



**LPG KULLANILAN MOTORLARDA
HAVA YAKIT ORANININ KONTROLÜ**

Hüseyin KÖKSAL

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Enerji Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Alirıza KALELİ
2016
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LPG KULLANILAN MOTORLARDA HAVA YAKIT ORANININ
KONTROLÜ**



Hüseyin KÖKSAL

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Enerji Bilim Dalı**

**ERZURUM
2016**

Her hakkı saklıdır



TEZ ONAY FORMU




LPG KULLANILAN MOTORLARDA HAVA YAKIT ORANININ KONTROLÜ

Yrd.Doç.Dr. Alırıza KALELİ danışmanlığında, Hüseyin KÖKSAL tarafından hazırlanan bu çalışma, 22/09/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Anabilim Dalı, Enerji Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof.Dr.Kadir BİLEN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Eyüphan MANAY

Üye : Yrd.Doç.Dr. Alırıza KALELİ

İmza : 
İmza : 
İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 22.09/2016 tarih ve 36.../...44..... nolu kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LPG KULLANILAN MOTORLARDA HAVA YAKIT ORANININ KONTROLÜ

Hüseyin KÖKSAL

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Enerji Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Alırıza KALELİ

İçten yanmalı motorlarda çıkış parametrelerinin ölçüm ve kontrol yöntemleri, performans ve emisyon karakteristiklerinde iyileşmeler elde edebilmek için çok önemlidir. Hem buji ateşlemeli hem de sıkıştırma ateşlemeli motorlarda farklı çalışma koşullarına göre hava-yakıt oranı, ateşleme avansı, enjeksiyon süresi, subap zamanlaması, egzoz gazı resirkülasyon oranı ve sıkıştırma oranı gibi çalışma parametrelerinin etkin bir şekilde uyarlanması motor karakteristiklerinde ciddi ölçülerde artış sağlar. Bu parametrelerden biri de hava-yakıt oranıdır ve özellikle buji ateşlemeli motorlarda mükemmel performans ve egzoz emisyon karakteristikleri elde edebilmek için kusursuz bir şekilde kontrol edilmelidir. Benzin ile çalıştırılan buji ateşlemeli motorlarda sitokiyometrik hava yakıt oranı 14.7 iken bu değer LPG'li motorlarda LPG'nin ağırlıklı bileşenlerinden ikisi Propan ve Bütanın karışımındaki yüzdelerine göre değişir. Katalitik konvertörün verimliliğini optimize edebilmek için, ki böylece egzoz emisyonları da minimize edilmiş olur, LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorda sitokiyometrik hava-yakıt oranı sağlanmalıdır. Benzin bileşimi nispeten sabit iken güçlü bir hava yakıt kontrol sistemi oluşturmak mümkündür. Fakat LPG bileşimi önemli ölçüde değişkenlik arz eder ve LPG bileşimindeki bu değişkenlik hava yakıt oranı kontrol stratejisini etkiler. Geleneksel LPG dönüşüm sistemlerinde, LPG'nin sıvı fazdan gaz fazına geçmesi için kullanılan regülatör bulunur. Sıralı çok-nokta port püskürtmeli LPG sistemlerinde, bağımlı bir elektronik kontrol ünitesi bulunmaktadır ve bu ünite benzin enjeksiyon sistemi içinde yer alan asıl elektronik kontrol ünitesinin kontrolündedir. Asıl elektronik kontrol ünitesi benzin enjektörleri için darbe süresini tayin eder ve bağımlı elektronik kontrol ünitesi bu bilgiyi bir katsayı ile çarparak çalışma şartlarını belirler. Bu çalışmanın amacı, LPG dönüşümü yapılmış buji ateşlemeli bir motorda hava fazlalık katsayısını geniş band oksijen sensörü kullanarak kontrol ederek kontrol kalitesini artırmaktır. Bu çalışmada, sistem tanımlama teknikleri kullanılarak hava fazlalık katsayısı PID denetleyici ile ilişkilendirilmiştir. Bu şekilde tasarlanan kontrol algoritmaları daha sonra LabView ortamında oluşturulmuş ve alan programlanabilir kapı dizileri (FPGA) şasisine yüklenmiştir.

