtlarına benzer özellikte olan ve alternatif olarak verimli bir şekilde kullanılabileceği öngörülen yakıtlardan üzerinde en yoğun çalışmalar yürütülenler; bizodizeller, sıkıştırılmış doğalgaz (CNG), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), alkol bazlı yakıtlar ve hidrojenidir [1].

Alternatif yakıt arayışının yanı sıra, elektrikli ve hibrit elektrikli taşıtların farklı sistemlerle entegre olarak çalıştırılması da, üzerinde en çok önem verilen konulardandır. Elektrikli taşıtların, emisyon değerlerinin minimum seviyelerde olması, yüksek verim ve performans sağlamaları ve sessiz olmaları gibi bir çok olumlu yanı bulunmaktadır. Ancak gelinen son noktada bile henüz elektrikli taşıtların menzil ve enerji problemi tam olarak çözülememiş olup, geliştirilme aşamasındadır.

Mevcut teknoloji ve yakıt rezervleri göz önünde bulundurulduğunda, fosil türevi yakıtlara olan bağımlılığın tamamen bitirilemeyecek olması ve artan taşıt miktarı sebebi ile içten yanmalı motorlarda iyileştirmeler yapılması gereklidir. Ayrıca, hibrit elektrikli taşıtların kullanılması noktasına gelinse dahi, içten yanmalı motorlara olan ihtiyaç devam edecektir.

Klasik Otto çevrimine göre çalışan buji ile ateşlemeli, dört zamanlı bir motorda, krank milinin 720° dönme hareketi boyunca güç kaybının yaşandığı birçok aralık bulunmaktadır ve bu kayıplardan en büyük payı, silindir içerisine alınan yakıt/hava karışımının sıkıştırılması aşaması oluşturmaktadır.

Yanma verimliliğinin artırılması ve sıkıştırma için harcanan enerjinin azaltılması için değişken supap zamanlaması sistemleri ve bu sistemlerin kontrol mekanizmasının oluşması ile özellikle hibrit elektrikli taşıtlarda efektif olarak kullanılan Atkinson çevrimi öne çıkmaktadır [3]. Atkinson ve Miller gibi alternatif çevrimlerin kullanılması ile daha optimize edilmiş, emisyon değerleri iyileştirilmiş, verimli ve yüksek performanslı bir içten yanmalı motor oluşturulması hedeflenmektedir [4].

Atkinson çevriminde, emme supabı kapanma zamanı, Otto çevrimli bir motora göre geciktirilmiştir. Dolayısıyla etkin sıkıştırma oranı azaltılmakta, geometrik sıkıştırma oranı ise aynı kalmaktadır. Emme supabının geç kapatılması (LIVC) yöntemi ile uygulanan Atkinson çevriminde, emme supabının sıkıştırma zamanı başlangıcında Otto çevrimine göre daha geç kapatılmasından dolayı, emme supabı daha uzun süre açık kalmaktadır. Böylece etkin sıkıştırmanın oranı ve negatif sıkıştırma işine harcanan enerjide azalma sağlanmaktadır. Otto çevrimli bir motorla karşılaştırıldığında, Atkinson çevrimli motor, özellikle orta ve yüksek devirlerde, daha büyük bir genişleme oranı ve dolayısıyla daha yüksek bir termal verimlilik sağlamaktadır [5].

Sıkıştırma işine harcanan enerjinin azalması ile net iş ve dolayısıyla ısı veriminde artış sağlanmaktadır. Ancak sıkıştırma sonu sıcaklık ve basınç değerlerine bakıldığında, Atkinson çevrimli motorda, aynı ölçülere sahip klasik Otto çevrimli bir motordan daha düşük güç eldesi olmaktadır [4]. Bu durum James Atkinson tarafından yakıt tüketiminin azaltılmasına ve yanma verimliliğini arttırmaya yönelik geliştirilmiş olan Atkinson çevrimini, modern hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılması ile sınırlamaktadır [6]. Yeni nesil hibrit elektrikli taşıtlar, içten yanmalı motoru yüksek güç çıkışı gerektiği zamanlarda kullanırken, yüksek performans gerektiği zamanlarda ise elektrik motoru ile destekleyerek kullanmaktadır [7].

Günümüzde, Atkinson çevrim prensibi ile çalışıp, daha düşük yakıt tüketimi ve emisyon değerlerine sahip motorlar birçok hibrit elektrikli taşıtta kullanılmaktadır. Toyota Prius, Yaris, Camry, Hyundai Ioniq, Mazda Tribute, Ford Fusion, Lexus RX 450h gibi hibrit elektrikli taşıt modellerinde bulunan içten yanmalı motorlar Atkinson çevrimi prensibine göre çalışmaktadır [8].

LPG'nin kolay bulunması, taşınabilirliği, teknolojiadaki gelişmeler, ekonomik ve ekolojik limitler gibi etmenler, Türkiye'de özellikle enerji ve otomotiv sektörlerinde kullanımını hızla arttırmıştır [9]. Emisyon değerleri baz alındığında LPG, diğer fosil yakıtlara göre daha çevreci ve kısmen daha ucuz bir yakıttır [10]. LPG, benzin ile kıyaslandığında CO emisyonunda çok ciddi bir düşüş meydana getirirken, HC ve NO_x miktarlarındaki düşüş daha hafif olmaktadır. Ayrıca içerisinde kükürt ve kurşun tetra etil bulundurmaması sayesinde ağır metal salınımı yapmamaktadır [9].

LPG kullanılması ile Otto çevrimli motordan alınan aynı tork miktarında çok daha başarılı emisyon değerleri olduğu yani LPG'nin klasik benzin yakıtına nazaran daha temiz bir yakıt olduğu emisyon sonuçlarına bakılarak birçok deneysel çalışmada incelenmiştir [11,12,13]. Otto çevrimli bir motorda, hava/yakıt oranı aynı olacak biçimde LPG veya CNG yakıtları ile yapılan deneyler sonucunda, silindir içerisine alınan yakıt/hava karışımının gaz fazında olması ve sıcaklık artışından direkt olarak etkilenmesi sebebi ile volumetrik verimde düşüş oluşmaktadır. Bunun sonucunda motordan alınan tork azalmaktadır [12].

Bu çalışmada, Atkinson çevrimine dönüşümü yapılmış [8] tek silindirli, dört zamanlı, buji ile ateşlemeli bir motorda LPG yakıtı kullanılarak, hava fazlalık katsayısına bağlı olarak tork, güç, özgül yakıt tüketimi, termik verim, HC, CO ve NO_x emisyonlarının değişimi incelenmiştir. Motorun Atkinson çalışma şartlarına dönüşümü için kam mekanizmasında yapılan düzenleme ile emme supabı kapanma zamanı standart zamanlamaya göre 20° krank mili açısı geciktirilmiş ayrıca sıkıştırma oranı da 8,5'ten 9,5'e çıkarılmıştır [8].

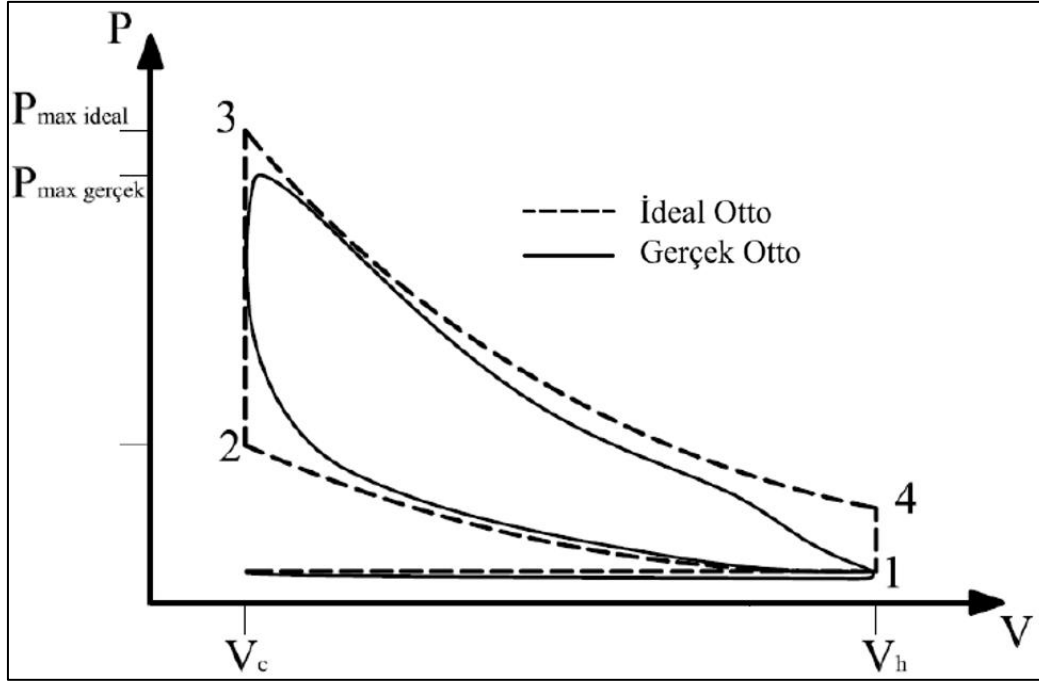
Alternatif yakıtlar arasında en dikkat çekici olanlarından LPG için, olumlu ve olumsuz yönler bulunmaktadır. Atkinson çevrimi üzerinde LPG yakıtının gösterecek olduğu performans, verim ve emisyon gibi önemli parametreler incelenerek, günümüz ve gelecekte kullanılacak taşıtlar için oluşturacağı potansiyel incelenmiştir.

2. BUJİ İLE ATEŞLEMELİ MOTOR ÇEVİRİMLERİ

İçten yanmalı motorlar genellikle silindir içerisine alınan dolgunun yanma reaksiyonunu başlatma biçimine göre sınıflandırılmaktadır. Bu açıdan bakıldığında, buji ateşlemeli ve sıkıştırma ile ateşlemeli motorlar şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlarda, Otto çevrimi ve Atkinson çevrimi günümüzde etkin olarak kullanılan yanma modlarıdır.

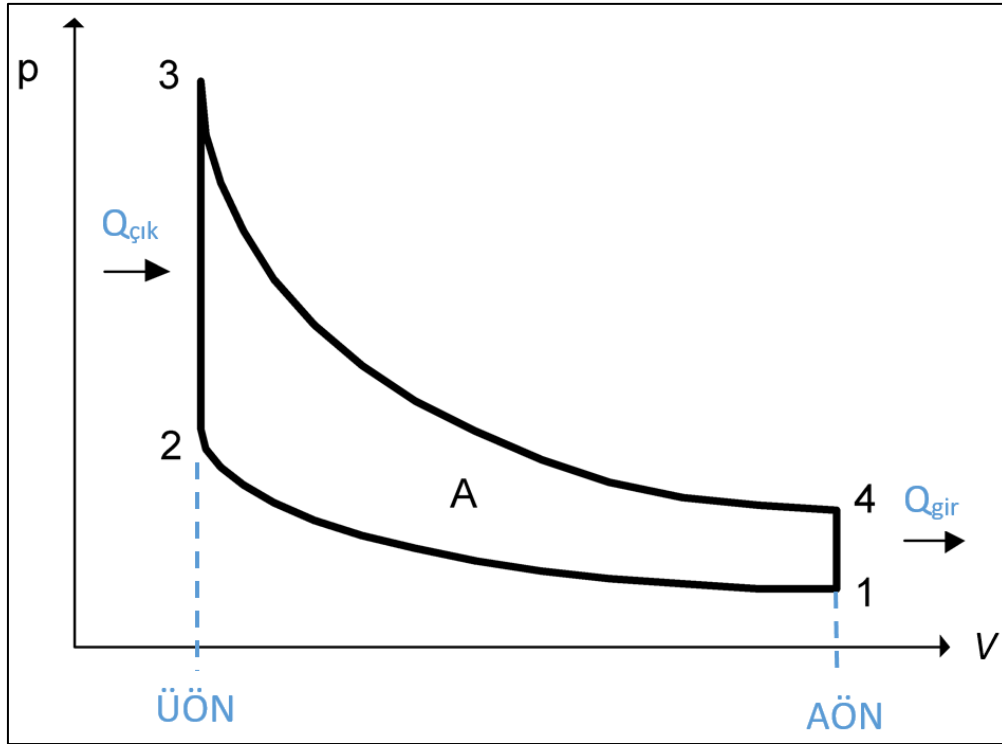
2.1. Otto Çevrimi

Buji ile ateşlemeli bir motorda, hava/yakıt oranı belirli bir düzeyde olan karışım, emme zamanında silindir içerisine alınır. Pistonun AÖN'dan ÜÖN'ya kadar olan yer değiştirmesi sonucunda, silindir içerisinde sıkışan karışım üzerine kıvılcım çakılarak ateşleme gerçekleşir. Kıvılcım oluşumu, bujinin iki elektrodu arasında meydana gelen elektrik akımı transferi ile sağlanır [14]. Yanma reaksiyonunun gerçekleşmesi ile artan basınç, pistonun AÖN'ya doğru hareket etmesini sağlar ve böylece, piston kurs boyunca hareket eder. Pistonun bu hareketi iş veya genişleme zamanı olarak adlandırılır [15]. Genişleme zamanı sonrasında, piston AÖN yakınlarında bulunurken egzoz supabı açılır ve yanmış gaz kütlesi egzoz manifoldundan süpürülerek atılır. Buji ile ateşlemeli bir motorda yük ve motor hızı, gaz keleşi açıklığına bağı olarak değışim gösterir [16]. Piston tarafından meydana gelen doğrusal hareket, krank mili üzerinde dairesel döndürme momenti oluşturarak, aktarma organlarına ve tüm hareketli elemanlara dolaylı ve doğrudan enerji kaynağı olur. İdeal Otto çevrimi ile teorik Otto çevriminin P-V diyagramları arasındaki farklılıklar Şekil 2.1'de görölmektedir.



Şekil 2.1. Gerçek Otto ve ideal Otto çevrimlerinin karşılaştırmalı P-V diyagramları

İdeal Otto çevriminde emme, sıkıştırma, genişleme ve egzoz olmak üzere dört zaman bulunmaktadır. Bunlardan sıkıştırma ve genişleme zamanları adyabatik olarak gerçekleşirken, iş ve egzoz zamanları ise sabit hacimde gerçekleşir. Sıkıştırma işlemi Şekil 2.2’de 1-2 aralığında adyabatik olarak gerçekleşir. 2-3 aralığında sabit hacimde ısı girişi ile sıcaklık ve basınç artar. Gerçek bir çevrimde bütün zamanlarda silindir iç duvarlarından bir miktar ısı kaybı meydana gelir. Ancak ideal çevrim kabulleri ile yaklaşım yapılırken bu faktörler hesap dışı bırakılır. Sisteme ısı girişinin olduğu 2-3 aralığı teorik olarak sabit hacimde gerçekleşirken, gerçek çevrimde bu süreç belli bir KMA kadar zaman gerektirmektedir [16]. Sisteme ısı girişi ve sistemden ısı çıkışı, gerçek bir çevrimde sabit hacimde gerçekleşmemesi sebebi ile daha düşük yanma sonu sıcaklıkları ve basıncı elde edilir. 3-4 aralığında pistonun ÜÖN’den AÖN’ya doğru olan hareketi ile genişleme zamanı gerçekleşirken, gerçek bir çevrimde bu sırada ısı kaybı meydana gelir. Teorik çevrimde, 4-1 aralığında sistemden ısı çıkışı sabit hacimde gerçekleşir. Gerçek çevrimde egzoz manifoldundan atılan yanma sonu ürünlerinin tamamı silindir içerisinden atılamaz ve art gazlar olarak her çevrimde silindir içerisinde bulunmaya devam ederler.



Şekil 2.2. İdeal Otto çevrimi basınç - hacim değişim diyagramı

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi sıkıştırma oranı;

$$r_v = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.1.1)$$

olarak hesaplanır. Termodinamiğin 1. yasası gereği çevrimdeki enerji denkliği;

$$(Q_{gir} - Q_{cik}) + (W_{gir} - W_{cik}) = \Delta u \text{ (kJ/kg)} \quad (2.1.2)$$

olur. 2-3 noktaları arasında sisteme giren ısı miktarı;

$$Q_{2-3} = m \cdot C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (2.1.3)$$

olur. 4-1 noktaları arasında sistemden çıkan ısı miktarı;

$$Q_{4-1} = m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (2.1.4)$$

olarak hesaplanır. Otto çevriminde elde edilen net iş miktarı;

$$W_{net} = m \cdot C_v \cdot (T_3 - T_2) - m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_1) \quad (2.1.5)$$

Çevrime ait termik verim değeri ;

$$\eta_t = \frac{C_v \cdot (T_3 - T_2) - C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \quad (2.1.6)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{C_v \cdot (T_4 - T_1)}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \quad (2.1.7)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{r_v^{k-1}} \quad (2.1.8)$$

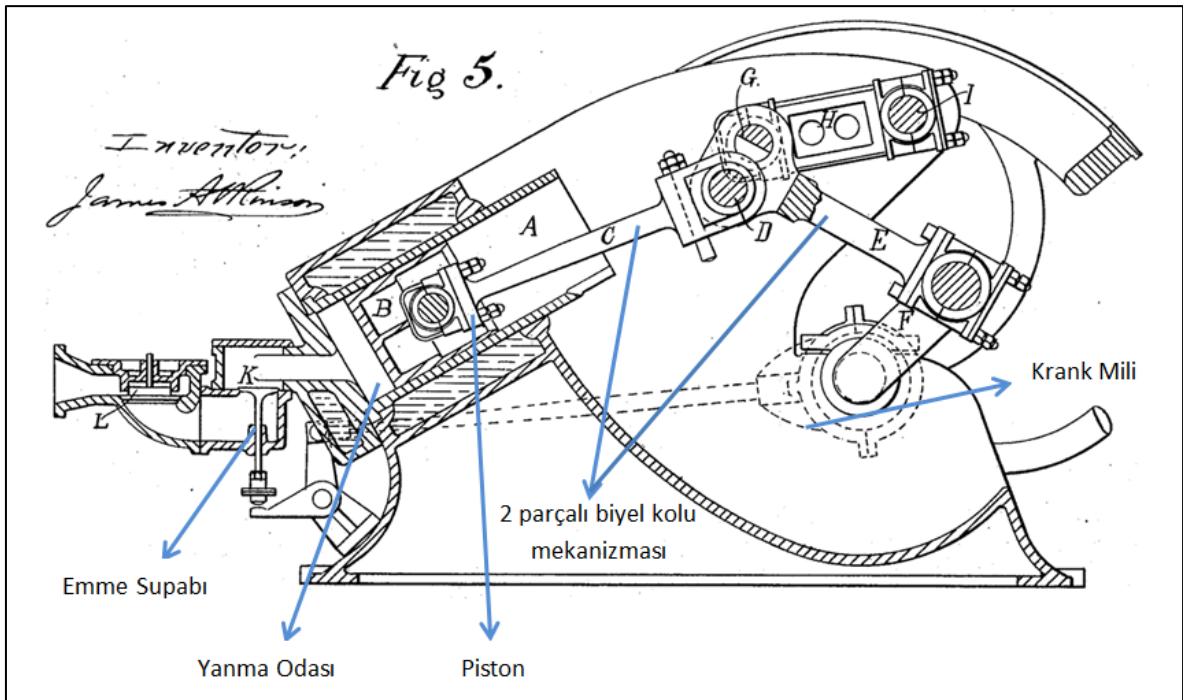
eşitliği ile hesaplanır.

2.2. Atkinson Çevrimi

Klasik Otto çevrimli motorlar ile birçok bakımdan benzerlikler barındıran Atkinson çevrimi, farklı metodlarla oluşturulabilmekle beraber, günümüzde Otto çevrimli motorlardan supap zamanlaması değişiklikleri yapılarak dönüştürülebilmektedir. Yapılan çalışmada bu metod ile elde edilmiş bir Atkinson motorunun çalışması incelenmiştir.

2.2.1. Atkinson çevriminin tarihçesi

James Atkinson tarafından ortak özellikleri, sıkıştırma kursunun genişleme kursundan daha küçük ve farklı olduğu üç alternatif motor çevrimi, 1882 yılında İngiltere’de tasarlanmış ve patentlenmiştir (Şekil 2.3) [3]. Elde edilen net iş miktarının artırılması ile aynı motordan elde edilen verim değerinin maksimize edilmesi hedeflenmiştir.