2016, 69 sayfa

Anahtar Kelimeler: İçten Yanmalı Motorlar, Hava-Yakıt Oranı, Genişband O₂ sensörü LPG, PID Kontrol.

ABSTRACT

Master Thesis

AIR FUEL RATIO CONTROL IN LPG INJECTED SI ENGINE

Hüseyin KOKSAL

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Energy Branch of Science

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Alirıza KALELİ

The measuring and control methodologies of the internal combustion engine operating parameters are very important to improve performance and emission characteristics. Effectively adjusting the operating parameters such as air– fuel ratio, spark timing, fuel injection timing, valve timing, exhaust gas recirculation ratio and compression ratio at different operation conditions in spark and compression ignition engines improves significantly the engine characteristics. One of them is air-fuel ratio, and it must be precisely controlled especially in spark combustion engines in order to achieve excellent performance and exhaust emission characteristics. Stoichiometric air-fuel ratio of gasoline fueled spark ignition engines is 14.7, whereas it depends on the major components of LPG with the proportion of propane and butane. In order to ensure the catalytic converter efficiency is optimized, and thus the exhaust emissions are minimized, the stoichiometric air-fuel ratio should be provided in LPG fueled spark ignition engines. As the gasoline composition is relatively constant, it is possible to produce a robust air-fuel ratio control system. However the composition of LPG is considerably more variable, and change in the component of LPG affects the control strategy of the air-fuel ratio. In the conventional LPG fuel conversion systems, there is a regulator/vaporizer which is used for changing the phase of LPG from liquid to gaseous form. In the sequential multi-point port LPG injection systems, there is a slave electronic control unit and it is under the control of master electronic control unit designed for the gasoline injection systems. The master electronic control unit determines the pulse time for gasoline injectors, then the slave LPG electronic control unit uses that information and multiplies it by a factor that accounts for the different duty cycle of the LPG regulators. The main purpose of this study is to produce an air-fuel ratio control system for LPG fueled engines by using a wideband lambda sensor to increase the quality of the control. In this study, the air-fuel ratio has been correlated with PID controller by using system identification techniques. The control algorithms designed by this way have been built up in LabVIEW platform, and installed in the field programming gate array (FPGA) chassis.

2016, 69 pages

Keywords: Internal Combustion Engines, Air-Fuel Ratio, Wide-Band O₂ sensor, LPG, PID Control

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın planlanması ve yürütülmesinde her konuda bilgi ve birikimlerini esirgemeyen teővik, tavsiye ve yardımlarını eksik etmeyen, insani ve ahlaki değerleri ile de örnek edindiğim, yanlarında çalışmaktan onur duyduğum danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Alırıza KALELİ'ye ve Sayın Prof. Dr. Mehmet Akif CEVİZ teőekkürlerimi sunarım. Yüksel Lisans çalışmam boyunca bana destek olan Sayın Prof. Dr. Kadir BİLEN'e, tüm hayatımın boyunca minnet duyacağım Sayın Prof. Dr. Kemal ÇOMAKLI ve diğer Atatürk Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyeleri'ne, fikir ve eleştirilerinden faydalandığım Sayın Yrd. Doç. Dr. Eyüphan Manay'a öz verili yardımlarından dolayı çalışma arkadaşlarımdan Sayın Arş. Gör. Erdoğan GÜNER ve Sayın Arş. Gör. Galip KALTKAKKIRAN'a, teőekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmalarım sırasında maddi ve manevi fedakârlıklarını esirgemeyen aileme teőekkürlerimi sunarım.