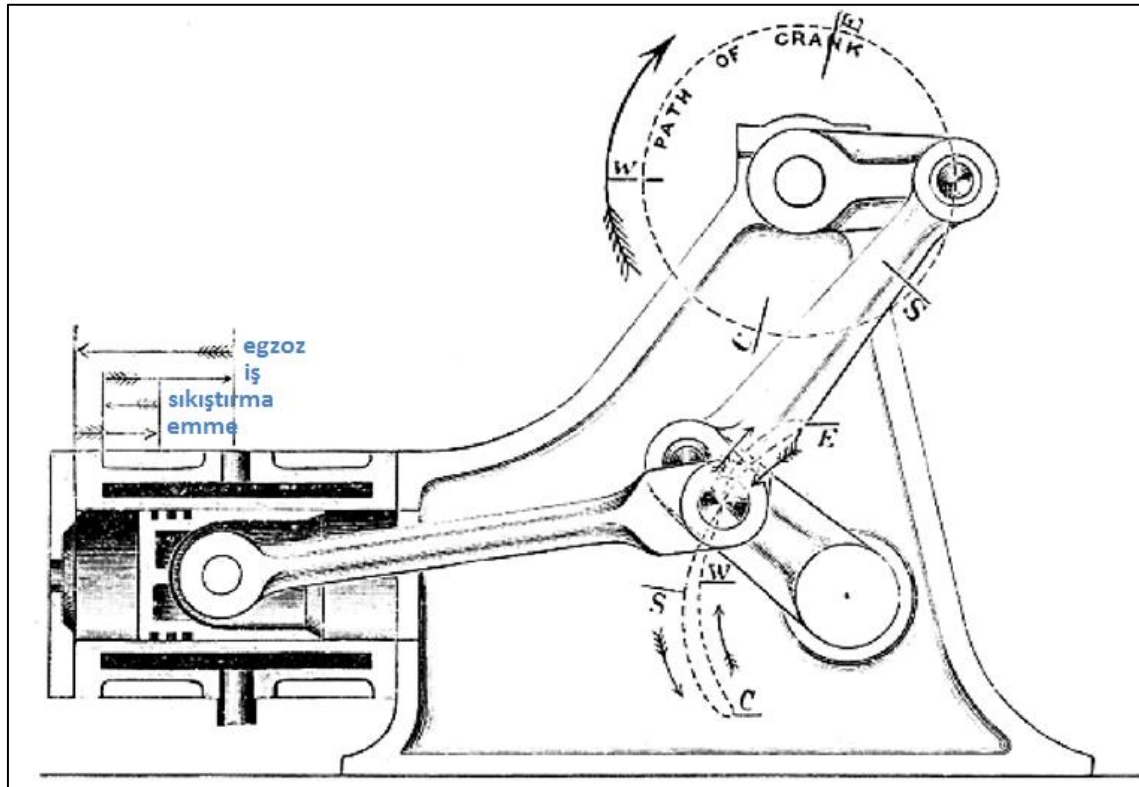


Şekil 2.3. James Atkinson tarafından tasarlanan motora ait kesit görüntü [3]

Bir petrol firması tarafından 1000 adet üretilen bu motorlar, karmaşık krank-biyel mekanizması, klasik Otto çevrimli bir motora göre daha yüksek maliyeti ve boyutlarının fazlası ile büyük olması gibi sebeplerle üretimine devam edilmemiştir [3]. Atkinson çevrimli motorlar, James Atkinson tarafından patenti alınmış geleneksel yöntemle ve son zamanlarda ise değişken supap zamanlaması tertibatıyla oluşturulabilmektedir. İki farklı yöntem ile çevrim kullanılabilmekte olup, değişken supap zamanlaması ile oluşturulan çevrim uygulamaları ile günümüzde daha sık karşılaşılmaktadır.

2.2.2. Krank-Biyel mekanizması değişikliği ile Atkinson çevrimi eldesi

1882 yılında James Atkinson tarafından patenti alınan bu sistemde, Otto çevrimli motorlardan farklı olarak, pistonun doğrusal hareketini dairesel harekete çeviren biyel kolu üzerinde köklü değişikliklere gidilmiştir. Şekil 2.4’de gösterildiği gibi, dört zaman prensibine dayanarak çalışan bu çevrimde, krank-biyel mekanizmasının en işlevsel parçalarından birisi olan biyel geometrisi değişmiş, iki parçalı ve birbirine tek mafsalsal noktasından bağlı farklı bir tasarım bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Geleneksel Atkinson çevriminin zamanları [3]

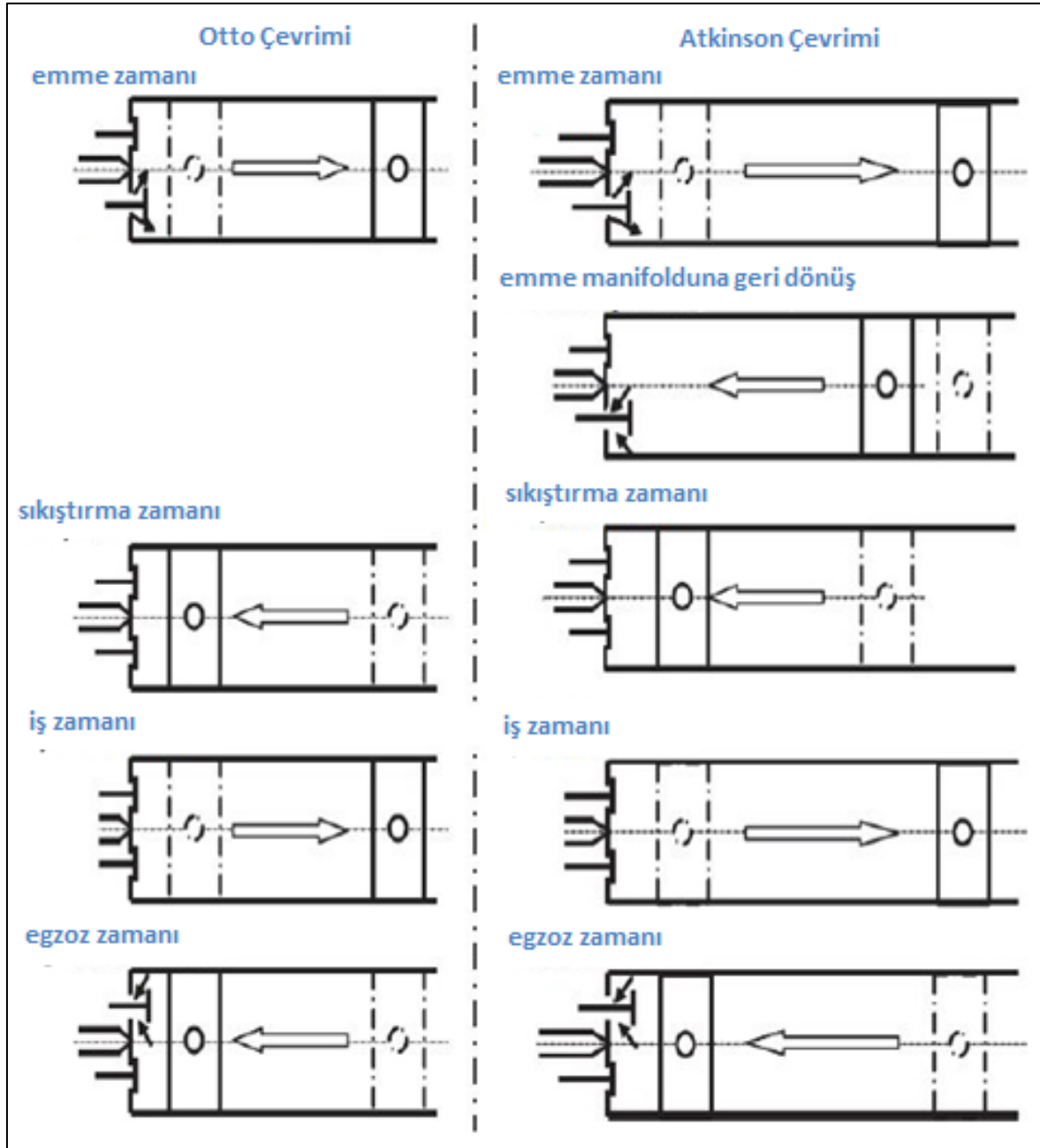
Klasik Otto çevrimli motorlardan farklı olarak, Atkinson çevriminde motorun genişleme ve sıkıştırma oranları değişkenlik göstermektedir. Şekil 2.5’de görüldüğü gibi, sıkıştırma zamanında pistonun silindir içerisindeki lineer yer değişiminin genişleme zamanındaki kurs boyundan daha az olması sayesinde termik verim artmaktadır. Genişleme kursunun daha büyük olmasının etkisi ile sıkıştırma zamanında oluşan negatif iş oranında azalma meydana gelmektedir. Sıkıştırma oranının azalması sonucu, yanma sonu sıcaklıklarda ve motor çıkış gücünde azalmalar olmaktadır.

2.2.3. Değişken supap zamanlaması metodu ile Atkinson çevrimi eldesi

Değişken supap zamanlaması, içten yanmalı motor üretici firmalar ve araştırmacılar tarafından motorun yanma, emisyon, maksimum güç, tork, yakıt tüketimi gibi önemli değerlerinin optimizasyonu amacı ile kullanılmaktadır. Emme supaplarının açık kalma süresinde ve kalkma miktarında (lift) yapılacak değişiklikler ile Atkinson çevrimi oluşturulabilmektedir. Klasik Otto çevrimli bir motor ile aynı şekilde dört zamanlı bir yanma çevrimi bulunan Atkinson çevrimli motorda, silindir içerisine alınan taze dolgunun sıkıştırılması zamanında, negatif iş miktarını azaltmak için değişken supap zamanlaması sistemleri kullanılmaktadır.

Şekil 2.5’de görüleceği gibi, emme supabı kapanma süresi geciktirilmiş (LIVC) bir motorda, sabit hacimde ısı girişi ile tersinir sıkıştırma ve genişleme zamanları aynı kalırken, sabit basınçta ısı atılması işlemi farklıdır [4]. Pompalama kayıpları ile oluşan negatif iş yükünü, çevrimin emme zamanında silindir içerisine taze hava-yakıt karışımının alınması ve bu taze dolgunun sıkıştırılması için harcanan enerji oluşturmaktadır.

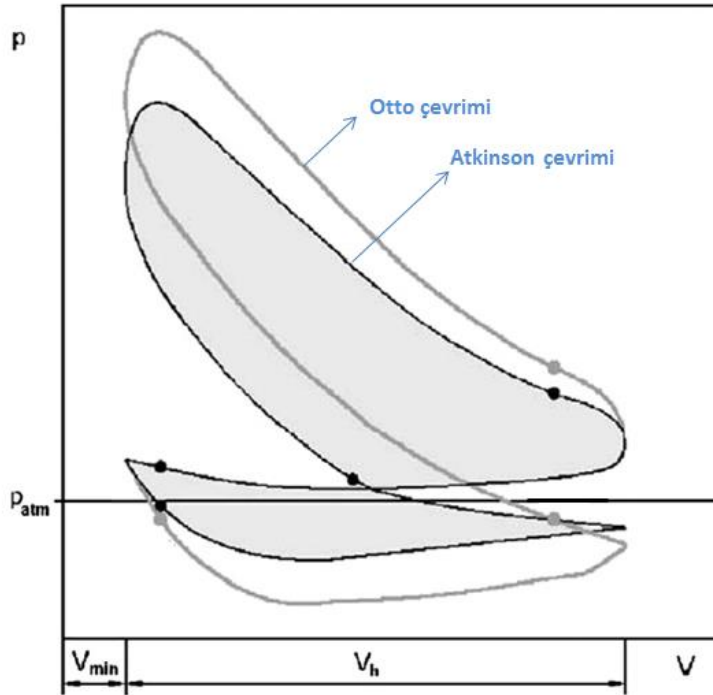
Klasik Otto çevrimli bir motorda açığa çıkan bu pompalama kayıplarının, emme supabı zamanlamasının doğru bir şekilde yapılması veya optimize edilmesi ile azaltılabildiği mümkündür (Şekil 2.6). Fakat gerçek bir çevrimde bu kayıplar asla sıfıra indirgenemez.



Şekil 2.5. Atkinson çevriminin Otto çevrimden farkı [14]

Klasik Otto çevrimli buji ile ateşlemeli bir motorda, toplam silindir hacminin yanma odası hacmine oranı, sıkıştırma oranını ifade eder. Çevrimde sıkıştırma zamanı başlangıcında emme supabının kapanması ile içeri alınan taze dolgu sıkıştırılarak, basıncı artırılır. Piston, üst ölü noktaya doğru olan hareket ettikçe, karışımın basıncı atmosferik basınçtan oldukça yüksek bir değer alır [6, 17, 18].

Geometrik olarak sıkıştırma oranı aynı kalan motorda, etkin sıkıştırma oranında düşüş meydana gelir ve bu sebeple yanma sonu sıcaklıkları ve basıncı azalır. Ayrıca Şekil 2.8’de görüldüğü gibi sıkıştırma zamanında pompalama kayıpları olarak adlandırılan, yanma odası içerisine alınan dolgunun pistonun üst ölü noktaya doğru hareketi esnasında sıkıştırılması için harcanan enerji ise doğrudan azalır.



Şekil 2.8. Atinson ve Otto çevrimi P-V diyagramı mukayesesi [6]

Atkinson çevrimli bir motorda, bujide kıvılcım çakmadan önceki basıncın aynı ölçülerdeki bir Otto çevrimli motordan daha düşük olması, vuruntu oluşturmada sıkıştırma oranının artırılmasına da olanak sağlamaktadır [6].

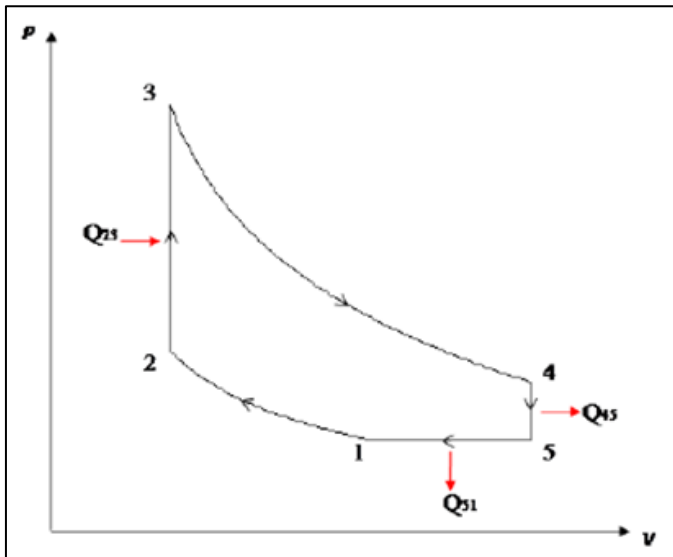
2.3. İdeal Atkinson Çevrimi

İçten yanmalı motorlarda, silindir içerisine alınan hava/yakıt karışımı veya hava, pistonun AÖN’den ÜÖN’ya doğru olan hareketiyle sıkıştırılmaktadır. Termodinamik bir çevrim olan Otto, Dizel ve Atkinson gibi çevrimlerde sistem içerisine alınan havanın özellikleri, ideal kabul edilerek, sıcaklık ve basınca bağlı olarak özgül ısılarının sabit kaldığı kabul edilir. Pistonun ÜÖN’ya doğru hareketi devam ettikçe, silindir içerisine alınan dolgunun sıcaklığı artmaya devam eder.

Sıkıştırma zamanı sonunda pistonun ÜÖN'ya yaklaşmasıyla, sıcaklığı ve basıncı artan bu ideal dolgu maddesi üzerine Otto çevrimli motorlarda buji kıvılcımı çakılarak ateşleme gerçekleşir ve alev oluşur. Silindir içerisinde meydana gelen bu kimyasal tepkime sonucu açığa çıkan ısı, sıcaklık ve basınç etkisiyle, piston ÜÖN'dan AÖN'ya doğru bir doğrusal hareket yaptırmaya zorlanır. Pistonun bu doğrusal hareketi ise dairesel bir dönme hareketine çevrilerek sistemden çıkış yapar. Böylece, yanma odası içerisinde gerçekleşen kimyasal yanma reaksiyonu, mekanik enerjiye dönüştürülerek kullanılır.

Atkinson çevrimi ve Otto çevrimi birçok noktada benzer davranışlar göstermektedir. Emme zamanında pistonun ÜÖN'dan AÖN'ya doğru olan hareketi ile hava/yakıt karışımı silindir içerisine alınır. Pistonun ÜÖN'ya doğru olan hareketiyle sıkıştırma zamanı başlar. Atkinson çevriminde emme supabı açık kalma süresi Otto çevriminden daha fazladır ve bu nedenle pistonun sıkıştırma yönünde hareketi ile bir miktar hava/yakıt karışımı emme supabından geri gönderilir. Sıkıştırma için daha az enerji harcanması sonucunda elde edilen termik verim artmaktadır [18,19,20].

Silindir içerisinde kalan yakıt/hava karışımı miktarında azalma, çevrimden daha az enerji elde edilmesine sebep olur. Atkinson çevrimini klasik Otto çevriminden ayıran en belirgin bölgelerden birisi sıkıştırma zamanında göstermiş olduğu davranıştır. Genişleme ve egzoz zamanlarında klasik Otto çevrimi gibi çalışan Atkinson çevrimi termodinamik açıdan incelendiğinde, basınç-hacim değişimi Şekil 2.9'da gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2.9. Atkinson çevrimine ait P-V diyagramı [20]

Gerçekleşen bu çevrimde;

- 1-2 noktaları arası; izantropik sıkıştırma
- 2-3 noktaları arası; adyabatik ısı girişi
- 3-4 noktaları arası; izantropik genişleme
- 4-5 noktaları arası; adyabatik ısı çıkışı [4]
- 5-1 noktaları arası; izobarik ısı çıkışı

olmaktadır [8].

2-3 noktaları arasında sisteme giren ısı miktarı;

$$Q_{2-3} = m \cdot C_v \cdot (T_3 - T_2) \quad (2.3.1)$$

4-5 ve 5-1 noktaları arasında sistemden çıkan toplam ısı miktarı;

$$Q_{4-1} = m \cdot C_p \cdot (T_5 - T_1) + m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_5) \quad (2.3.2)$$

Atkinson çevriminde elde edilen net iş miktarı;

$$W_{net} = m \cdot C_v \cdot (T_3 - T_2) - [m \cdot C_p \cdot (T_5 - T_1) + m \cdot C_v \cdot (T_4 - T_5)] \quad (2.3.3)$$

olmaktadır. Çevrime ait termik verim değeri;

$$\eta_t = \frac{C_v \cdot (T_3 - T_2) - [C_p \cdot (T_5 - T_1) + C_v \cdot (T_4 - T_5)]}{C_v \cdot (T_3 - T_2)} \quad (2.3.4)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{(T_4 - T_5) + \gamma(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (2.3.5)$$

İzantropik sıkıştırma aşamasında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} = T_1 r_e^{\gamma-1} = T_1 \left(\frac{r_g}{\sigma} \right)^{\gamma-1} \quad (2.3.6)$$

Burada etkin sıkıştırma oranı (r_e) ve geometrik sıkıştırma oranı (r_g) arasındaki katsayı σ olarak kullanılmış ve adyabatik ısı girişini veren denklem elde edilmiştir.

$$\sigma = r_g / r_e \quad (2.3.7)$$

$$m_f H_u = m c_v (T_3 - T_2) \quad (2.3.8)$$

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{m_f H_u}{m c_v T_2} = 1 + \frac{m_f H_u}{m c_v T_1 r_e^{\gamma-1}} \quad (2.3.9)$$

Hava/yakıt oranına bağıntılı olarak sisteme giren yakıtın kütlesi formulize edilmiştir.

$$\frac{m_a}{m_f} = \frac{(m - m_f)}{m_f} = \frac{H}{Y} \quad (2.3.10)$$

$$m_f = \frac{m}{1 + \frac{H}{Y}} \quad (2.3.11)$$

İdeal gaz denklemleri kullanılırsa;

$$P_1 V_1 = m R T_1 = m(\gamma - 1) c_v T_1 \quad (2.3.12)$$

$$\frac{T_3}{T_2} = 1 + \frac{m H_u}{p_1 V_1 \left(1 + \frac{H}{Y}\right)} \cdot \frac{\gamma - 1}{r_e^{\gamma-1}} = 1 + \frac{B(\gamma - 1)}{r_e^{\gamma-1}} \quad (2.3.13)$$

$$\frac{T_3}{T_1} = \left(\frac{r_g}{\sigma}\right)^{\gamma-1} + B(\gamma - 1) \quad (2.3.14)$$

$$B = \frac{m H_u}{p_1 V_1 \left(1 + \frac{H}{Y}\right)} = \frac{H_u \left(1 + \frac{H}{Y}\right)}{R T_1} \quad (2.3.15)$$

İzantropik genişleme zamanında yine ideal gaz denklemleri kullanılmış ve çeşitli bağıntılar türetilmiştir.

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{1}{r_g}\right)^{\gamma-1} \quad (2.3.16)$$

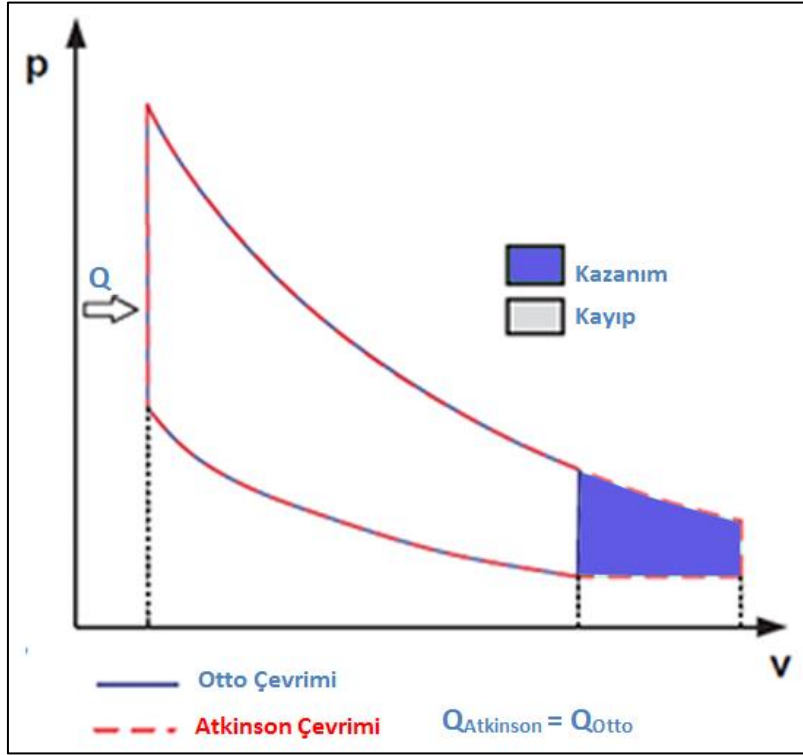
$$\frac{T_4}{T_1} = \left(\frac{1}{r_g}\right)^{\gamma-1} \left[\left(\frac{r_g}{\sigma}\right)^{\gamma-1} + B(\gamma - 1) \right] \quad (2.3.17)$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{1}{\sigma^{\gamma-1}} + \frac{B(\gamma - 1)}{\sigma^{\gamma-1} r_e^{\gamma-1}} \quad (2.3.18)$$

Egzoz stroğunda meydana gelen hal değişimleri izobarik olarak adlandırılır. 5 ve 1 noktaları arasındaki sıcaklık bağıntıları termodinamik ideal gaz yasalarına göre türetilmiştir.