Hüseyin KÖKSAL

Ağustos, 2016

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç	8
1.2. Kapsam	8
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Yanma	9
2.2. Yanma Kimyası.....	10
2.2.1. Stokiometrik hava.....	13
2.2.2. Hava fazlalık katsayısı (λ).....	13
2.2.3. Tam yanma	13
2.2.4. Zengin yanma	14
2.2.5. Fakir yanma	14
2.2.6. Hava-yakıt oranı	15
2.2.7. Yakıt-hava oranı	15
2.3. Yanma Stokiometrisi	15
2.4. Hava Fazlalık Katsayısı ile Egzoz Emisyonları Arasındaki İlişki	20
2.4.1. Karbon monoksit	21
2.4.2. Azot oksitler	22
2.4.3. Hidro karbonlar	22
2.5. Sistem Tanımı ve Hava Fazlalık Katsayısı Kontrolü	23
2.5.1. Ortalama değer motor modeli.....	23
2.5.2. Hava akışı dinamiği.....	25
2.5.3. Yakıt yolu dinamiği.....	27
2.5.4. Krank mili dinamiği	28

2.5.5. Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi.....	30
2.5.6. PID.....	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	35
3.1. Deneysel Yöntem	35
3.2. Deneylerde Kullanılan Cihaz ve Yazılımlar	36
3.2.1. Emme havası debi sensörü	37
3.2.2. Tork sensörü	38
3.2.3. Veri toplama kartı.....	39
3.2.4. Geniş-bant lamda sensörü	41
3.2.5. Oksijen sensör modülü	44
3.2.6. Port yakıt enjektör sürücü modülü	45
3.2.7. Analog giriş modülü.....	47
3.2.8. Fpga tabanlı şasi	48
3.2.9. Kontrol sistemi ve tasarlanan yazılımlar	50
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	58
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	70

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

η	Hacimsel verim
λ	Hava fazlalık katsayısı
ε	Püskürtülen yakıtın buhar fazında silindir içerisine yönelen oranı
ω_n	Motor devir sayısı(Devir/dakika)
τ_y	Yakıtın buharlaşma hızı sabiti
A_t	Gaz kelebeği kesit alanı(m ²)
I_p	Geniş band oksijen sensörü çıkış akımı(mA)
K_D	Türev kazanç katsayısı
K_I	İntegral kazanç katsayısı
K_P	Oransal kazanç katsayısı
P_a	Atmosfer basıncı(Pa)
P_b	Manifold basıncının atmosfer basıncına oranı
P_m	Manifold basıncı(Pa)
T_D	Türev zaman sabiti
T_I	İntegral zaman sabiti
T_a	Atmosfer havası sıcaklığı(K)
T_m	Manifold içerisindeki hava sıcaklığı(K)
U_s	Dar bant oksijen sensörü çıkış voltajı(V)
V_c	Silindir hacmi(m ³)
V_m	Manifold hacmi(m ³)
c_y	Yanma verimi
f_λ	Tork üretiminde ateşleme avansı fonksiyonu çarpanı
f_s	Tork üretiminde hava fazlalık katsayısı fonksiyonu çarpanı
m_h	Manifolda yönelen hava miktarı
m_i	Silindir içerisine yönelen hava miktarı
m_y	Silindir içerisine giren yakıt miktarı
m_{yf}	Hava yolu çeperlerinde birikmiş yakıt miktarı
t_d	Yakıt enjeksiyonu ile tork üretimi arasındaki gecikme zamanı

u_i	Yakıt enjeksiyon komutu
τ_e	Silindir içerisinde üretilen tork(N.m)
τ_f	Sürtünme torku(N.m)
τ_l	Motor yükü(N.m)
T_{enj}	Model enjeksiyon süresi
J	Krank mili atalet momenti
Q	Birim kütle havanın tam yanması durumunda açığa çıkan ısı enerjisi(J)
R	Gaz sabiti
θ	Gaz kelebeği pozisyon açısı($^{\circ}$)
κ	Özgül ısıların oranı
ψ	Darboğaz akış fonksiyonu
ϕ	Eküvalans oranı