2.4. Otto Çevrimi ile Atkinson Çevriminin Kıyaslanması

Şekil 2.10'da belirtilen Otto ve Atkinson termodinamik çevrimleri birçok yönden benzerlik göstermektedir. Basınç-hacim diyagramı içerisinde kalan alanın ölçüsü, net iş miktarının göstergesi olup, Otto ve Atkinson çevrimli motorlar için farklılık göstermektedir.



Şekil 2.10. Otto ve Atkinson çevrimi P-V değişim diyagramı

Geometrik sıkıştırma oranı Otto motoru ile aynı olan bir Atkinson çevrimli motorun sıkıştırma oranı ile genişleme oranı farklıdır. Sisteme giren ısı miktarları aynı kabul edilirse, Atkinson çevrimli motorun net iş alanı ve dolayısıyla termik verimi daha yüksek olacaktır.

Otto çevrimli bir motorda genişleme zamanı sonunda silindir içi basınç değerleri atmosferik basıncın üzerinde yer alırken, Atkinson çevrimli bir motor için bu basınç değeri atmosferik basınca kadar iner. Genişleme zamanında meydana gelen farklılıklar bu iki çevrim için avantajlı ve dezavantajlı tarafların oluşmasında etken rol almıştır. Geometrik sıkıştırma oranının yanı sıra etkin sıkıştırma oranının da motor performansı için önemli bir parametre olduğu bilinmektedir.

Atkinson çevrimli bir motorda, sıkıştırma ve pompalama kayıplarının oluşturduğu negatif iş miktarı daha düşüktür, böylece efektif termik verim oranı Otto çevrimli bir motora göre çok daha iyidir [3].

3. LPG YAKITI VE ÖZELLİKLERİ

LPG yakıtının ülkemizde, sıvılaştırılmış petrol gazı olarak 1970’li yılların başında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Hidrokarbon temelli bir kimyasal olan LPG, içeriğinde ana bileşen olarak propan (C_3H_{10}) ve bütan (C_4H_{10}) barındırmaktadır. Bu kimyasalların belirli oranlarda karıştırılmasıyla, ticarileşmiş halde kullanılan LPG yakıtı oluşturulmaktadır. LPG yakıtı hareket halindeki bir taşıt üzerinde kullanılması ve depolanması süreçlerinde çeşitli standartlar ve yönetmelikler ile denetlenmektedir [12]. Petrol rafine istasyonlarında ayrıışan benzin, motorin ve diğer hidrokarbon temelli yakıt türevlerinin üretimi sırasında açığa çıkan gaz fazındaki ürünlerin soğutularak basınçlı depolarda istiflenmesi ile sıvı fazında LPG elde edilir. Sıvılaştırılmış petrol gazı içerik olarak propan ve bütandan meydana gelir. Türkiye’de LPG yakıt karışımı Çizelge 3.1.’de görüldüğü gibi yaz aylarında % 30 propan ve % 70 bütandan, kış aylarında bu karışım % 50 propan ve % 50 bütandan meydana gelerek tüm hava koşulları için uygun oranlarda karışım sağlanmış olur. Özellikle soğuk iklim koşullarının hakim olduğu bölgelerde, kullanılan LPG’nin içerisindeki propan oranı arttırılarak sıvı fazdan gaz faza geçiş kolaylaştırılır.

Çizelge 3.1. Ükelere göre LPG’nin propan ve bütan oranları [10,12,19]

Ülke Adı	Propan/Bütan Oranı	
	Yaz (%)	Kış (%)
Türkiye	30/70	50/50
Almanya	propan	propan
Danimarka	30/70	70/30
İngiltere	propan	propan
Avusturya	20/80	80/20
Hollanda	30/70	70/30
İsveç	propan	50/50
İsviçre	propan	propan

Karışımında kütleli olarak büyük oranda hidrokarbon temelli parafinik yapıtaşları bulunur. Bunlar Çizalge 3.2’de görülen propan, bütan, etan, n-pentan ve izopentan gibi maddeler olup, petrol rafinasyonu esnasında açığa çıkarak, LPG içerisinde ihtiva edilir.

Renksiz, kokusuz ve havadan daha ağır bir yakıt olan LPG, basınç altında depolanırken sıvılaşmış haldedir. Özellikle depolanması noktasında, sızdırmazlığı hem basınç testi hem de gözenek testleri ile muayene edilmiş, karbonlu çelik yapıli depolarla sağlanmaktadır. Bu depolar, maksimum çalışma basıncının dört katına ve dinamik olarak değışkenlik durumlarına dayanabilecek biçimde üretilmektedir [9, 10, 12, 16].

Çizelge 3.2. Propan, bütan ve benzinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [16, 21, 22]

Özellikler	Propan	Bütan	Benzin
Kimyasal formül	C_3H_8	C_4H_{10}	$C_{6,9}H_{14,6}$
Sıvı fazda özgül ısı (kJ/kg °C)	1366	1276	-
37,8 °C’de buhar basıncı (bar)	12,1	2,6	0,5-0,9
Araştırma oktan sayısı (RON)	111	103	96-98
Motor oktan sayısı (MON)	97	89	85-87
Buharlaşma gizli ısısı (kJ/kg)	426	385	300
Buhar basıncı (200 °C, kg/cm ²)	20,18	1,2	0,49-0,81
Eşdeğerlik katsayısı	1,27	1,11	1
Parlama noktası (°C)	-105	-60	200
Alev sıcaklığı (havada, °C)	1980	2008	1977
Alt ısııl değeri (MJ/L)	23,4	26,5	32,3
Alt ısııl değeri (MJ/kg)	46,1	45,5	44,0
Kaynama sıcaklığı (°C)	-42	-0,5	30-225
Normal şartlar altındaki fiziksel hali	gaz	gaz	sıvı
Stokiyometrik H/Y oranı	15,1:1	15,0:1	16,1:1
Stokiyometrik karışımın enerjisi (kJ/m ³)	3450	3490	3580
Donma noktası (°C)	-187,8	-138,8	-

LPG, fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından bazı noktalarda benzin ve dizel yakıtına göre avantajlı konumdadır. Pozitif yönleri ve avantajlı olduğu noktaları aşağıda kısaca belirtilmiştir.

- Aynı sıcaklıktaki bir benzin yakıtına göre çok daha yüksek buhar basıncı ve buharlaşmış gaz miktarı içeren LPG, hava ile daha homojenize bir karışım oluşturur [19].
- LPG yakıtının araştırma oktan sayısı ve motor oktan sayısı bakımından benzinden daha üstün olması sebebiyle, daha yüksek sıkıştırma oranlarında motorun çalıştırılmasına olanak tanır [21].
- Dünyada ve ülkemizde benzine oranla daha ekonomik bir yakıttır. Benzine göre %40, motorine göre ise %35 daha ucuzdur. (16.12.2020 tarihli Shell Ankara istasyonu pompa satış tavan fiyatı)
- Kütlesel olarak alt ısı değeri benzinden daha yüksek olup, kalorifik özellikler bakımından daha iyidir [19, 21].
- LPG yakıtı içeriğinde, kurşunsuz benzine oktan sayısını artırmak için katılan kurşun tetra etil bulundurmamaktadır. Bu durum LPG yakıtının çevreye salınan emisyonlarının azalmasını sağlar. Yakıt içerisinde kükürt olmaması nedeniyle, kükürt oksit emisyonu söz konusu değildir. Ayrıca dizel motorlarında görülen is ve partikül emisyonlarda oluşmaz. LPG, benzine oranla daha yüksek oktan sayısına sahip olması nedeniyle motorlarda sıkıştırma oranı arttırılarak motor verimi ve gücünü arttırmak mümkündür [12, 16].
- LPG yakıtı diğer yakıtlara kıyasla daha çevreci ve ekonomiktir. Egzoz emisyon değerleri bakımından yapılan birçok araştırmada yaklaşık olarak NO_x emisyonlarında %30, CO_2 emisyonlarında %12 ve HC emisyonlarında %20 azalma meydana geldiği vurgulanmaktadır. Emisyon değerlerindeki bu iyileşme oranları, motorun LPG yakıtı ile uyumuna bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir [9, 10, 12].
- Yanma odası içerisine alınan LPG'nin tamamen gaz fazında olması sebebi ile motor yağında incelme meydana gelmez, dolayısı ile motorun ömrünü uzatır [12, 19].

LPG yakıtının olumsuz yönleri aşağıda kısaca belirtilmiştir;

- Yanma odası içerisine alınan LPG'nin tamamen gaz fazında girmesinden dolayı, Otto çevrimli motorlarda aynı silindir hacmi için benzine kıyasla daha düşük volümetrik verime sahiptir. LPG dönüşüm sistemine bağlı olarak güç kaybı %2,5 civarında olmaktadır [19].
- Basınçlandırılarak depolanması ve tanklarda taşınmasından kaynaklı, hareket halindeki araçlarda kullanımında çeşitli zorluklar oluşturmaktadır.
- Araştırma oktan sayısının daha düşük olması sebebiyle sıkıştırma oranı daha yüksek motorlarda da kullanılabilen LPG, yüksek yanma sonu sıcaklıkları etkisi ile NO_x emisyonunu arttırıcı bir etki oluşturur [12].
- LPG benzine oranla daha yüksek oktan sayısına sahip olması nedeniyle yüksek sıkıştırma oranlı motorlarda kullanıldığında motorun NO_x emisyonunda % 15 oranında bir artış söz konusudur [21].
- Basınçlı halde depolanan ve taşınan LPG yakıtı, kritik bir sıcaklık değeri ve üzerinde patlamaya sebebiyet verir [22].
- Klasik Otto çevrimli bir benzinli motorda kullanılması için, LPG gaz dönüşüm sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu ekstra yapım ve montaj maliyetini doğurmaktadır.

Yapılan literatür araştırmaları ile klasik Otto çevrimine göre çalışan bir motorda, LPG yakıtının kullanılmasının motor performansı ve emisyon değerlerindeki değişimleri analiz edilmiştir. LPG yakıtı, yanma odası içerisine hava ile karıştırılarak gaz fazında bir dolgu malzemesi olarak giriş yapar. Bu nedenle, kullanıldığı motorda hacimsel verimin düşmesine ve dolayısı ile motor gücünde azalmaya sebep olur. Bu durumun önlenmesi için LPG yakıtının kütleli olarak daha fazla gönderilmesi gereklidir.

Aynı sınır koşullarında ve aynı geometrik sıkıştırma oranına sahip bir motordan, Çizelge 3.3'de görüldüğü gibi kütleli olarak daha yüksek enerjiye sahip olsa da, LPG kullanılarak aynı güç çıkışının elde edilmesi için % 10 kadar daha fazla miktarda gönderilmesi gerekmektedir.

Çizelge 3.3. Benzin ve LPG yakıtı özellikleri [12, 23]

Özellikler	Benzin	LPG
Kimyasal formülü	$C_{6,9} H_{14,6}$	$C_{3,7} H_{9,4}$
Yoğunluk, 15 C'de, kg/L	0,738	0,508
Maksimum yanma hızı, m/s	0,35	0,4
Araştırma oktan sayısı	91	110
Yakıtın ısı değeri, kJ/kg	43932	45980
Kütleli stokiometrik H/Y oranı	0,0685	0,0638

Ölçüsel ve yapısal özellikleri aynı olan benzinli Otto motor ve LPG ile çalışan Otto motordan aynı güç eldesi için;

$$\dot{Q}_{ben} = \dot{Q}_{LPG} \quad (3.1)$$

önerilebilir. Enerji dönüşümü açısından bu reaksiyonlar incelenecek olursa;

$$\dot{Q} = \dot{m}Hu \quad (3.2)$$

olduğu biliniyorsa;

$$[\dot{m}Hu]_{benzin} = [\dot{m}Hu]_{LPG} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{benzin} \\ = \dot{m}_{LPG} \frac{H_{U,LPG}}{H_{U,benzin}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

olur. Alt ısı değeri girilip, denkleştirmeler sağlanırsa, yakıtların kütleli debileri arasında bir bağıntı elde edilir.

$$\dot{m}_{benzin} = 1,03 \dot{m}_{LPG} \quad (3.5)$$

bağıntısı çıkarılır [23]. Emme manifoldu girişinde oluşan vakum etkisi hem benzinli hem de LPG yakıtın kullanıldığı durumlarda aynı olacağı için, ventüri boğazından akışkanların geçiş hızı da eşit olacaktır [16].

$$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \quad (3.6)$$

$$\dot{V} = \rho \frac{\pi D^2}{4} v \quad (3.7)$$

$$\dot{m} = \rho \frac{\pi D^2}{4} v \quad (3.8)$$

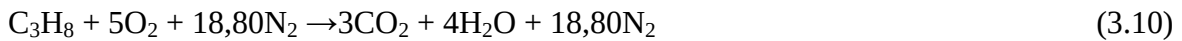
Buradan LPG ventüri çapını veren denklem, eşitlikler sağlandıktan sonra şu şekilde elde edilmiştir.

$$D_{LPG} = \sqrt{0,97 \frac{\rho_{ben}}{\rho_{LPG}} \cdot D_{benzin}} \quad (3.9)$$

3.1. LPG Yakıtının Teorik Yanma Denklemleri

Bir yanma reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için yanıcı madde, ısı ve oksijene ihtiyaç vardır. İçten yanmalı motorlarda meydana gelen yanma esnasında, atmosferik hava içerisinde bulunan ve hacimsel olarak % 21 yer kapsayan oksijen kullanılmaktadır. Teorik açıdan bir yanma denklemi tam yanma eşitliğinde gerçekleşebilirken, gerçek koşullar altında daha verimsiz bir yanma meydana gelir. Türkiye sınırları içerisinde yaz aylarında % 30 propan ve % 70 bütandan meydana gelen LPG'yi kullanan motora ait kimyasal tam yanma reaksiyonu şöyledir,

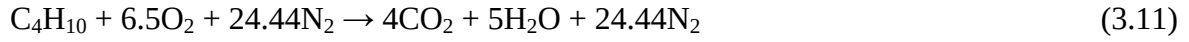
Teorik hava ile propanın tam yanma eşitliği;



Tepkimede kütleli H/Y oranı ;

$$\frac{H}{Y} = \frac{(5 \times 32) + (18,8 \times 28)}{(3 \times 12) + (8 \times 1)} = \frac{15,6}{1}$$

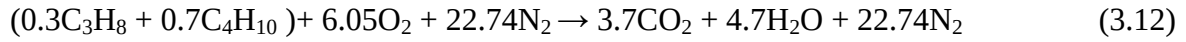
Teorik hava ile bütanın tam yanma eşitliği;



Tepkimede kütleli H/Y oranı;

$$\frac{\text{H}}{\text{Y}} = \frac{(6.5 \times 32) + (24.44 \times 28)}{(4 \times 12) + (10 \times 1)} = \frac{15.38}{1}$$

Türkiye sınırları içerisinde yazın kullanılan ve % 30 propan ile % 70 bütandan meydana gelen LPG yakıtının yanma denklemi;



Kütleli H/Y oranı;

$$\frac{\text{H}}{\text{Y}} = \frac{(6.05 \times 32) + (22.74 \times 28)}{(53.8)} = \frac{15.43}{1}$$

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada kullanılan LPG yakıtı, yaz ayları için içeriğindeki propan/bütan oranı ayarlanmış yakıt olup, kütleli olarak hava/yakıt oranı tespit edilmiştir.

4. LİTERATÜR ÖZETLERİ

Manivennan (2011), buji ile ateşlemeli, dört zamanlı, tek silindirli, aşırı genişlemeli ve fakir karışımla çalışan bir motora ait performans ve emisyon değerlerindeki değişimleri sayısal analizlerle ve deneysel metotlarla incelemiştir. Silindir içi sürtünmenin ve ısı transfer miktarının, yanma sonu açığa çıkan HC ve NO_x emisyonlarına etkileri araştırılmıştır. Uzatılmış genişleme etkisi oluşumu için, genişleme oranı sıkıştırma oranının 1,5 kat fazlası olarak alınmış bir motorun (LIVC), klasik Otto çevrimli, fakir karışimli, buji ile ateşlemeli motordan daha yüksek performans ve daha az emisyon oluşturduğu gözlenmiştir. Termik verimde % 17,95, yakıt tüketiminde % 16,63 iyileşme, NO_x emisyonlarında % 48,27 ve HC emisyonunda % 48,4 azalma olduğu görülmüştür [17].

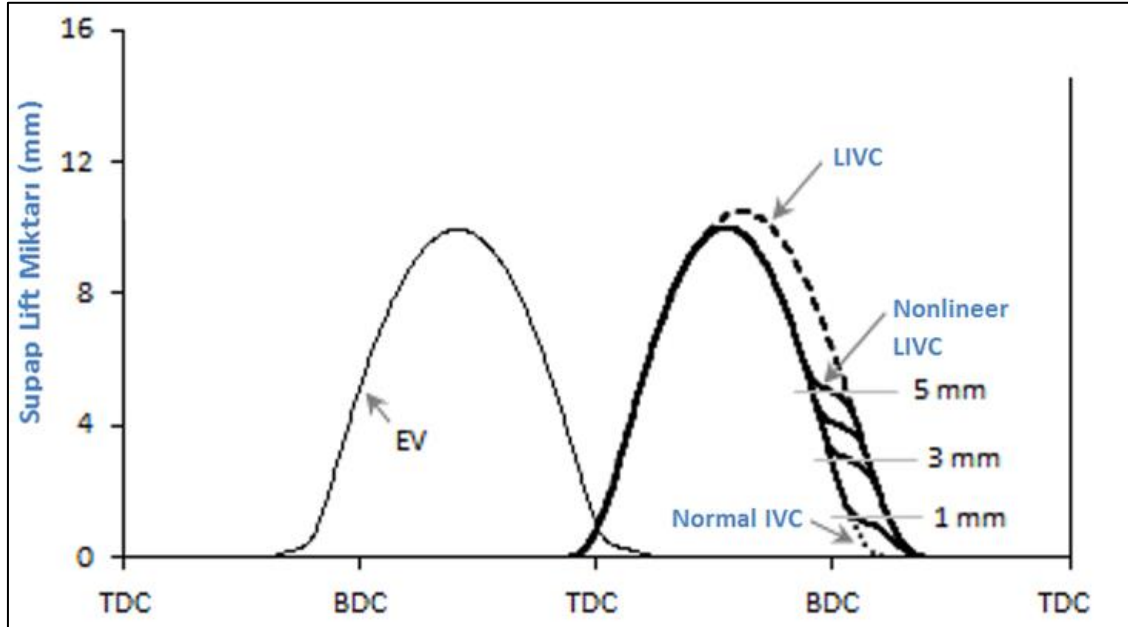
Özdemir (2015) tarafından buji ile ateşlemeli, dört zamanlı, tek silindirli bir motorda supap zamanlamaları değiştirilerek oluşturulan Atkinson çevriminin termodinamik analizleri, 1° krank mili açısı aralıklarla, farklı sıkıştırma oranlarında Fortran programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor devri sabit alınarak (3000 rpm) gerçekleştirilen analizlerde, sıkıştırma oranının değişmesi ile yanma sonu basıncı ve sıcaklığı, tork, termik verim, özgül yakıt tüketimi gibi parametrelerde meydana gelen değişimleri incelenmiştir. Matematik modellemesi yapılan çevrimde, gerçek yanma çevrimlerinde meydana gelen ısı kaybı, özgül ısıların sıcaklık ile değişmesi ve adyabatik olmayan yanma koşulları gibi etkenler parametrik olarak tanımlanmıştır. Atkinson çevrimi ile çalışan bir motorda, Otto çevrimine göre çalışan bir motora kıyasla, sıkıştırma oranının artması sonucunda termik verimin % 6,4 arttığı, özgül yakıt tüketiminin % 9 azaldığı görülmüştür [15].

Benajes ve arkadaşları (2009) yaptıkları deneysel çalışma ile Atkinson çevriminin Dizel motorlarına uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada, değişken supap zamanlaması metodu ile emme zamanında bir miktar rötör meydana getirmişler ve böylece Atkinson çevrimine dönüşüm sağlanmıştır. Klasik Dizel çevrimi ile Atkinson çevrimi arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Silindir içerisine alınan hava/yakıt karışım oranı, yanma parametreleri, egzoz emisyonu ve motor verimliliği üzerine analizler yapılmıştır. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorda yapılan deneysel çalışma esnasında değiştirilen supap kapanma zamanları etkisi ile karışım tamamen yakılamadığı ve sıkıştırma oranında azalma meydana geldiği incelenmiştir. Egzoz emisyonları ile ilgili olarak, Atkinson çevrimi etkisi

ile yanma sonu maksimum sıcaklığın azalmasının özellikle NO_x emisyonlarını azalttığı, ancak tam yanmanın olmaması sebebi ile is oluşumunu arttırdığı görülmüştür [4].

Chandras ve arkadaşları (2018) yapmış oldukları çalışmada, 16 supaplı, 2,5 L hacme sahip, dört zamanlı ve dört silindirli bir GDI benzinli motorunda, supap kalkma miktarı ve emme supabı kapanma zamanı değişiminin, volümetrik verim ve yakıt tüketimine olan etkilerini GT-Power yazılımı kullanarak incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri bu modelleme üzerinde, supap kalkma miktarının değişimini, geleneksel olmayan bir yapıya büründürmüş ve Şekil 4.1'de görüldüğü gibi farklı supap kalkma miktarları için modeller kurgulamışlardır. Ayrıca değişen supap kalkma miktarlarının meydana getirdiği sonuçları, geç emme supabı kapanması ile oluşturduğu Atkinson çevrimi modelleri ile kıyaslamışlardır. Böylece supap kalkma miktarı etkilerini karşılaştırarak, emme supabı rötar miktarını tespit etmişlerdir.

Emme supabı geç kapatılan ve supap lift miktarı değişen motorda oluşturulan çevrim neticesinde, motorun emme manifoldlarındaki hava akış miktarında bir azalma meydana geldiği, bunun sonucunda motorun volümetrik verim ve özgül yakıt tüketiminin etkilendiği gözlenmiştir [24].



Şekil 4.1. Farklı emme supabı hareket modları [24]

Chen ve arkadaşları (2006) yapmış oldukları çalışmada, Atkinson çevrimli bir motorun performansını etkileyen parametrelerin tespitini yapmışlar ve ısı transferi eşitlikleri, özgül

ısıların sıcaklığa bağlı değişimi ve sürtünme gibi faktörleri incelemişlerdir. Oluşturdukları matematiksel model üzerinde, termodinamik analizleri zamana bağlı olarak irdelemişler ve matematiksel örneklemeler ile çalışmasını detaylandırmışlardır. Tersinmez bir çevrim olan Atkinson çevrimi üzerinde en önemli parametrelerden birisi olarak, yakıt/hava karışımının özgül ısısının değişimi olduğu vurgulamışlardır [19].

Cordier ve arkadaşları (2016) tarafından yapılan çalışmada, 10,5:1 sıkıştırma oranına sahip, tek silindirli ve buji ile ateşlemeli bir motorda, sıkıştırma oranı değişimi ve değişken supap zamanlaması uygulanarak Atkinson ve Miller çevrimleri oluşturulmuştur. Yanma odası geometrisi değiştirilerek motorda meydana getireceği değişimler incelenmiştir. Tasarlanan farklı piston üst yüzey geometrileri için akış analizleri IFP-C3D yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Türbülans seviyesi, akış hızları ve sürtünme miktarları gibi parametrelerin değişimleri simülasyon ortamında gözlenmiştir. Ayrıca optik olarak yanma sırasında meydana gelen akış hareketleri her 0,45° KMA için kayıt edilerek, analiz ortamında oluşturulan model ile tutarlılığı tartışılmıştır. Klasik Otto çevrimi ile çalışan ve 10,5:1 sıkıştırma oranına sahip, 210° KMA'da kapanan bir emme supabına sahip motorun, sıkıştırma oranında ve supap zamanlamalarında değişiklikler meydana getirilerek Çizelge 4.1'de listelenen çeşitli durumlar için testler ve analizler yapılmıştır. Yapılan çalışma ile geleceğin emisyon regülasyonlarına uygun ve termodinamik olarak iyileştirilmiş yanma metodunu kullanan bir motora ulaşmak hedeflenmiştir [25].

Çizelge 4.1. Farklı sıkıştırma oranları için supap kapanma zamanı stratejileri

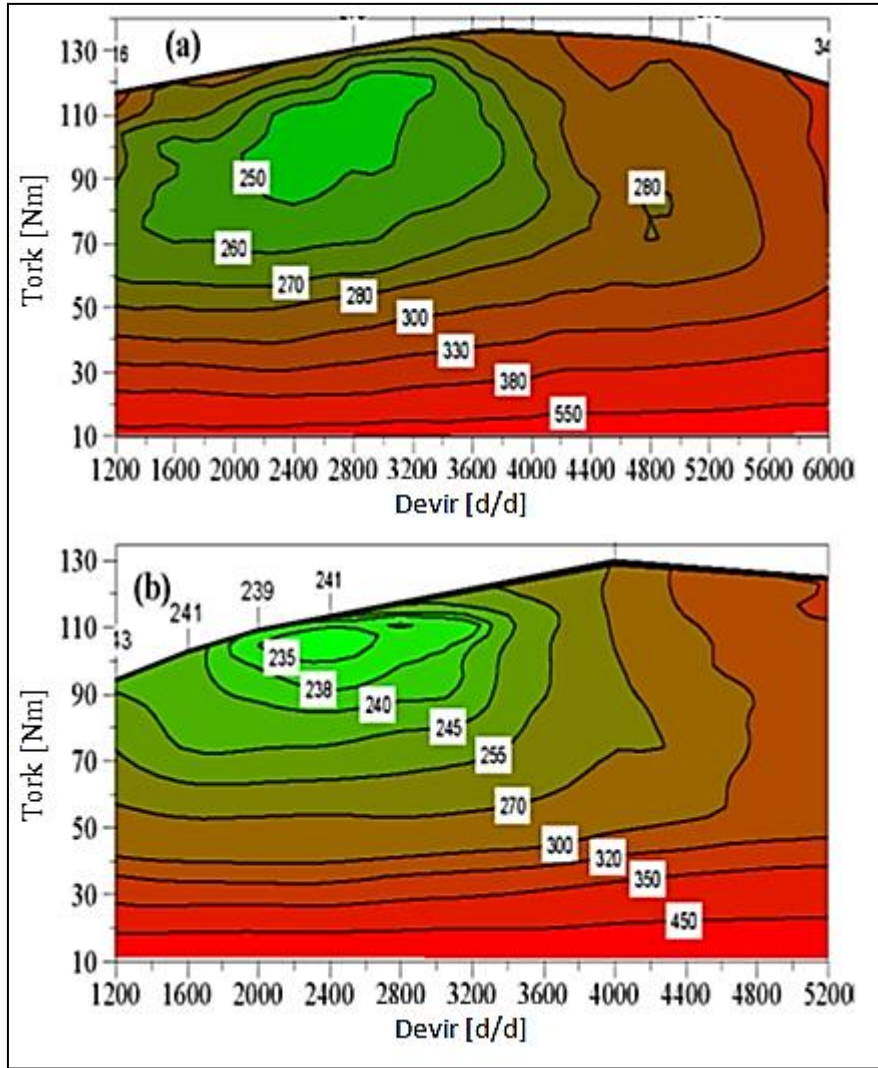
Sıkıştırma Oranı	Emme Supabı Kapanma Zamanı	Çevrim
10.5:1	210° KMA	CR 10.5 E210
12:1	Miller 140° KMA	CR12 Miller
	Atkinson 240° KMA	CR12 E240
	Atkinson 270° KMA	CR12 E270
16:1	Atkinson 270° KMA	CR16 E270

Artan sıkıştırma oranı ve LIVC uygulamaları ile silindir içi sürtünme ve pompalama kayıplarında % 40'a varan azalmalar elde edilmiştir. Atkinson çevrimi uygulamalarında emme supabı kapanma zamanı 30° ve 60° KMA rötara alınmıştır. Aynı sıkıştırma oranı

için emme supabı kapanma zamanı 30° KMA erkene alınarak Miller çevrimi de oluşturulmuştur. Silindir içerisindeki türbülans miktarında azalma ile yanma hızı ve dolayısı ile yanmamış HC emisyonlarında azalma meydana gelmiştir. Sıkıştırma oranı arttırılmış ve 30° KMA rötar verilmiş Atkinson çevrimli motor ile özgül yakıt tüketiminde % 6 civarında azalma meydana gelmiştir [25].

Erduranlı (2003), buji ile ateşlemeli ve tek silindirli bir motorda değişken sıkıştırma oranlarını araştırmıştır. Ateşleme avansını her bir sıkıştırma oranında maksimum torku verecek şekilde el ile kumanda etmiş ve 7:1, 9:1, 11:1 gibi farklı sıkıştırma oranlarında deneyler gerçekleştirmiştir. Gaz keleşbeği tam açık pozisyonunda gerçekleştirilen deneylerde, artan sıkıştırma oranı etkisi ile yüzey/hacim oranı ve motor torkunda artış, özgül yakıt tüketiminde ise % 30'a varan azalma gözlemlenmiştir. Değişken sıkıştırma oranlı motorlarda, değişken supap zamanlaması uygulamaları yapılmasının çok daha verimli sonuçlar doğuracağının vurgusunu yapmıştır [26].

Feng ve arkadaşları (2016) yaptıkları deneysel çalışmada, klasik Otto çevrimli, 4 silindirli, 75 kW gücündeki bir motoru Atkinson çevrimi ile çalışacak şekilde dönüştürmüş ve çeşitli parametreler üzerinde deneyler gerçekleştirmişlerdir [5]. Atkinson çevrim dönüşümü ile oluşacak performans azalmasını telafi edebilmek için tasarımsal değişiklikler yapmışlar ve sıkıştırma oranını arttırmışlardır. AVL EXCITE yazılımı kullanılarak, piston tasarımında değişiklik yapılan motorda, Atkinson çevrimi sonrasında hedeflenen değerlere ulaşılması için emme ve egzoz kam milleri yeniden tasarlanmıştır. Sonuç olarak, Atkinson motorunun tüm devir aralıklarında yakıt tüketiminin Otto motorundan çok daha düşük olduğunu ve minimum özgül yakıt tüketiminin 250 g/kWh'dan 234,5 g/kWh değerine düştüğü görülmüştür. Ayrıca Şekil 4.2'de görüldüğü gibi Atkinson motorunun düşük özgül yakıt tüketimi aralığının, Otto motorundan çok daha geniş olduğunu belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Özgül yakıt tüketimi değerleri (a) Otto çevrimi (b) Atkinson çevrimi

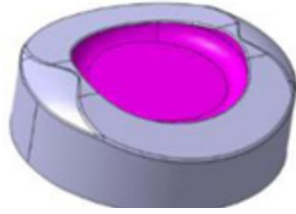
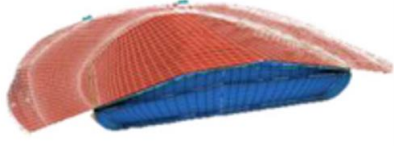
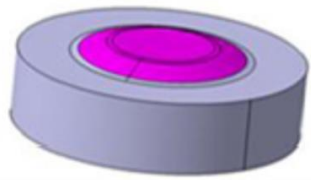
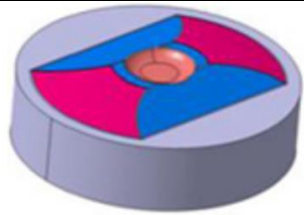
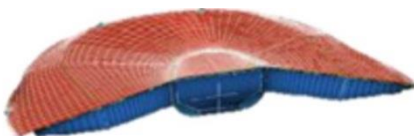
Aynı geometrik ölçülerde buji ile ateşlemeli bir motorun, Atkinson çevrimi ile çalıştırılması sonucunda, daha geniş bir devir aralığında daha yüksek bir termik verim değişimi elde edilmiştir. Atkinson çevrimli motorun, yakın geleceğin araçları olarak görülen hibrit elektrikli taşıtlarda kullanılmasının, klasik Otto çevrimli motorlara göre daha verimli olacağı sonucuna varmışlardır [5].

Zhao (2017) tarafından, emme supabının geç kapatılması (LIVC) metodu kullanılarak Atkinson ve Miller çevrimleri oluşturulmuş bir motorda, farklı emme supabı kapanma gecikmesi zamanları ve sıkıştırma oranı değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Geleneksel bir Otto çevrimli motorla karşılaştırıldığında, Atkinson çevrimli motor, özellikle orta ve yüksek devirlerde, daha büyük bir genişleme oranı ve dolayısıyla daha yüksek bir termal verimlilik sağlamıştır. Ayrıca sıkıştırma oranının arttırılmasına karşın yanma sonu

maksimum sıcaklığında azalma ve vuruntu direncinde artış meydana geldiği gözlenmiştir. İndike motor gücünde meydana gelen azalmanın etkisini minimum hale getirebilmek için, yanma odası geometrisinde değişiklik, aşırı doldurma, sıkıştırma oranının değiştirilmesi gibi uygulamalar gerçekleştirildiğinde daha başarılı sonuçlar alınabileceği öngörüsünde bulunmuşlardır [6].

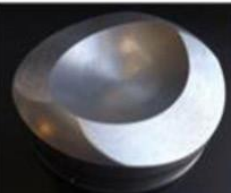
Ferrey ve arkadaşları (2014), buji ile ateşlemeli benzinli bir motorda, değişken supap hareketi (VVA) ve değişken sıkıştırma oranı (VCR) uygulamaları ile oluşturulacak farklı stratejilerin etkilerini incelemek için Atkinson ve Miller çevrimlerini kullanmışlardır. Emme supabının erken ve geç kapatıldığı, yüksek sıkıştırma oranlı bu motorda performans parametreleri incelenmiştir. Ansys analiz programının hesaplamalı akışkanlar dinamiği için kurgulanmış olduğu ICEM paket programı kullanılarak, farklı geometrilere sahip küresel yapıya benzer yanma odası tasarımları için, Şekil 4.3’de görülen akış analizleri yapılmıştır [27].

Yapılan simülasyon çalışması neticesinde ortaya çıkan akış hızı ve karışımın yanma odası içerisinde dağılımı gözlenmiştir. Tasarımlara uygun pistonlar üretilmiş, kısmi ve tam yükte motor performansı test edilmiştir. Sıkıştırma oranın 14,5:1’den 23,5:1’e kadar değiştiği durumlar için farklı emme supabı çalışma stratejilerinin ortaya çıkardığı kombinasyonların sonuçları incelenmiştir. Sıkıştırma oranının 23,5:1 olduğu durumun aynı silindir hacmindeki 10,5:1 sıkıştırma oranına sahip motora göre özgül yakıt tüketiminde % 13 iyileşme gösterdiği fakat yanma veriminde daha başarısız olduğu tespit edilmiştir [27].

	Piston	Yanma Odası Hacimleri
A		
B		
C		
D		

Şekil 4.3. Analizi gerçekleştirilen piston tasarımları [27]

Şekil 4.4’de görüldüğü gibi, farklı yanma odası geometrilerine sahip pistonlar üretilmiş ve bu geometriler için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yapabilen bir yazılım olan IFP-C3D ile analizler gerçekleştirmişlerdir.

	#1	#2	#3	MCE-5
Max. CR	17.5:1	19.0:1	23.5:1	14.5:1
Image				

Şekil 4.4. İmalatı gerçekleştirilen piston tasarımları [27]

Devaud (2018) hidrolik tahrikli bir supap mekanizması tasarlayarak, motor performansı ve yakıt tüketimi üzerinde meydana gelen değişimleri incelemiş ve optimize bir supap çalışma karakteristiği oluşturmuştur. Hidrolik tahrikli supap mekanizması, tek silindirli bir motor üzerinde test edilmiş ve sonuçları GT-Suite yazılımı ile modellenen veriler ile kıyaslaması yapmıştır. Deney yapılan motorun kısmi yüklerde Atkinson çevrimi modunda çalıştığında 3200 rpm motor hızında yakıt tüketiminde % 11 iyileşme meydana getirdiği simülasyon ve deneysel çalışmalarda elde edilmiştir [28].

Özcan (2010), buji ile ateşlemeli bir motorun matematiksel modelini oluşturarak, LPG ve CNG yakıtları ile çevrimsel analizler yapmıştır. LPG ve CNG yakıtlarının kimyasal ve fiziksel özelliklerindeki değişimleri matematik modelinde dikkate alarak, silindir içi basınç, indike güç ve efektif güç gibi önemli yanma performans parametrelerinin değişimini incelemiştir. Ayrıca, oluşturduğu matematiksel model ile egzoz emisyonlarının değişimini de simüle etmiş ve gerçekçi yaklaşımlarda bulunmaya çalışmıştır. Çalışması sonucunda; maksimum silindir basıncının benzine göre LPG tercih edildiğinde ortalama % 5, CNG kullanımında ise % 7,25'lik bir düşüş meydana getirdiğini, motor gücünde ise benzine göre LPG kullanımında % 4,90, CNG'de ise % 7,60 azalma oluşturduğunu, özgül yakıt tüketiminde; benzine kıyasla LPG'de ortalama % 5,80, CNG'de ise ortalama % 17,6 azalma olduğunu, NO_x emisyonlarında ise benzine göre LPG kullanımı ile % 42,50, CNG kullanımı ile de % 91,90 oranında azalma oluşturduğunu ve emisyon miktarındaki değişimin yanmanın bir fonksiyonu olduğunu incelemiştir. CNG yakıtın diğer fosil türevi yakıtlara kıyasla daha çevreci ve ekonomik olduğunu, buna ek olarak uygulandığı motorda fazla bir güç azalması meydana getirmeden önemli gelişmeler yaratabileceğinin vurgusunu yapmıştır [10].

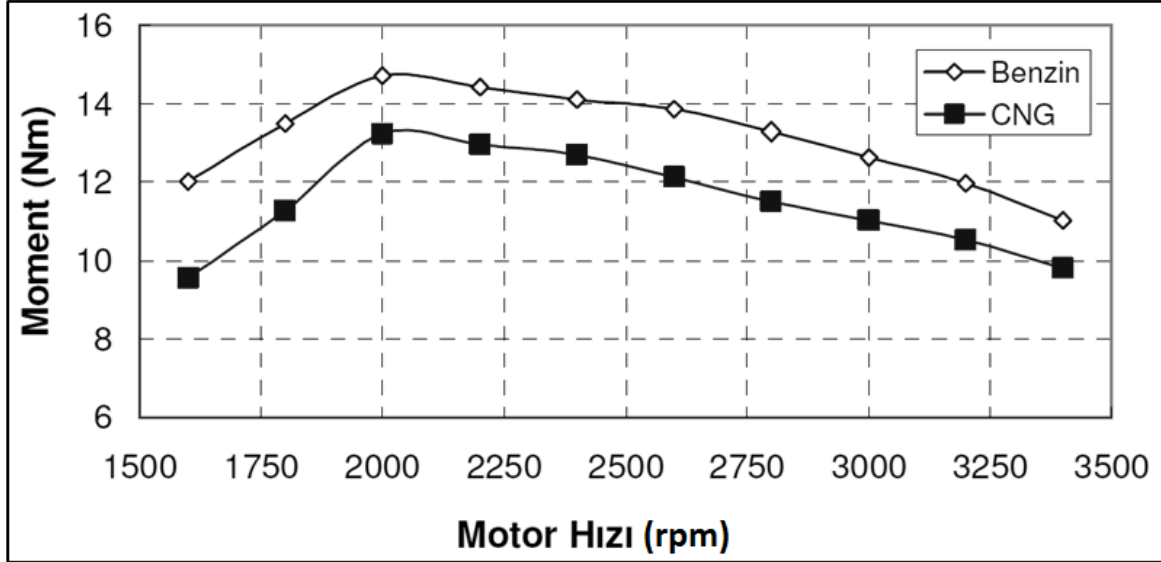
Sayın ve arkadaşları (2005) çift yakıtlı çalışabilen motorlar üzerinde yaptıkları çalışmada, benzin ve LPG yakıtlarını farklı oranlarda yanma odası içerisinde birlikte yakmış ve özellikle emisyon değerlerindeki değişimi irdelemişlerdir. Özgül yakıt tüketimi açısından % 4 daha düşük tüketim yapan bu motordan elde edilen emisyon değerlerindeki düşüş ise CO için % 13, toplam partikül miktarında ise % 5 olarak meydana gelmiştir. Tüm motor yüklerinde ve motor hız aralıklarında gerçekleştirilen deneyler dizisi sonrasında, sıvılaştırılmış petrol gazının kullanılmasının, çevreyi çok daha az kirleten bir nitelikte olduğu vurgulanmıştır [13].

Yenitepe ve arkadaşları (2009) yakıt ekonomisi üzerine yoğunlaştıkları çalışmalarında, iki farklı araç üzerinde LPG kullanımının etkilerini ve otomotiv sektöründe LPG dönüşüm sistemlerinin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Yapmış oldukları çalışmada, farklı vites tipi, araç hareket halindeyken klimanın açık veya kapalı olması ve farklı LPG dönüşüm kitleri gibi parametrelere bağlı olarak yakıt tüketim değerlerinin değişimini deneysel olarak araştırmışlardır. Dört zamanlı, dört silindirli, buji ile ateşlemeli motora sahip bir taşıt üzerinde gerçekleştirmiş oldukları çalışma sonucunda, motor performansında hissedilir bir azalma olmadan, daha çevreci bir yakıt olan LPG kullanımının avantajları üzerinde durmuşlardır. Deneylerde, LPG dönüşümü yapılaş olan 82 HP gücündeki aracın litre bazında 100 km için yakıt tüketim miktarı yaklaşık % 9 artmıştır. Ancak LPG yakıtı, litre fiyatının benzine kıyasla % 48 daha ucuz olması ve homojenize bir şekilde yanma odası içerisine enjekte edilmesi gibi sebeplerle, yakıt maliyetinde % 44 azalma sağlamıştır [29].

Yousufuddin ve Mehdi (2008), yaptıkları çalışmada, artan petrol tüketimi arzına karşın petrol kaynaklarının tükenmesi ve çevre kirliliğinde önlenemeyen bir artışın sürekli bir şekilde devam etmesi gibi sorunlar temel alınarak, bu duruma yönelik alternatif veya yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmenin gerekliliği üzerinde durmuşlardır. Sıkıştırma oranı 6:1 ile 25:1 arasında değiştirilebilen, dört zamanlı, tek silindirli, 625 cm³ silindir hacmine sahip, buji ile ateşlemeli bir motorda, LPG ve benzin yakıtları kullanılarak, 2500 rpm ve 2800 rpm motor hızlarında, 7:1 ve 10:1 sıkıştırma oranlarında deneyler gerçekleştirmiş. Deneyler sonucunda LPG'nin klasik benzin yakıtına göre daha temiz, daha ucuz ve ayrıca daha iyi bir performans sağladığı belirtilmiş ve geleneksel yakıtlara alternatif bir seçenek olacağı vurgulanmıştır. LPG kullanılması ile motordan alınan aynı tork değeri için çok daha düşük seviyelerde emisyon salınımı olduğu, yani LPG'nin klasik benzin yakıtına nazaran daha temiz bir yakıt olduğu belirtilmiştir [23].

Ayhan (2009) tarafından yapılan deneysel çalışmada, sıkıştırılmış doğal gazın (CNG), tek silindirli, buji ile ateşlemeli, 196 cm³ silindir hacmine ve 8:1 sıkıştırma oranına sahip bir motorda kullanımı araştırılmıştır. Aynı sıkıştırma oranında, benzinden CNG yakıtına geçildiğinde, 2000 rpm motor hızında, maksimum motor torkunun 14,72 Nm'den 13,24 Nm'ye düştüğü ve yaklaşık % 10'luk bir azalma meydana geldiği belirtilmiştir (Şekil 4.5). CNG yakıtı ile çalışan Otto çevrimli motorda, emilen hava/yakıt karışımı gaz fazında olduğu için sıcaklıktan direkt etkilenecek volümetrik verimin düşmesine, düşük devirlerde

yanma odası içerisine alınan hava hızının azalmasına ve dolayısıyla motor torkunda azalmaya yol açmaktadır [30].



Şekil 4.5. CNG yakıtının motor torkuna etkisi [30]

Cho ve arkadaşları, buji ateşlemeli Otto çevrimli bir motor üzerinde, kurs/piston çapı oranının yanma verimliliğine olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Direkt enjeksiyonlu yakıt püskürtme sistemine sahip, tek silindirli deney motorunda, farklı kurs/piston çapı oranlarının (1,47:1, 1,2:1, 1:1) motor performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Emme supabı kapanma zamanının geciktirilmesiyle Atkinson çevrimi elde edilen bu değişken supap zamanlamasına sahip motorda, erken emme supabı açılmasının etkileri de incelenmiştir. Değişken supap zamanlamaları ve kurs/çap oranları entegre bir biçimde kullanılmış ve farklı modlar elde edilmiştir. Kısmi yükte gerçekleşen deneysel çalışmalarda (imep 4 bar), verimliliğin kurs/çap oranına göre sırasıyla $1,2 > 1,0 > 1,47$ olduğu görülmüştür. Ayrıca özgül yakıt tüketimi değerlerinin minimum olduğu 6 bar ortalama indike efektif basınç için sırasıyla $1,2$ (219 g/kWh) $< 1,47 < 1,0$ sıralamasıyla değişim gözlenmiştir. Emme ve egzoz supap zamanlamalarında yapılacak değişiklikler ile tek silindirli, dört zamanlı motorlarda kısmi yükler için iyileştirilmiş çalışma modları üretilmiştir [31].

Bayraktar (2003), çeşitli çalışma koşullarında, benzin, etanol ve LPG kullanan bir buji ateşlemeli otomobil motorunda meydana gelebilecek değişimleri teorik bir yaklaşımla incelemiştir. Yapılan çalışmada, içten yanmalı bir motorda realistik bir yaklaşım ortaya

koyarak çeşitli değişkenleri tanımladığı bir matematik model oluşturmuş ve bu model üzerinde bir boyutlu termodinamik bir çevrimi simüle etmiştir. Aynı koşullar altında farklı yakıt kombinasyonlarının kullanılmasına ilişkin yapılan çalışmada, motor performans parametrelerini, emisyon değerlerini, termodinamik verimlerini farklı devirler için teorik olarak incelemiş ve buji ateşlemeli bir otomobil motoru için en uygun yakıtın etanol olduğu sonucuna varmıştır [32].

Wang ve arkadaşları (2012), buji ile ateşlemeli bir motorda yanma ve emisyon parametrelerinde teorik olarak iyileşme sağlayan Atkinson çevrimi ile çalışan bir motorun deneylerini gerçekleştirmiştir. Deneyler, stokiyometrik hava/yakıt oranında ve 1500 rmp'de çalışan 565 cm³ silindir hacmine sahip bir motor üzerinde yapılmıştır [7]. Kullanılan motora ait özellikler ve oluşturulan farklı durumlar Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

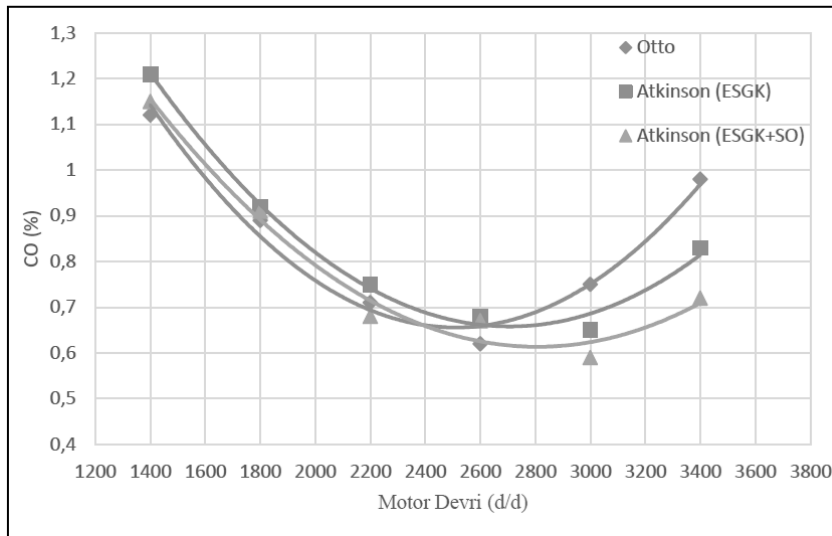
Çizelge 4.2. Motor özellikleri ve farklı çalışma durumları

Sıkıştırma Oranı	10,4:1			
Sıkıştırma Stroğu	89 mm			
Genişleme Stroğu	Klasik Otto 89 mm	Atkinson 1 106,5 mm	Atkinson 2 116,2 mm	Atkinson 3 123,1 mm
Genişleme Oranı	Klasik Otto 10.4	Atkinson 1 12	Atkinson 2 13	Atkinson 3 14
Yakıt	Benzin			
Lambda	1			
Motor Hızı	1500 rpm			
Silindir Çapı	90 mm			
Enjeksiyon Sistemi	Direkt Enjeksiyon			

Çalışmada sıkıştırma oranları aynı, genişleme oranları birbirinden farklı olan 3 farklı durumdaki motor ile genişleme ve sıkıştırma oranları aynı olan klasik Otto çevrimi ile çalışan motorun kıyaslaması yapılmış ve genişleme oranının emisyon ve motor performansı parametreleri üzerine etkileri incelenmiştir. İndike motor veriminin artmasında, ortalama efektif basıncın doğru orantılı bir etkisi olduğunu ayrıca Atkinson

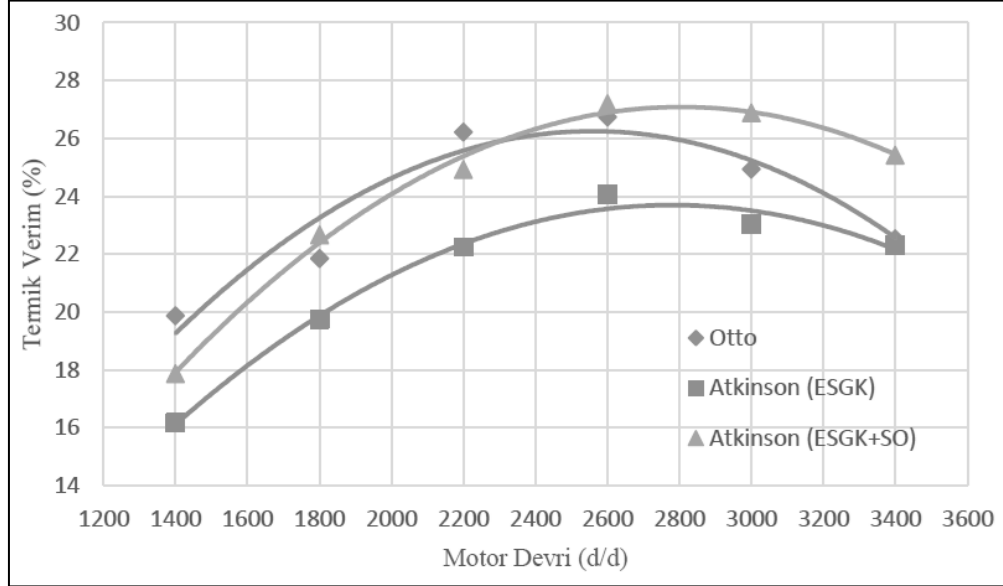
çevrimi kullanılarak oluşturulan farklı genişleme oranına sahip motorlar kıyaslandığında, genişleme oranı arttırıldıkça indike motor veriminin daha da arttığı deneysel olarak incelemişlerdir [7].

Gülcan (2019) yapmış olduğu çalışmasında, tek silindirli, üstten eksantrikli bir klasik Otto çevrimli motorda, emme supabı kapanma zamanını geciktiren kam mili profili tasarımı yapmış ve aynı motorun sıkıştırma oranını değiştirmiştir. Böylece Atkinson çevrimini bu motor için modifiye etmiştir. Değişen özelliklerin etkisini gözlemlemek için deneysel bir çalışma yürütmüştür. Emme supabı kapanma zamanı orijinal çevrime göre 20° KMA geciktirilmiş motorun, tam gaz kelebek açıklığında 1400-3400 rpm hız aralığında, motor hızına bağlı olarak güç, tork, verim, özgül yakıt tüketimi, CO ve HC emisyonları değişimi incelemiştir. Aynı motor üzerinde öncelikle LIVC metodu kullanılarak Atkinson çevrimi oluşturulmuş ve ESGK olarak adlandırılmıştır. ESGK motorunun sıkıştırma oranı arttırılarak ESGK+SO isimli üçüncü kombinasyon oluşturulmuştur. Bu çevrimler üzerinde benzin ile deneyler tam gaz kelebek açıklığında gerçekleştirmiş ve elde edilen motor performans parametreleri değişimleri kıyaslanmıştır. Özellikle yüksek devir aralıklarında Atkinson çevrimli motorun sıkıştırma oranı arttırılmasıyla, motor torku, efektif motor gücü ve termik verimde olumlu yönde artış gözlemlemiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi CO emisyonunun, motor devrine bağlı olarak değişimini gözlemlemiştir. Ayrıca Şekil 4.7'de görüldüğü gibi özellikle orta ve yüksek devir aralıklarında termik verimde artış olduğunu görmüştür.[8]



Şekil 4.6. CO Emisyonlarının motor devrine bağlı değişimi

Gülcan (2019), en yüksek motor hızında (3400 rpm) yapılan deneylerde ESGK+SO çevrimine göre çalışan motorun, Otto çevrimli motora göre termik verimin Şekil 4.7’de görüldüğü gibi % 12,8 arttığını, yakıt tüketiminin yaklaşık % 12 azaldığını ve CO ile HC emisyonlarında % 27 civarında iyileşmeler olduğunu gözlemlemiştir [8].

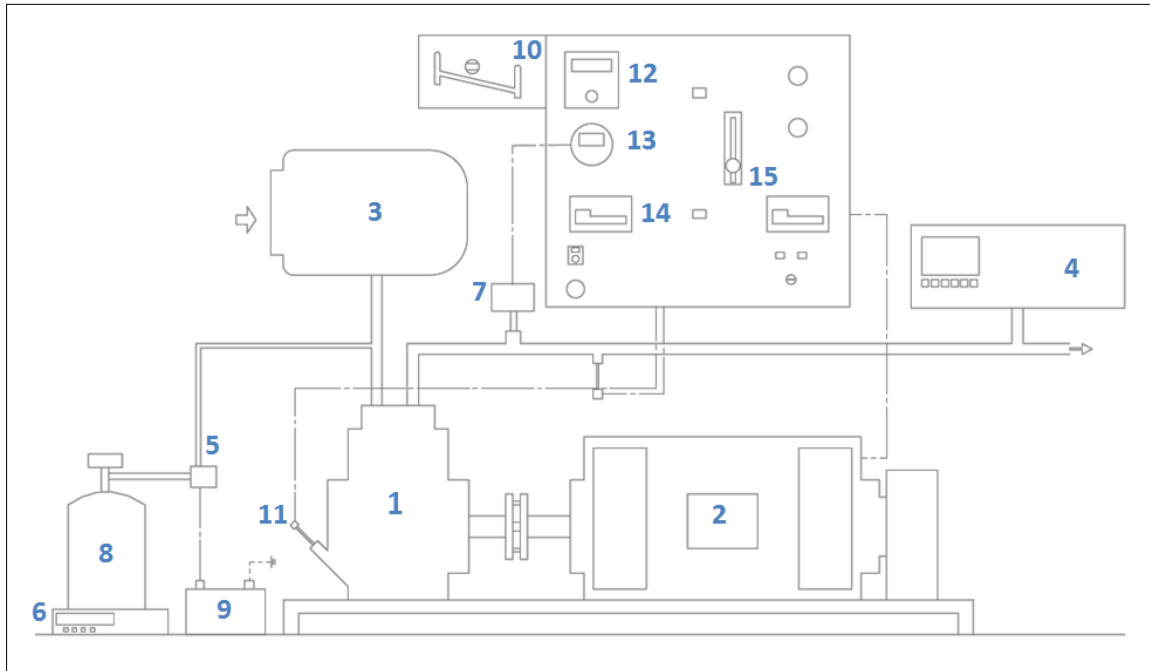


Şekil 4.7. Motor devrine bağlı olarak termik verimdeki değişim

Emme supabının geç kapatılması metodu, sıkıştırma zamanında bir miktar dolgunun geri emme manifolduna kaçmasına ve dolayısı ile motor gücünde azalmaya sebep olmaktadır. Efektif motor gücündeki bu azalmanın negatif etkisinin giderilmesi için motorda sıkıştırma oranının artırılması gerekmektedir. Bu nedenle Gülcan (2019), daha yüksek sıkıştırma oranı ile çalışan bir motorda LIVC ile Atkinson çevrimi oluşturulmasının, termik verim değerinde oluşan iyileşmeyi arttıracaklarını belirtmiştir [8].

5. MATERİYAL METOD

Bu çalışmada, Atkinson çevrimine dönüşümü yapılmış [8,20], tek silindirli, dört zamanlı ve teknik özellikleri Çizelge 5.1’de verilen buji ile ateşlemeli bir motor üzerinde LPG yakıtı kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Motor üzerinde, farklı hava fazlalık katsayılarına (0,8-1,3) bağlı olarak meydana gelen tork, güç, termik verim, özgül yakıt tüketimi ve emisyon değişimleri Şekil 5.1 ve Resim 5.1’de görülen test düzeneğinde deneysel olarak incelenmiştir. Aynı motorun farklı varyasyonları olan, klasik Otto çevrimli 8,5:1 sıkıştırma oranına sahip motor, 9,5:1 sıkıştırma oranına sahip Atkinson motor ve 9,5:1 sıkıştırma oranına sahip LPG ile çalışan motor kıyaslanmıştır [8].



- 1) Deney motoru, 2) DC Dinamometre, 3) Hava sönümleyici tank, 4) Egzoz gaz analizörü, 5) LPG yakıt enjektörü, 6) Hassas terazi, 7) Lambda göstergesi, 8) LPG tankı, 9) Batarya, 10) Hava akış ölçer, 11) Motor yağı sıcaklık ölçüm K tipi termokuplu, 12) Sıcaklık göstergesi, 13) Devir göstergesi, 14) Moment göstergesi, 15) Dinamometre

Şekil 5.1. Deney düzeneğinin şematik görünümü



Resim 5.1. Motor test dinamometresi

Motorun Atkinson çalışma şartlarına dönüşümü için kam mekanizmasında yapılan düzenleme ile emme supabı kapanma zamanı, standart zamanlamaya göre 20 KMA geciktirilmiş, ayrıca sıkıştırma oranı da 8,5:1'den 9,5:1'e çıkarılmıştır [8]. Klasik Otto çevrimli motorun değişim yapılmadan ve farklı modifikasyonlar uygulanmadan önceki teknik verileri ve motor performans parametreleri katalogdan alınmıştır.

5.1. Deney Motoru ve Test Düzeneği

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan, buji ile ateşlemeli, hava soğutmalı, tek silindirli, üstten eksantrikli ve dört zamanlı Resim 5.2'de görülen Lombardini marka, LGA 340 OHC model motora ait teknik özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çalışmada bu motor, bir DC dinamometre barındıran test düzeneğine (Resim 5.1) kaplin vasıtasıyla bağlanmış ve böylece deney düzeneği kurulmuştur. Deneyler, Gazi Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Motor Test Laboratuvarı'nda, 4000 rpm'de 10 kW gücü absorbe edebilen Resim 5.3'de görülen DC elektrikli dinamometreye sahip Cussons P8160 model tek silindirli motor test düzeneğinde yapılmıştır.

P8160 model dinamometre üzerinde bulunan mikroişlemcinin kontrollünde, tam rejeneratif tristör devresi sayesinde yük ve devir kontrolü hassas bir şekilde sağlanabilmektedir [33]. Motorun anlık hızı, dinamometrenin rotor kısmına bağlı dişli tekerlek üzerinden, pick-up sensör vasıtası ile 1 rpm hassasiyette ölçülebilmektedir [34].

Çizelge 5.1. Deney motorunun teknik özellikleri

		Otto (Standart)	Atkinson [8]
Motor tipi		4 zamanlı, buji ile ateşlemeli	
Silindir sayısı		1	
Silindir çapı [mm]		82	
Kurs boyu [mm]		64	
Kurs hacmi [cm ³]		338	
Soğutma sistemi		Hava soğutmalı	
Maksimum supap kalkma miktarı [mm]		7	
Sıkıştırma Oranı		8,5	9,5
Supap zamanlaması	Emme supabı açılma avansı	14° önce ÜÖN	14° önce ÜÖN
	Emme supabı kapanma gecikmesi	52° sonra AÖN	72° sonra AÖN
	Egzoz supabı açılma avansı	50° önce AÖN	50° önce AÖN
	Egzoz supabı kapanma gecikmesi	14° sonra ÜÖN	14° sonra ÜÖN

Motorun LPG dönüşümü için karbüratörlü motorlarda kullanılan LPG yakıt kiti karıştırıcı ile motorun emme manifolduna adapte edilmiştir. Emme supabı geç kapatılan motorda LPG dönüşümü yapılarak, deneysel çalışma için gerekli olan tek silindirli buji ile ateşlemeli motor hazırlanmıştır [35,36].

Yakıt tüketimi için 4,5 kg ağırlığa kadar 1 mg hassasiyetinde ölçüm yapabilen RADWAG marka dijital terazi kullanılmıştır. Yakıt tüketim süreleri, Robic Sports SC-700 marka kronometre ile belirlenmiştir.



Resim 5.2. LPG kiti ve motor bağlantısı



Resim 5.3. DC dinamometre

Motor yağı ve egzoz gaz çıkış sıcaklıklarını ölçmek için K tipi termokupllar kullanılmıştır. LPG'nin hassas olarak emme manifolduna gönderilmesi için basınç düşürücü ile gaz akış ölçeri [37] arasına görseli Resim 5.4'de, teknik özellikleri ise Çizelge 5.2'de verilen hassas

gaz akış ayarlama özelliğine sahip RS PRO FT125 marka gaz akış kontrol vanası konumlandırılmıştır.



Resim 5.4. Gaz akış kontrol vanası

Çizelge 5.2. Gaz akış kontrol vanasının teknik özellikleri

Marka Model	Maksimum Akış Miktarı	Maksimum Çalışma Basıncı	Boru Çapı	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	Minimum Çalışma Sıcaklığı
RS PRO FT1251/2	50 L/dk	210 bar	1/2 inç	100 °C	-20 °C

Egzoz gazı ve motor yağı sıcaklıkları K tipi termokupllar vasıtasıyla ölçülmüş ve değerler test ünitesi üzerinde bulunan Resim 5.5’de görülen panelden anlık olarak okunmuştur [12].



Resim 5.5. Test ünitesi gösterge paneli

5.2. Egzoz Gaz Analizörü

Egzoz emisyonlarının ölçülmesinde Resim 5.6’da görüntüsü ve Çizelge 5.3’de teknik özellikleri verilen BOSCH marka BEA-350 model egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Cihaz içerisinde mevcut olan sensörler sayesinde birçok yanma sonucu ürünü (CO, HC, NO_x, CO₂) ve λ değerini ölçülebilmektedir [38].

Çizelge 5.3. Bosch BEA350 egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri [38]

Parametre	Ölçme aralığı	Hassasiyet
CO [% hacim]	0 – 10	0,001
HC [ppm]	0 – 9999	1
NO _x [ppm]	0 – 5000	≤ 1
CO ₂ [% hacim]	0 – 18	0,01
O ₂ [% hacim]	0 – 22	0,01
Lambda	0,5 – 9,9999	0,001

Ölçüm için egzoz gaz analizörünün (Resim 5.6) ölçüm probunun, motor üzerinden egzoz gazı çıkış noktasına veya egzoz manifoldu birleşim noktasına olan uzaklığı önemli bir faktördür [39]. Bu değer, ürüne ait kullanım klavuzunda [38] yer alan aralıktan seçilmiş ve egzoz gazı çıkışına direkt olarak bağlantısı sağlanmıştır.

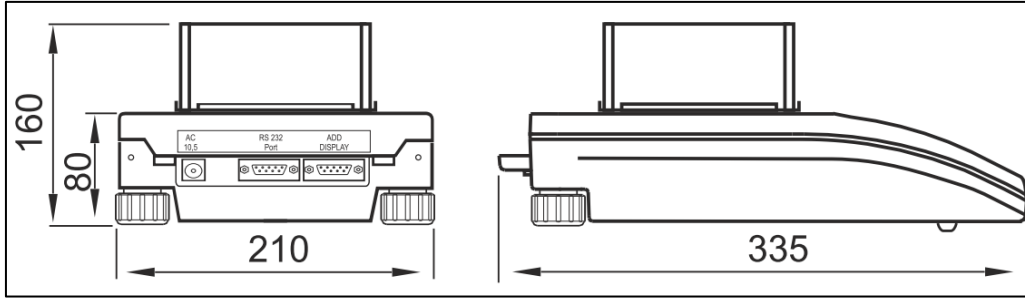
Egzoz gaz analizörü kullanılarak emisyon değerlerinin yanı sıra, lambda değerleri % 0,1 hassasiyetle ölçülmüş ve deney boyunca farklı lambda oranlarında motor çalıştırılmıştır. Deney motorunun kataloglarında yer alan motor devri-tork eğrilerine bakılarak, maksimum torkun elde edildiği devir aralığı olan 2600 rpm motor hızında deneyler gerçekleştirilmiştir.



Resim 5.6. Bosch BEA350 egzoz gaz analizörü

5.3. Hassas Terazi

Yakıt tüketim değerinin ölçülmesi için deney düzeneğine 10 mg hassasiyete sahip, 4,5 kg ağırlığa kadar ölçüm kapasitesi bulunan ve Resim 5.7’de ölçüleri verilen RADWAG PS 4500/C2 hassas dijital terazi kullanılmıştır. LPG tankı bu terazi üzerine tam temaslı ve merkezi bir şekilde konumlandırılmıştır. Terazi üzerinden okunan değerlerin zamana bağlı değişimi, yakıt tüketim hızına ilişkin parametrenin tespit edilmesinde kullanılmıştır.



Resim 5.7. Hassas terazinin ölçüleri

5.4. Yapılan Ölçümler

LPG yakıtının, emme supabı geç kapatılması metodu ile oluşturulmuş bir Atkinson çevrimli motorda kullanılması durumuna bağlı olarak motor torku, motor gücü, özgül yakıt tüketimi ve emisyon değerleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler tam gaz kelebek açıklığında ve 2600 rpm sabit motor hızında yapılmıştır. Bu motor hızı, maksimum torkun elde edildiği motor devri olduğu için seçilmiştir. Motor performans parametrelerinin en önemli değişkenlerinden birisi [40,41] olan motor hava fazlalık katsayısının 0,8-1,3 aralığında göstermiş olduğu etki Atkinson çevrimli motor için incelenmiştir.

Deney motorunun bütün deney koşullarında aynı motor yağı sıcaklığında sabit bir şekilde çalışabilmesi için endüstriyel tip bir hava soğutucu kullanılmıştır. Motorun LPG dönüşümü için karbüratörlü motorlarda kullanılan LPG yakıt kiti mikseri kullanılmış, RS-PRO FT125 marka gaz akış kontrol vanası ile kontrolü sağlanmış ve motorun emme manifolduna adapte edilmiştir. Değişimler ve adaptasyon tamamlandıktan sonra deney motorunun hava fazlalık katsayısına bağlı göstereceği değişimler incelenmiştir.

LPG yakıt kiti mikserine giden yakıt hortumu üzerinde bulunan gaz akış kontrol vanası ile lambda değeri ayarlanmıştır. Deneyler, maksimum motor torkunun elde edildiği devir olan 2600 rpm’de, $\lambda=0,8-1,3$ aralığında 0,1 aralıklarla yapılmıştır. Deneylerde lambdaya bağlı olarak tork, güç, özgül yakıt tüketimi, termik verim, HC, CO ve NO_x emisyonlarının değişimi incelenmiştir.

5.4.1. Motor torku

Deney motorunun bağlı olduğu DC dinamometre üzerinde yer alan yük hücresinden okunan kuvvet değeri, sonuç ve yorumlama kısmında kullanılacak en önemli

parametrelerden birisidir [42]. Bu kuvvet değerinin yük kolu üzerine oluşturduğu moment etkisi ile motor torku Eşitlik (5.1)'den hesaplanmıştır [43].

$$M = F.l \quad (5.1)$$

Burada ;

M : Moment (Nm),

F : Kuvvet (N),

l : Kuvvet Kolu (m)

Örnek olarak, 2600 rpm hızında çalışan Atkinson çevrimli motorda LPG yakıtının kullanılması ile yapılan deneysel çalışmada, yük hücresinden okunan kuvvet değeri 69 N'dur. Bu değer Eşitlik (5.1)'de yerine yazılırsa;

$$M = 69.0,25 = 17,25 \text{ Nm}$$

olarak hesaplanır.

5.4.2. Efektif motor gücü

Motor gücü, motor torkuna ve motor devrine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu değer deneysel çalışmada yük hücresine etki eden kuvvetin bir fonksiyonu olup,

$$P_e = (2. \pi. n. M)/60 \quad (5.2)$$

olarak hesaplanır. Burada;

P_e : Efektif motor gücü (W)

n : Motor devri (rpm)

M : Motor torkudur.

Örnek olarak, 2600 rpm hızında çalışan Atkinson çevrimli motorda LPG yakıtının kullanılması ile yapılan deneysel çalışmada motor torku 17,3 Nm hesaplanmıştır. Bu değer, Eşitlik (5.2)'de yerine yazılırsa;

$$P_e = \frac{2. \pi. 2600. 17,3}{60. 1000} = 4,7 \text{ kW}$$

olarak elde edilir.

5.4.3. Özgöl yakıt tüketimi

Özgöl yakıt tüketimi değeri, motordan alınan birim güç için harcanan yakıt miktarının kütleli değeri göstermektedir.

$$be = \frac{B}{P_e} \cdot 1000 \quad (5.3)$$

Burada ;

be : Özgöl yakıt tüketimi (g/kWh)

B : Yakıt tüketimi (g/h)'dir

5.4.4. Termik verim

Termik verim, efektif motor çıkış gücünün, sisteme verilen ısı enerjisine oranıdır. İçten yanmalı motorlar için önemli göstergelerden birisi de bu değerdir.

$$\eta_e = P_e / Q_{in} \quad (5.4)$$

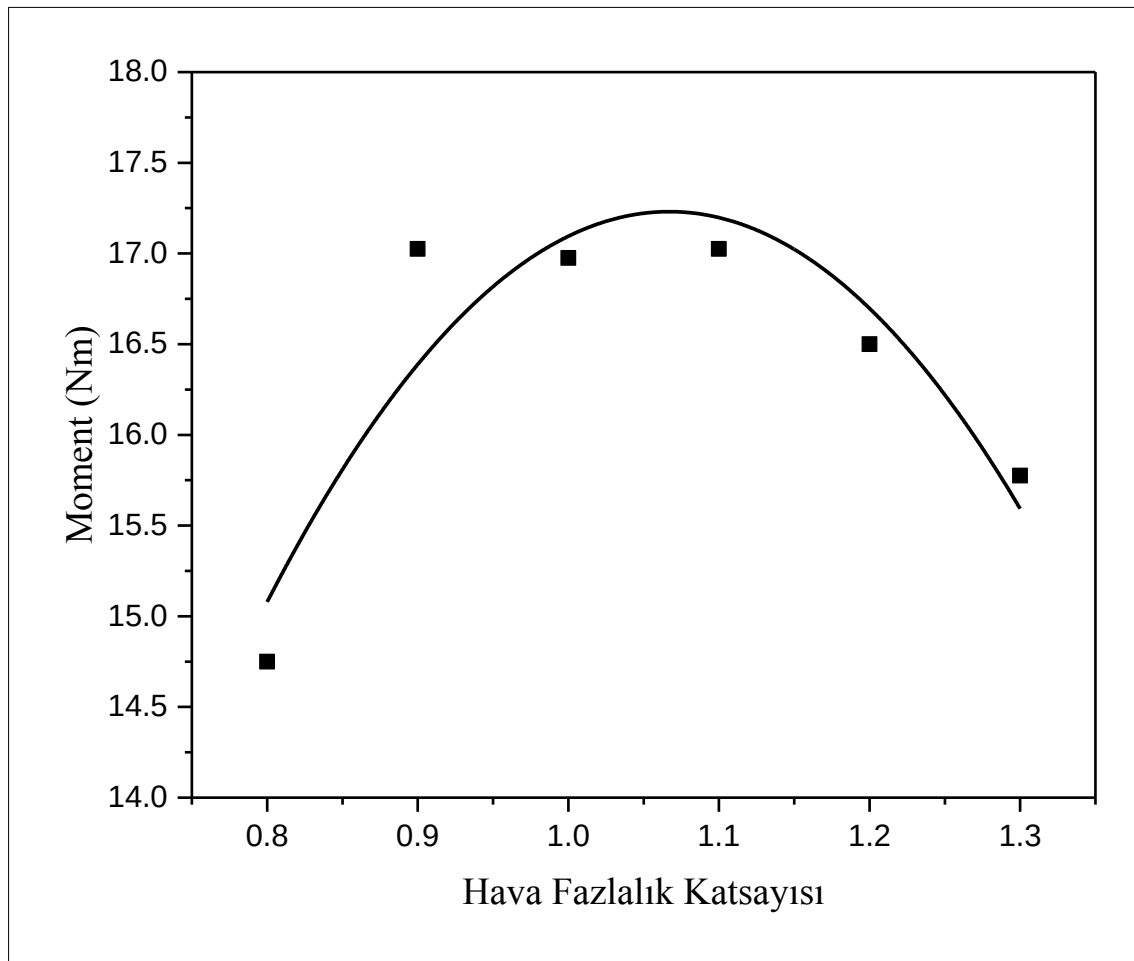
olarak hesaplanır. Burada;

η_e : Termik verim (%)

Q_{in} : Motora verilen ısı enerjisidir.

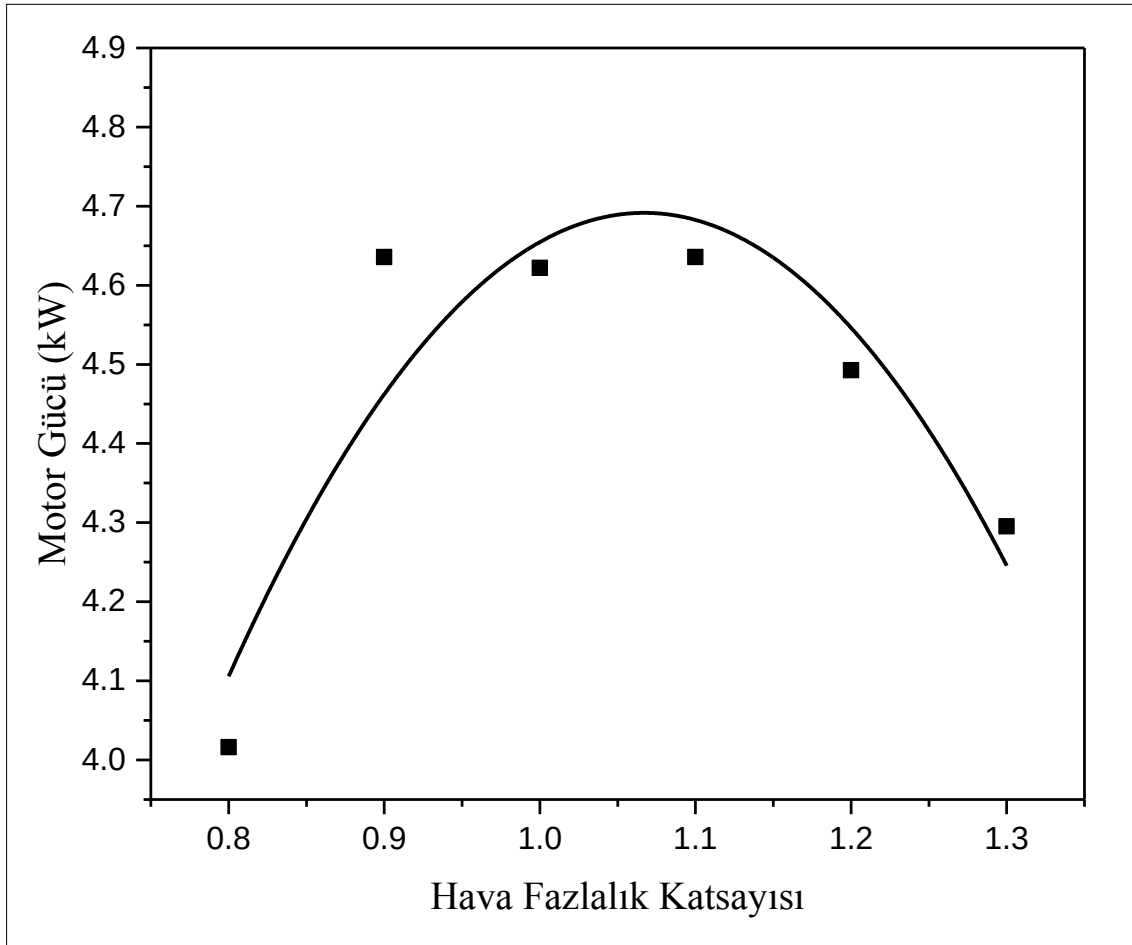
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Tek silindirli, buji ile ateşlemeli Atkinson çevrimine göre çalışan motor üzerinde, farklı hava fazlalık katsayılarına (0,8-1,3) bağlı olarak performans ve emisyon değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak motor torku ve motor gücü değişimlerinin görüldüğü Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de maksimum tork ve maksimum motor gücü lambdanın 0,9 olduğu değer için 17,025 Nm ve 4,64 kW olarak elde edilmiştir. Hava fazlalık katsayısının azaltılması, motor içerisine alınan LPG yakıt miktarının oransal olarak artmasına sebep olmuş, dolayısıyla $\lambda=0,9$ oranına kadar motor torku ve gücünde artış gözlenmiştir. Yanma odası içerisine alınan karışımın zenginleşmesiyle, artan yakıt miktarına paralel olarak silindir içi maksimum basınç ve sıcaklık değerleri de artmaktadır [8, 43, 44]. Özellikle stokiyometrik hava/yakıt oranı ve çevresinde motor torku ve motor gücü maksimum değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 6.1. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak tork değişimi

Hava fazlalık katsayısının 0,8 oranına kadar azaltılması ile karışımın zenginleşmesi, yanmanın tam gerçekleşmemesi ve düşük yanma sonu sıcaklıklarının etkisi ile motor torkunda ve gücünde azalma olduğu görülmüştür [8, 12, 45]. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi hava fazlalık katsayısının artmasına bağlı olarak fakir karışım bölgelerine doğru gidildiğinde de yine motor torkunda ve gücünde düşüş olduğu deneysel olarak gözlenmiştir. $\lambda=1,3$ için yapılan deneylerde motor torku 15,775 Nm ve motor gücü 4,29 kW olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.2. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak motor gücü değişimi

Kam mili mekanizmasında yapılan değişikliklerle oluşturulan Atkinson çevrimli motorun, emme supabı kapanmasında meydana gelen rötör etkisiyle, silindir içerisine alınan dolgunun bir miktarı tekrar sıkıştırma zamanında emme portuna geri gönderilmektedir. Motorda, sıkıştırma zamanında meydana gelen bu kaçak sebebiyle efektif sıkıştırma oranında azalma meydana gelmektedir [46,47,48]. Bu etkinin sonucu olarak silindir içerisinde sıkıştırılan yakıt/hava karışımının ateşleme öncesi ve sonrası sıcaklıkları ile

maksimum basınçları düşer. Böylece motor çıkış milinden alınan efektif motor gücünde ve tork değerlerinde azalma olmaktadır

Feng ve arkadaşları (2016) yaptıkları deneysel çalışmada, klasik Otto çevrimli 4 silindirli 75 kW gücündeki motoru Atkinson çevrimi ile çalışacak şekilde bir dönüşüme uğratmış ve çeşitli parametreler üzerinde deneyler gerçekleştirmiştir [5]. Dönüşüm sonrası yapılan deneylerde motor torkunda yaklaşık % 10 düşüş olduğunu ölçümlemiş ve emme supabı geç kapatılması (LIVC) metodunun motor performans parametreleri üzerinde gösterdiği olumsuz etkileri iyileştirebilmek için piston kafası geometrisinde ve sıkıştırma oranında değişiklikler yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada LPG yakıtının kullanıldığı Atkinson çevrimli motor üzerinde ölçümlenen motor torkundaki azalma, Feng ve arkadaşlarının çalışmasında [5] yaşanan azalma miktarına paralel bir şekilde meydana gelmiştir. Motor üzerindeki geometride değişiklikler yapılmasıyla, Atkinson çevrimine dönüşümün yaratmış olduğu olumsuz etki daha düşük bir seviyeye gerileyerek, motorun optimum çalışma parametreleri ile kullanılmasına olanak sağlayacaktır.

Şekil 6.3’de hava fazlalık katsayısına bağlı olarak ÖYT ve termik verim değişimleri görülmektedir. Minimum özgül yakıt tüketimi ve en yüksek termik verim hava fazlalık katsayısının 1,2 olduğu oran için sırasıyla 270,46 g/kWh ve % 30,07 olarak elde edilmiştir. Minimum özgül yakıt tüketimi ve maksimum termik verim noktalarının kesiştiği $\lambda=1,2$ değeri için motordan alınan tork değeri maksimum motor tork değerinin % 3,08 altındadır.

Yapılan deneysel çalışma ile aynı deney motorunda çalışmalar yürütmüş olan Gülcan (2019), deneyler neticesinde stokiyometrik hava/yakıt oranında ve 2600 rpm motor hızında, benzin yakıtını kullanmış ve bu noktada 300,75 g/kWh yakıt tüketimi ölçümlemiştir [8]. LPG yakıtının entegre edildiği çalışma ile kıyaslandığında bu değer stokiyometrik hava/yakıt oranında 285 g/kWh gerçeklemiştir. Atkinson çevrimli motorda benzin yakıtı yerine LPG yakıtı kullanılması yaklaşık olarak % 4 daha düşük özgül yakıt tüketimi yapılmasını sağlamıştır.

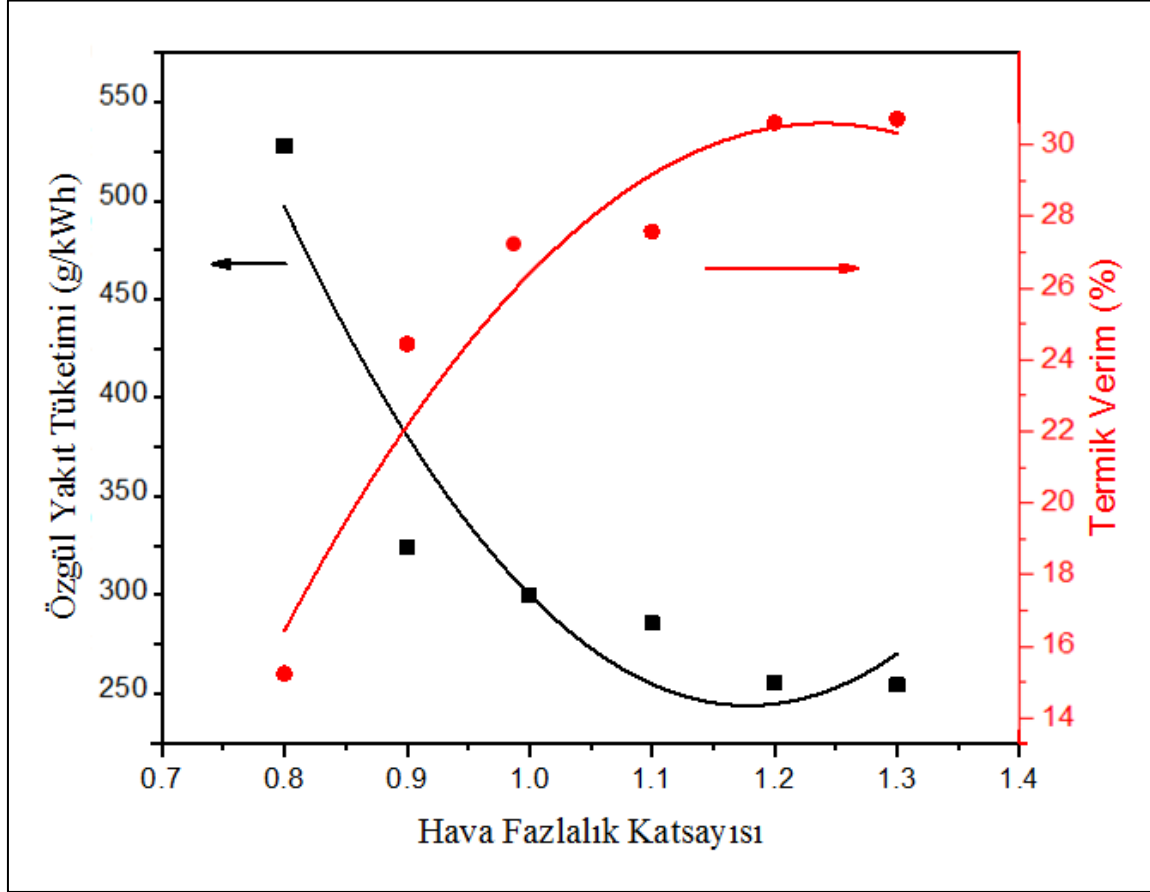
Yanma odası içerisinde zengin karışım bölgelerinde meydana gelen hızlı ve düzensiz yanma dağılımı sonucu silindir cidarı yakınlarında sönen alev huzmesi ve bazı bölgelerde daha soğuk alev sıcaklıkları, bu HFK değerleri için termik veriminin düşmesine sebep olmaktadır [12,46]. Yapılan deneysel çalışmada $\lambda=1,2$ değerinde motor daha stabil ve

kararlı bir yanma gerçekleştirmektedir. Zhao (2017) çalışmasında, klasik Otto çevrimli motordan LIVC metodu uygulayarak elde ettiği Atkinson çevrimli motor üzerinde deneyler gerçekleştirmiş ve minimum özgül yakıt tüketimi değerinde yaklaşık olarak % 8 düşüş meydana geldiğini ölçümlemiştir [6]. Bu ölçümler ve sonuçlar, yapmış olduğumuz deneysel çalışmada özgül yakıt tüketimindeki değişim ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte motorda tamamen LPG kullanımına bağlı olarak, daha homojenize bir yakıt/hava karışımının silindir içerisine alınması ve LPG'nin giriş basıncının yüksek olması nedeniyle oluşturduğu türbülans miktarı artmakta böylece yanma performansı iyileşmektedir. Sayın ve arkadaşlarının (2005) yapmış oldukları çalışmada, LPG yakıtının ve benzin yakıtının birlikte kullanıldığı çift yakıtlı Otto çevrimli motor üzerinde performans parametrelerini incelerken, özgül yakıt tüketiminin LPG kullanımı ile % 5 oranında azaldığını belirtmiştir [12].

Atkinson çevrimli motorda, emme supabı kapanma zamanındaki gecikme ve bununla birlikte LPG yakıtının karakteristik özelliklerinin etkisi ile negatif iş yükünde azalma, maksimum yanma sonu sıcaklığında azalma ve termik verimde artma olduğu gözlenmiştir. Stokiyometrik hava/yakıt oranının mevcut olduğu deneysel çalışmalarda Otto çevrimli motora göre neredeyse aynı termik verim değerleri elde edilmiş, ancak hava fazlalık katsayısının artması ile termik verimde iyileşme sağlanmıştır. Gülcan (2019), çalışmasında klasik Otto motorunda emme supabı geç kapatılması metodunu uygulayarak Atkinson çevrimi oluşturmuş [8] ve bu motor üzerinde benzin yakıtı ile yapmış olduğu deneylerde $\lambda = 1$ için en yüksek termik verim değerini % 27 olarak tespit etmiştir. Aynı motor üzerinde yürütülen bu çalışmada LPG kullanan ve Atkinson metodu ile çalışan deney motorunda Şekil 6.3'de görüldüğü gibi, $\lambda = 1$ için bu değer yine % 27 olmuştur. Hava fazlalık katsayısının bu motor üzerinde, termik verim parametresinde oluşturacağı etkinin gözlemlenmesi için, farklı HFK değerleri için ayrı ayrı deneyler yürütülmüştür. Bu deney serileri sonucunda, özellikle lambdanın 1,2 olduğu çalışma koşulunda meydana gelen termik verim oranı % 29 olarak ölçümlenmiştir. HFK değerinin artışına paralel olarak termik verim oranında da artış meydana gelmiştir.

Karışımın zenginleşmesi ile $\lambda=0,8$ 'e kadar özgül yakıt tüketimi ve termik verim kötüleşmiştir. $\lambda=0,8$ oranında özgül yakıt tüketimi 550,77 g/kWh'e kadar artarken, termik verim % 14,80 değerine kadar azalmıştır. Özgül yakıt tüketimi ve termik verim üzerinde

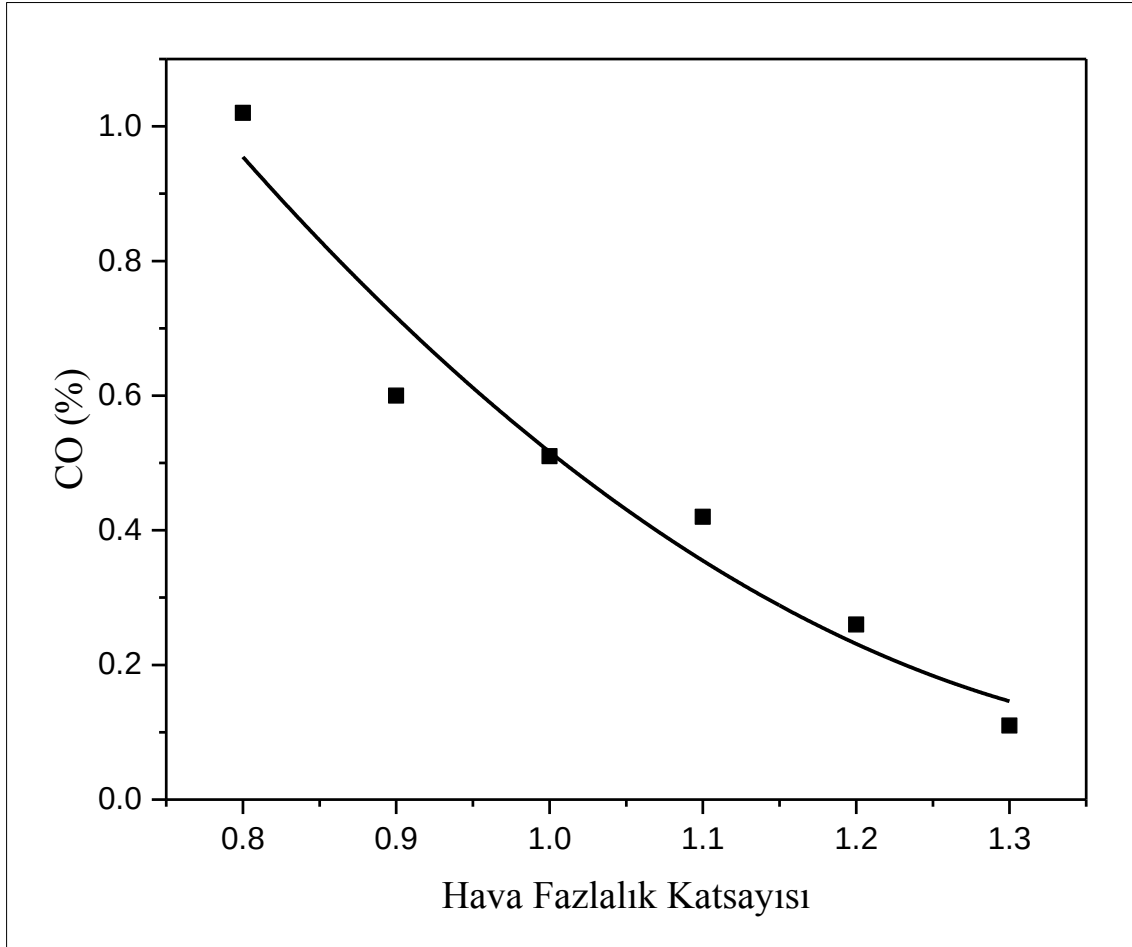
hava fazlalık katsayısının majör bir değişken olduğu ve bu katsayının artması ile motor performans parametrelerinde iyileşmeler olabileceği deneysel olarak gözlenmiştir.



Şekil 6.3. HFK bağlı olarak ÖYT ve termik verim değişimi

LPG yakıtının volümetrik verim üzerindeki olumsuz etkisine karşın, emme supabı geç kapatılması için verilen rötarın ve artan sıkıştırma oranının etkisi ile olumlu bir gelişme ortaya çıkmıştır. LPG kullanımına bağlı olarak Atkinson çevrimli motorda 2600 rpm motor hızında tam gaz keleşbeği açıklığında stokiyometrik H/Y oranında yapılan deneylerde, maksimum termik verim % 27 olarak elde edilmiştir.

CO ve HC emisyonları düşük yanma sonu sıcaklıkları ve yetersiz oksijen etkisi ile oluşan eksik yanma ürünleridir. Stokiyometrik hava/yakıt oranında HC emisyonları 116 ppm ve CO emisyonları % 0,26 olarak ölçülmüştür. En düşük özgül yakıt tüketiminin elde edildiği hava fazlalık katsayısı oranında ($\lambda=1,2$) HC emisyonları 76 ppm ve CO emisyonları (Şekil 6.4) % 0,26 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6.4. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak CO emisyonlarının değişimi

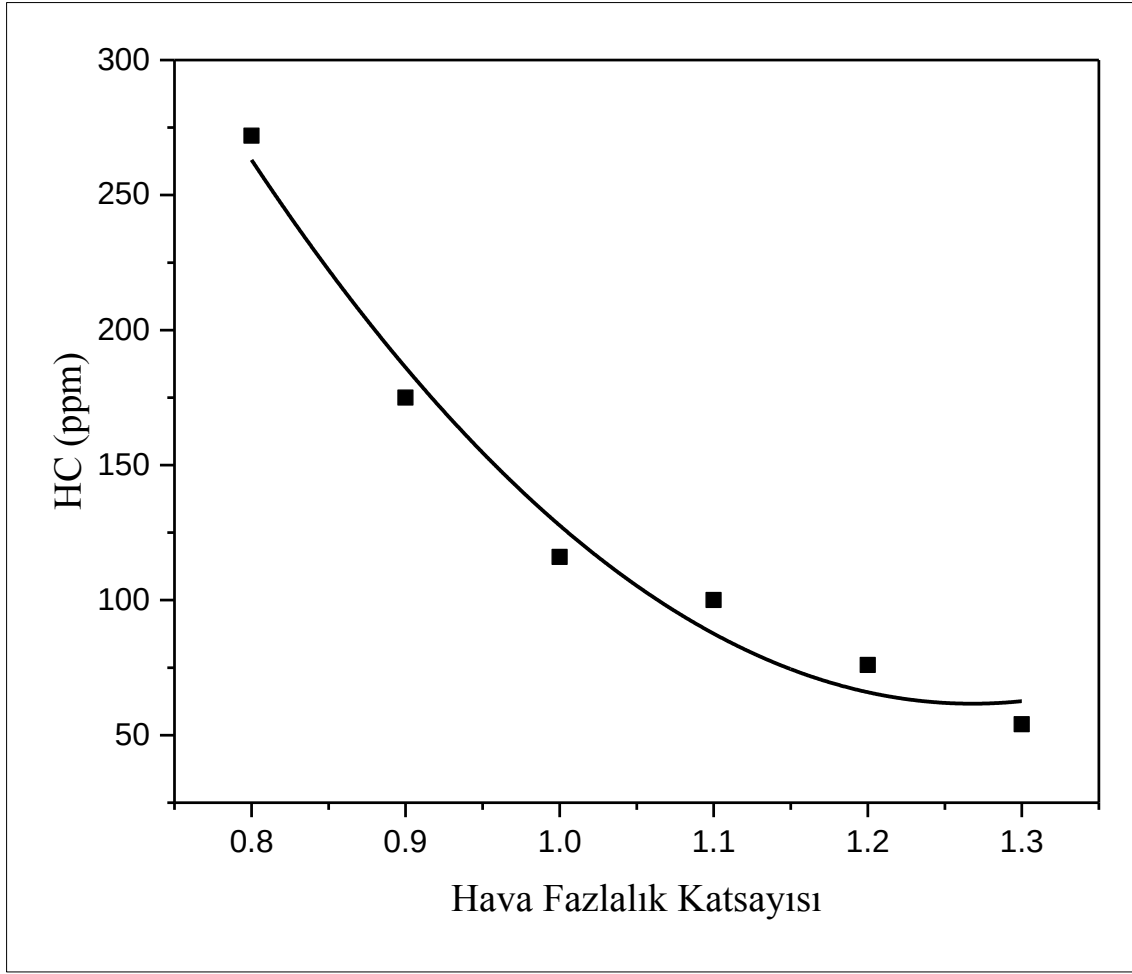
Hava fazlalık katsayısının 1,2 olduğu bölgede stokiyometrik orana göre CO emisyonları % 49 azalmıştır. Atkinson çevrimine göre çalışan tek silindirli, dört zamanlı motor üzerinde LPG yakıtının kullanılması sonucunda yanma sonu ürünlerinin HFK'ya bağımlı bir biçimde değişimi incelenmiş, özellikle λ 'nın 1,2 ve 1,3 değer aralığında HC ve CO emisyonlarının minimize olduğu ölçümlenmiştir. $\lambda=1,3$ değeri için 2600 rpm motor hızında yapılan deneylerde en düşük seviyede CO ve HC emisyonları elde edilmiştir.

Atkinson çevrimine göre çalışan ve benzin yakıtı kullanarak aynı motorda gerçekleştirilmiş çalışmadan [8] alınan verilere dayanarak, stokiyometrik hava/yakıt oranı için tam gaz kelebek açıklığında CO emisyonu % 0,7 ölçülmüştür. Aynı çalışma koşullarında ve motor hızında yapılan, LPG yakıtı kullanan deney sonuçlarında bu değer % 0,5 olarak ölçülmüştür. LPG yakıtının benzin yakıtına kıyasla daha düşük CO emisyonu salınımı yaptığı deneysel olarak gözlemlenmiştir [12].

Egzoz gazı içerisindeki kirletici unsurlar arasında eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarının oluşmasında en önemli etken, yanma odası içerisinde tam yanmanın gerçekleşebilmesi için gerekli olan oksijenin eksik olmasıdır. Yanma odası içerisinde oluşan alev, zamana bağlı olarak silindir içerisinde süpürmüş olduğu hacim miktarının daha düşük olması sebebiyle özellikle fakir karışım hacimlerinde CO moleküllerinin CO₂ moleküllerine dönüşüm reaksiyonu hız kaybetmekte ve miktarı azalmaktadır [12, 19]. Atkinson çevriminde, klasik Otto çevrimine kıyasla egzoz gazlarının daha uzun süre yanma odası içerisinde kalmasıyla oksidasyon reaksiyonu devam ederek, CO emisyonlarının azalmasına ve bu partiküllerin CO₂ moleküllerine dönüşmesine daha fazla olanak sağlanır [9, 13].

Hava fazlalık katsayısı, içten yanmalı motorlarda emisyon değerlerinin değişimleri üzerinde baskın bir parametre olup, doğrudan emisyon salınım miktarında belirleyici bir rol üstlenir. Yanma veriminin arttığı ve yanma sonu sıcaklıklarının daha fazla olduğu $\lambda=1,2$ oranı için yapılan deneysel çalışmalarda stokiyometrik hava fazlalık katsayısına göre HC emisyonlarında Şekil 6.5’de görüldüğü gibi % 35 azalma meydana gelmiştir. Yanma odası içerisinde, ateşlemenin meydana gelmesinden sonra oluşan alev hüzmesinin, türbülansın etkisi ile silindir cidarlarına ulaşma oranı, HC emisyon değeri için önemli bir parametredir [9, 10, 12, 13]. LPG yakıtı yanma odası içerisine tamamen gaz fazında alınmasından ve giriş basıncının daha yüksek olmasından dolayı daha iyi bir yanma gerçekleştirmeye olanak tanır. Bu sebeple stokiyometrik hava fazlalık katsayısına göre yanma sonu sıcaklıkları daha iyi ve HC emisyonları daha başarılı olmaktadır.

Atkinson çevrimine göre çalışan ve benzin yakıtı kullanarak aynı motorda gerçekleştirilmiş çalışmadan [8] alınan verilere dayanarak, stokiyometrik hava/yakıt oranı için 2600 rpm motor hızında yaklaşık 150 ppm olduğu görülmüştür. Aynı çalışma koşullarında LPG yakıtının kullanılması sonucunda açığa çıkan HC emisyon değeri Şekil 6.5’de de görüldüğü gibi 120 ppm seviyesinde gerçekleşmiştir. HC emisyon değerindeki bu azalma LPG kullanımına bağlı olarak % 20 azalma sağlamıştır.



Şekil 6.5. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak HC emisyonlarının değişimi

Geç emme supabı kapanması yöntemi ile oluşturulmuş Atkinson çevrimli motorda, özellikle sıkıştırma zamanında meydana gelen kompresyon kayıplarının etkisi azalmış ve performans parametreleri arasında gösterilen etkin sıkıştırma oranında azalma meydana getirmiştir [5, 6, 48, 49]. Bu etkinin sonucu olarak, yanma sonu sıcaklık ve basınçlarının hem genelinde hem de maksimum değerinde azalmalar görülmüştür. Benzinle çalışan bir klasik Otto çevrimli motorda, yanma sonu silindir içi sıcaklık ve basınçlarında meydana gelen azalmanın sonucu olarak, eksik yanma ürünlerinden birisi olan CO emisyonlarında artışın meydana gelmesi beklenmektedir [6, 8, 23, 29]. Hidrokarbon temelli yakıtların yanması sırasında teorik çevrimlerden farklı olarak eksik yanma gerçekleşmekte ve bu reaksiyonun sonucunda emisyon değerlerinde, özellikle CO miktarlarında artış gözlenmektedir. HC emisyonlarının artışında bir başka etmen olarak, yanma odası iç yüzey alanlarının, yanma odasına olan hacminin fazlalığı gösterilmektedir [5, 7, 50].

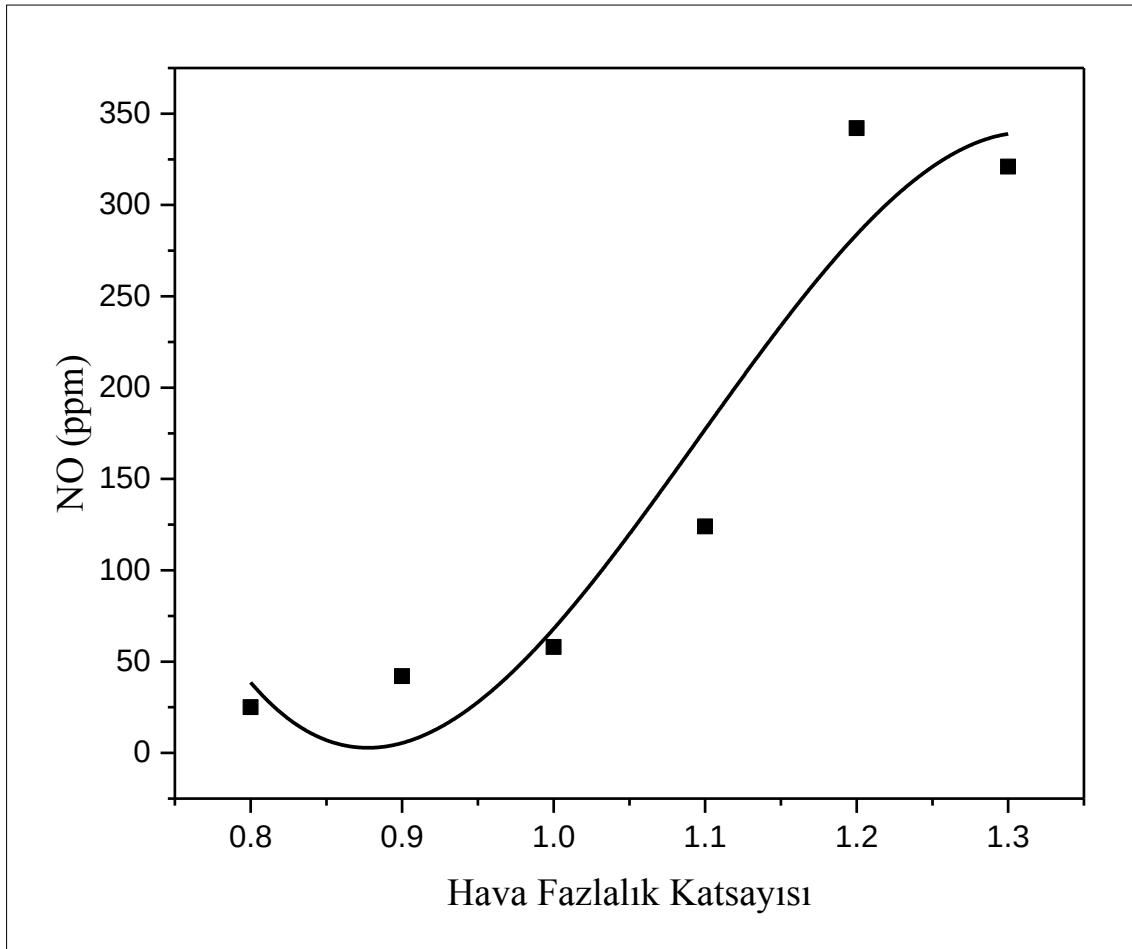
Yanma performans parametrelerinden birisi olan hava fazlalık katsayısının emisyonlar üzerinde etkinliği fazladır. Yapılan bu deneysel çalışmada, özellikle LPG kullanımının vermiş olduğu avantaj ile yanma verimliliği de artmıştır. Stokiyometrik hava/yakıt oranında 2600 rpm çalışma hızında yapılan deneylerde, egzoz gaz analizörü üzerinden 116 ppm seviyesinde HC emisyonu ölçümlenmiştir. Artan motor devrine bağlı olarak HC emisyonlarında azalma meydana gelmektedir [34,51]. Sabit motor devrinde farklı hava fazlalık katsayıları için HC emisyonu değişimlerine bakıldığında, artan hava fazlalık katsayısıyla doğru orantılı bir iyileşme görülmektedir. Yanma sonu sıcaklıklarının daha fazla olduğu $\lambda=1,2$ oranı için bu emisyon değerinde stokiyometrik hava-yakıt oranına göre % 35 iyileşme meydana gelmiştir. Bu değişim Gülcan (2019) tarafından yapılan Atkinson çevrimli motorlar ile ilgili deneysel çalışmasıyla paralellik göstermektedir. Gülcan (2019), çalışmasında [8] aynı motorda Atkinson çevrimi dönüşümü yapmış ve bu dönüşüm neticesinde HC partikül miktarında yaklaşık % 27 azalma meydana geldiğini belirtmiştir.

LPG ile çalışan bir içten yanmalı motorda, yakıtın gaz fazında silindir içerisine alınması, yakıtın yanma odasına giriş basıncının yüksek olması ve türbülans oluşumuna pozitif katkısı sayesinde HC emisyonlarında azalmalar meydana geldiği görülmüştür [9,12]. Özellikle orta ve yüksek motor devir aralıklarında, yanma odası içerisine alınan yakıt/hava dolgunun daha efektif dağılımı ve dolgu miktarının maksimum seviyeye yaklaşması sayesinde artan motor devrine doğru orantılı olarak alev huzmesi homojen bir biçimde oluşacak ve HC emisyonlarında düşüş meydana getirecektir.

Geometrik özellikleri aynı olan Otto çevrimli ve benzin yakıtlı [8], Otto çevrimli ve LPG yakıtlı [12], Atkinson çevrimli ve benzin yakıtlı [8] motor ile Atkinson çevrimli LPG yakıtlı motorların stokiyometrik H/Y oranında tam gaz keleşbeği açıklığında 2600 rpm motor hızında açığa çıkarttıkları HC emisyonu değerleri değişimi kıyaslandığında Atkinson çevrimli LPG yakıtı kullanan motorda en düşük seviyede oluşmaktadır.

NO_x emisyonları için önemli parametreler arasında yanma odası içerisine alınan hava miktarı ve yanma sonu sıcaklıkları yer almaktadır. Şekil 6.6'da NO_x emisyonları incelendiğinde, özellikle zengin yakıt/hava karışım bölgelerinde çok düşük değerlerde olduğu gözlenmektedir. Yanma sonu sıcaklığının ve oksijen yoğunluğunun arttığı fakir karışım bölgelerinde ise NO_x emisyonları artış göstermiştir. 2600 rpm motor hızında gerçekleştirilen deneylerde en düşük NO_x emisyonu $\lambda=0,8$ için yapılan çalışmada 25 ppm

olarak ölçülmüş olup, $\lambda=1,2$ oranında 342 ppm değerine kadar artış göstermiştir. Yanma sonu sıcaklık değerlerinin birer fonksiyonu olan NO_x emisyonlarının LPG kullanımı ile oluşumu, benzin motoruna nispeten daha düşük olmaktadır. Özcan (2019) çalışmasında LPG ve CNG yakıtlarının yanma sonu sıcaklıklarının, aynı motorda benzin yakıtı kullanılması ile ölçülen maksimum yanma sonu sıcaklığından daha düşük olduğu belirtmiştir [10].



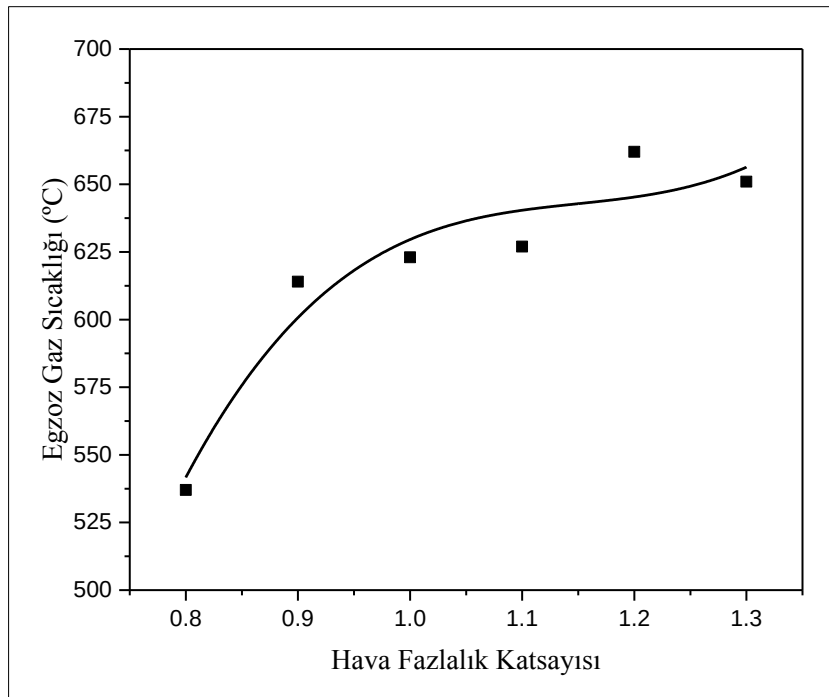
Şekil 6.6. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak NO_x emisyonlarının değişimi

Çalışma sonucunda, özellikle stokiyometrik hava/yakıt oranı için çalışma durumu kıyaslandığında, aynı motorda klasik Otto çevrimli çalışma yapıldığında 88 ppm seviyesinde NO_x emisyonu oluşurken, bu motorun Atkinson çevrimine dönüştürülmüş halinde stokiyometrik hava yakıt oranında 61 ppm olarak egzoz gaz analizöründen emisyon miktarı ölçümlenmiştir. Sonuç olarak LPG yakıtı kullanan Atkinson çevrimli motorda, NO_x emisyon değerlerinde % 31 dolaylarında iyileşme görülmüştür.

Tam gaz keleşi açıklığında yapılan deneysel çalışmalarda, aynı motorda LPG kullanımına bağlı olarak NO_x miktarının stokiyometrik hava yakıt oranında göstermiş olduğu değişimi zcan (2010) % 41 oranında azalma olarak ölçmüştür [10]. Aynı motorda LPG kullanımının NO_x emisyonları üzerindeki etkisini inceleyen Kunt (2019) ise % 22 oranında azalma gösterdiğini vurgulamıştır [12]. Tamamlanan deneysel çalışmada gerçekleşen NO_x emisyonu değerlerindeki iyileşmeler, bu çalışmalar ile örtüşmekte ve tutarlılık göstermektedir.

NO_x emisyonları üzerinde LPG yakıtının karakteristik özelliklerinin etkisinin yanı sıra bu çalışmada hava fazlalık katsayısının etkisi de gözlemlenmiştir. 2600 rpm motor hızında sabit bir devir aralığında yapılan deneylerde, artan HFK değerine bağlı olarak fakirleşen karışımda, yanma odası içerisinde oksijen moleküllerinin derişimi artmakta ve bu durum yanma sonu sıcaklıklarında artışa neden olmaktadır [52]. Tam tersi şekilde azalan HFK değeri için yapılan ölçümlerde ise bu emisyon değerinin azaldığı, $\lambda=0,8$ için yapılan çalışmada 25 ppm dolaylarında olduğu görülmüştür.

şekil 6.7’de ise hava fazlalık katsayısına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimi görülmektedir. En yüksek egzoz gaz sıcaklığı $\lambda=1,2$ oranında 662 °C olarak ölçülmüştür.



şekil 6.7. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının değişimi

Yanma odası içerisinde yakıt-hava karışımının farklı oranlarda uygulanması sonucunda, artan HFK değerine paralel bir biçimde, egzoz gaz sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir. Fakir karışım bölgelerinde yakıt moleküllerine oranla daha fazla havanın bulunması, bu çalışma koşulu için yanma reaksiyonunu hızlandırmakta ve yanma sonu sıcaklıklarını arttırmaktadır. LPG yakıtının alt ısı değeri benzin yakıtına kıyasla daha fazla olmasının etkisi eklenince, LPG dönüşümü yapılmış bir benzinli içten yanmalı motorda artan HFK değeri, daha yüksek yanma sonu sıcaklıklarının eldesini tetiklemektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Atkinson çevrimli motorlar, otomotiv firmaları tarafından genellikle hibrit elektrikli taşıtlarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada, yüksek verimlilik ve düşük emisyon değerleri ile dikkat çeken Atkinson çevrimli bir motorda, alternatif yakıtlar arasında özellikle çevreci olması ile bilinen LPG yakıtının kullanılabilirliği performans ve emisyonlar açısından test edilmiştir.

Geç emme supabı kapanması ile oluşturulan Atkinson çevrimli motorda, farklı hava fazlalık katsayılarına bağlı olarak motor performans ve emisyon parametreleri deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler maksimum motor torkunun elde edildiği, 2600 rpm sabit motor hızında ve hava fazlalık katsayısının 0,8-1,3 aralığında yapılmıştır. Tam gaz kelebek açıklığında yapılan deneylerde, motor torku, motor gücü, özgül yakıt tüketimi, termik verim, HC, CO ve NO_x emisyonlarının değişimi incelenmiştir.

Yanma sonu sıcaklıkları ve basıncında meydana gelen azalmanın ve LPG yakıtı kullanılması ile düşen volümetrik verimin etkisi ile motor gücünde düşüş meydana gelmiştir. Yapılan çalışmada $\lambda=0,9$ için maksimum motor torku 17,025 Nm olarak ölçülmüştür. Bu değer aynı motorun benzin yakıtı kullanan ve klasik Otto çevrimi ile çalışan versiyonundan [8] yaklaşık % 10 daha düşüktür.

Düşük ve orta devir aralığında motorun çalışması esnasında, emme supabı açık kalma zamanının daha uzun olmasının etkisiyle, motor çıkış milinden alınan efektif motor gücünde ve torkunda düşüş meydana gelmektedir. Silindir içerisine alınan yakıt/hava karışımının, emme supabının sıkıştırma zamanında da bir miktar açık kalması sebebi ile emme manifolduna geri gönderilmesi, bu düşüş üzerinde en büyük etmenlerdendir.

Minimum özgül yakıt tüketimi, hava fazlalık katsayısının 1,2 olduğu çalışma koşulunda 270,46 g/kWh olarak ölçülmüştür. Aynı HKF değeri için termik verim % 30,07 olarak hesaplanmıştır. Literatürde birçok çalışmada [4, 5, 19, 24], LIVC metodu uygulanması ile yakıt tüketiminde iyileşme meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca birçok çalışmada [10, 12, 16, 19] LPG yakıtının özgül yakıt tüketimi üzerine olan olumlu etkisi vurgulanmıştır. Özellikle $\lambda=1,2$ değerinde, özgül yakıt tüketiminde aynı motorun klasik Otto çevrimli versiyonuna [8] göre % 8 iyileşme gösterdiği görülmektedir. Motorda elektronik kontrollü

ve yakıt enjeksiyonlu motorlarda da kullanılan yeni nesil bir LPG kiti kullanımı ile özgül yakıt tüketiminde daha da iyileşme sağlanabilir. $\lambda=1,2$ için yapılan deneyler sonucunda, maksimum termik verim ve minimum özgül yakıt tüketimi elde edilmiştir. Bu lambda değerinde elde edilen motor torku, maksimum motor tork değerinin % 3 altındadır.

Stokiyometrik hava/yakıt oranı için yapılan deneylerde, aynı motorun benzinle çalışan klasik Otto çevrimli versiyonunda [8] % 27 termik verim hesaplanmış, aynı çalışma koşulları için Atkinson çevrimi ve LPG yakıtı kullanımı tercih edildiğinde % 27 termik verim görülmüştür. HFK değerinin termik verim üzerindeki etkisinin incelenmesi için farklı HFK koşullarında motor termik verimi hesaplanmıştır. Özellikle $\lambda=1,2$ koşulunda yapılan deneylerde termik verim değeri % 30 seviyesine kadar çıkmıştır. HFK değerinin artışına paralel bir biçimde termik verimde artış olduğu görülmüştür.

Stokiyometrik hava/yakıt oranında HC emisyonları 116 ppm ve CO emisyonları % 0,49 iken en düşük özgül yakıt tüketiminin elde edildiği hava fazlalık katsayısında ($\lambda=1,2$) HC emisyonları 76 ppm ve CO emisyonları % 0,26 olarak elde edilmiştir. Hava fazlalık katsayısının 1,2 olduğu bölgede stokiyometrik orana göre HC emisyonları % 35, CO emisyonları % 49 azalmıştır. Klasik Otto çevrimli motor üzerinde stokiyometrik H/Y oranında yapılan deneyler [8] ile aynı çalışma koşullarında LPG yakıtı kullanan Atkinson çevrimli motor karşılaştırıldığında NO_x emisyonlarında %31 düşüş meydana gelmiştir.

KAYNAKLAR

1. Alternative Fuels Data Center (2003), *Alternative Fuels Descriptions and Information* 2-4.
2. Avcı, A. (2003). Benzinli Motorlarda LPG Kullanımının Supaplar Üzerindeki Isıl Etkisinin İncelenmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 8(1), 14-21.
3. Atkinson, J., “Atkinson engine.” US patent 367496, 1887 25
4. Benajes, J., Serrano, J.R., Molina, S., Novella, R. (2009). Potential of Atkinson Cycle Combined with EGR for Pollutant Control in A Hd Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, 50, 174-183.
5. Feng, R., Li, Y., Yang, J., FU, J., Investigations of Atkinson Cycle Converted from Conventional Otto Cycle Gasoline Engine, *Sae Technical Paper* 2016-01-0680,
6. Zhao, J., Research and application of over-expansion cycle (Atkinson and Miller) engines, School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, *Applied Energy* 185 (2017) 300–319
7. Wang, C., Daniel, R. and Xu, H. (2012). Research of the Atkinson cycle in the spark ignition engine. *Sae Technical Papers*, 2012(1), 390.
8. Gülcan, H.E. (2019). *Otto Çevrimi İle Çalışan Buji Ateşlemeli Bir Motorun Atkinson Çevrimine Dönüştürülmesi Ve Testleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
9. Karamangil, M.I. (2007). Development of the auto gas and LPG-powered vehicle sector in Turkey: A statistical case study of the sector for Bursa, *Energy Policy*, 640–649.
10. Özcan F. (2010). Buji Ateşlemeli Bir Motorlarda *LPG ve CNG (Sıkıştırılmış Doğalgaz) Kullanımının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Gümüş, M., Tekin, M., (2001). *Çift Yakıtlı (Dizel+Doğal Gaz) Dizel Motorunun Yanma Ürünleri Analizi*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası VII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, 96-101, Bursa.
12. Kunt, M. (2019). *Hava Soğutmalı Bir Motorda Lpg Uygulamasının Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 24-32.
13. Sayın, C.; Çanakçı, M.; Kılıçaslan, İ.; Özsezen, N. (Mayıs, 2005) “Benzinli Bir Motorda Benzin+LPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi”, *Erciyes üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21 (1-2).

14. Pulkrabek, W.W., (2003). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. New Jersey, 229-261
15. Özdemir, A.O. (2014). *İçten Yanmalı Bir Motorda Atkinson Çevriminin Performans Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
16. İcingür, Y.; Dost, A. (2006). Buji İle Ateşlemeli Bir Motorda Propan ve Farklı Oranlarda Propan/Bütan Kullanımının Performansa Etkilerinin Deneysel Analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 303-309.
17. Manivannan, A. (2011). Numerical And Experimental Study of Extended Expansion Concept Applied to Lean Burn Spark Ignition Engine. *International Journal of Engineering*, 9(2), 1584-2665.
18. Holst,F. (2014). *Numerical and Experimental Investigation of the Atkinson Cycle on a 2.0 liter 4-cylinder Turbocharged SI-engine*. Master's Thesis in Automotive Engineering, Chalmers University Of Technology, Sweden.
19. Chen, L., Ge, Y., Sun, F. and Wu, C. (2006). Performance of an Atkinson cycle with heat transfer, friction and variable specific-heats of the working fluid, *Applied Energy*, 83(11), 1210-1221.
20. Demirci, K. (2013). *Buji ile Ateşlemeli Bir Motorda Miller Çevrimi Uygulaması, Performans ve Emisyon Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-11.
21. TÜPRAŞ A.Ş., *Yakıt Özellikleri Test Sonuç Tablosu*, İzmit, 1996.
22. Kosha, M., ve Pirouzpanah, V. (July 29-31, 1996). *Pollutants Emission Studies of Direct-Injection Diesel-LPG Engines*, Paper presented at Proceeding of the First International Energy and Environment Symposium, 1215-1221, Trabzon.
23. Yousufuddin, S.; Mehdi, N.S. Performance and Emission Characteristics of LPG-Fuelled Variable Compression Ratio SI Engine. *Turkish Journal Engineering Environmental Science* 32 (2008) 7 – 12.
24. Chandras, P., McCarthy Jr, J., Stretch, D., and Smith, B. (2018). Effect of intake valve profile modulation on passenger car fuel consumption. *Sae Technical Papers*, 379.
25. Cordier, M., Laget, O., Duffour, F., Gautrot, X., Francqueville, L. (2016). Increasing modern spark ignition engine efficiency: A comprehension study of high compression ratio and Atkinson cycle. *SAE Technical Paper*, 2016(1), 2172.
26. Erduranlı, P. (2003). *Buji ile Ateşlemeli Tek Silindirli Değişken Sıkıştırma Oranlı Bir Motorun Teorik Simülasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3, 56, 108, 101, 116.
27. Ferrey, P., Miehe, Y., Constensou, Y. and Collee, V. (2014). Potential of a variable compression ratio gasoline SI engine with very high expansion ratio and variable valve actuation. *Sae International Journal Engines*, 7(1), 468-487.

28. Devaud, G., Khajepour, A. and Li, Y. (2018). Realization of variable Otto-Atkinson cycle using variable timing hydraulic actuated valve train for performance and efficiency improvements in unthrottled gasoline engines. *Applied Energy*, 222(1), 199–215.
29. Yenitepe, R., Akdeniz, B. (2009). *Motorlu Araçlarda Yakıt Ekonomisi Ve İşletme Şartlarının Performansa Etkileri*, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumunda sunuldu 12-20, Karabük
30. Ayhan, M., Sekmen, P. (2009). *Buji ateşlemeli tek silindirli bir motorda doğalgazın alternatif yakıt olarak kullanılması*, 5. Uluslararası İleri Teknoloji Sempozyumunda sunuldu, Karabük.
31. Cho, S., Min, K., Lee, B., Oh, S., Seol, E., Shin, W., Song, C., Song, H., Son, J. And Woo, S., H. (2018). An experimental study on the effect of stroke-to-bore ratio of Atkinson DISI engines with variable valve timing. *SAE Technical Papers*, 2018(1), 1419.
32. Bayraktar, H., Durgun, O. (2003). Buji-ateşlemeli motorlar için alternatif yakıtların teorik değerlendirilmesi ve pratik kullanılabilirliği, *Mühendis ve Makine*, 45-533.
33. İnternet: CUSSONS Motor Test Cihazı Kullanım Kılavuzu, http://www.cussons.co.uk/education/products/automotive_technology/single_cylinder_engine_test_beds/p8160_single_cylinder_engine_test_bed.asp (2013) Son Erişim Tarihi: 11.20.2020
34. Sürmen, A., Borat, O., Öz, İ.H. (2008). *İçten Yanmalı Motorlar*, İstanbul/Türkiye: Birsen Yayınevi, 147, 234
35. Çelik B.Ve Çolak A. (2008) Buji Ateşlemeli Bir Motorda Alternatif Yakıt Olarak Saf Etanolun Kullanılması, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. 23(3), 619-626, Ankara.
36. Ergeneman, M., Soruşbay, C., (1996). Benzin Motorlu Taşıtların LPG Kullanımına Dönüşümü, *Mühendis Makine*, 37(441), 25-36
37. İcingür, Y., Haksever, R. (1998). Benzinli Motorlarda Sıvılaştırılmış Petrol Gazının Performans ve Emisyonlara Etkisinin Deneysel Analizi, *Politeknik Dergisi*, 5(3), 67-76.
38. Bosch BEA 350 Emission Analysis Users Manual. (2018).
39. Blends on Exhaust Emissions, (Jan 10-14 1988). *American Society of Mechanical Engineers Conference Paper*, 7(9), New Orleans, LA, USA,.
40. Bae, C., Koo, J. (2001, June). *Exhaust gas recirculation in a spark-ignition lpg engine*. Paper presented at The Third Asia-Pacific Conference on Combustion, Seoul.
41. Baydır Ş.A., Yücesu H.S. (2011, 16-18 Mayıs). *LPG yakıtlı motorda hava fazlalık katsayısı değişiminin açık kaynak kodlu modelleme aracı ile incelenmesi*, 6 th International Advanced Technologies Sempozyumu, Elazığ.

42. Yao M., Wang, H., Reitz R. Zhang, X. and Zheng, Z. (2016). Effects of late intake valve closing (LIVC) and rebreathing valve strategies on diesel engine performance and emissions at low loads, *Applied Thermal Engineering*, 98 (5), 310–319.
43. Coates, B. (2012). *Investigation Of Engine Design Parameters On The Efficiency And Performance Of The High Specific Power Downsized SI Engine*, Brunel University, UK.
44. Gordon, B., Hong, H. and Parvate-Patil, G. (2014). Review and analysis of variable valve timing strategies - eight ways to approach, *Journal of Automobile Engineering*, 218(10), 1179-1200.
45. Ghosh, T.K. and Prelas, M.A. (2009). *Thermodynamic cycles. Energy Resources and Systems*, 1(4), 1-99.
46. Sarıdemir, S. *İçten yanmalı dört zamanlı bir motor için supap mekanizması tasarımı*, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2009).
47. Üst, Y. (2009). A comparative performance analysis and optimization of the irreversible Atkinson cycle under maximum power density and maximum power conditions. *International Journal of Thermophysics*, 30(3), 1001-1003.
48. İnternet:URL:<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.wikizero.net%2Findex.php%3Fq%3DaHR0cHM6Ly9lbi53aWtpcGVkaWEub3JnL3dpa2kvQXRraW5zb25fY3ljbGU&date=2018-06-20>, Son Erişim Tarihi: 20.06.2018.
49. İnternet:URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fwww.mechadyne-int.com%2Freference%2Fthrottle-less-operation%2Fintake-valve-closing-strategies%2F&date=2018-06-20>, Son Erişim Tarihi: 20.06.2018
50. Piel, W. Transportation Fuels of the Future. *Fuel Processing Technology*, 71, 167-179, 2001
51. Manivannan, A. *Numerical And Experimental Study Of Extended Expansion Concept Applied To Lean Burn Spark Ignition Engine*, University College Of Engineering, Nagercoil, India.
52. Yücesu, H., S., Okur, M. ve Topgül, T. (2005). Buji ateşlemeli bir motorda çalışma parametrelerinin egzoz emisyonlarına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. *Politeknik dergisi*, 8(1), 43-47.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÖK, Fatih Çağatay
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.09.1993, Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0(538) 878 79 18
e-mail : cagataygok01@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek Lisans	Ankara Üniversitesi / Tarım Mak.ve Tek. Müh.	2017
Lisans	Süleyman Demirel Üniversitesi / Otomotiv Mühendisliği	2015
Lise	Etlik Lisesi	2011

İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2019-Halen	Bozankaya A.Ş.	Tasarım Mühendisi
2017-2019	Pi Makina A.Ş.	Ar-Ge Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Fotoğrafçılık, kamp, trekking



GAZİ GELECEKTİR...