Kısaltmalar

ECU	Motor Kontrol Ünitesi
FPGA	Alan Programlanabilir Kapı Dizileri
HFK	Hava Fazlalık Katsayısı
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
PFI	Port Yakıt Enjektör Sürücüsü
PID	Oransal, İntegral ve Türevsel Denetleyici Yöntemi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Hava fazlalık katsayısı ile CO, HC ve NO _x emisyonlarının değişimi	21
Şekil 2.2. Buji ateşlemeli motor sisteminin basitleştirilmiş şeması.....	24
Şekil 2.3. Kısmi basınç (P _b)'a karşılık ψ fonksiyonu	26
Şekil 2.4. Yakıt enjeksiyon denetim sistemi şeması	28
Şekil 3.1. Emme havası debi sensörünün genel görünümü	37
Şekil 3.2. Tork sensörünün genel görünümü	39
Şekil 3.3. Veri toplama kartının görünümü	40
Şekil 3.4. Geniş Bant Oksijen Sensörü	42
Şekil 3.5. Dar bant O ₂ sensörü voltaj(V)/ lambda(λ) grafiği.....	42
Şekil 3.6. Dar band O ₂ sensörü voltaj değişimi.....	43
Şekil 3.7. Dar bant O ₂ sensörü voltaj(V)/ lambda(λ) grafiği.....	43
Şekil 3.8. NI 9757 O ₂ sensör modülü	45
Şekil 3.9. Port yakıt enjektör sürücü modülü.....	45
Şekil 3.10. PFI modülü girişleri.....	46
Şekil 3.11. LPG enjektörleri ile port yakıt sürücü modül bağlantısı	46
Şekil 3.12. Analog giriş modülü	47
Şekil 3.13. Disk dış yapısı	47
Şekil 3.14. Krank mili sensöründen alınan sinyal biçimi	48
Şekil 3.15. Krank sensörü çıkış analog sinyali ve dijitalleştirilmesi	48
Şekil 3.16. Compact Rio gömülü sistem şasisinin görüntüsü.....	50
Şekil 3.17. Oluşturulan simulink programı öbek şeması	52
Şekil 3.18. Labview görsel programı üzerinde oluşturulan projenin pencere görüntüsü	53
Şekil 3.19. Ana programın arka plan şeması	54
Şekil 3.20. Ana program ilk ekran görünümü	55
Şekil 3.21. Hava fazlalık katsayısı grafiği	56
Şekil 3.22. Gaz kelebeği kontrol programı ön pencere görüntüleri.....	56
Şekil 3.23. O ₂ Modülü programı arka plan görüntüsü.....	57
Şekil 4.1. Model parametreleri belirlenirken kullanılan gaz kelebeği sinyali	58

Şekil 4.2. Deneysel devir verisi(ω_d) ile model devir çıktısı(ω_s)	59
Şekil 4.3. Deneysel manifold basınç verisi(P_d) ile model manifold basınç çıktısı(P_s) ...	59
Şekil 4.4. Modele gönderilen gaz kelebeği sinyali	60
Şekil 4.5. Model hava fazlalık katsayısı (λ) çıktısı.....	61
Şekil 4.6. Model enjeksiyon süresi(T_{enj}) çıktısı	61
Şekil 4.7. Yüksüz 1500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	62
Şekil 4.8. %10 ile 1500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	63
Şekil 4.9. Yüksüz 2000 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	63
Şekil 4.10. %10 yük ve 2000 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	64
Şekil 4.11. Yüksüz 2500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	64
Şekil 4.12. %10 yük ve 2500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Motor yakıtı olarak LPG'nin en çok kullanıldığı ülkeler ve araç sayıları	2
Çizelge 1.2. Ülkelere göre LPG'nin propan ve bütan oranları	4
Çizelge 3.1. Deneylede kullanılan motora ait teknik özellikler	36
Çizelge 3.2. Emme havası debi sensörünün teknik özellikleri	38
Çizelge 3.3. Tork sensörünün teknik özellikleri	39
Çizelge 3.4. PCIe-6363 modeli veri toplama kartının teknik özellikleri	40
Çizelge 3.5. Oksijen sensörü teknik özellikleri	44
Çizelge 4.1. Özyinelemeli en küçük kareler yöntem ile belirlenen parametre değerleri	58
Çizelge 4.2. PID kontrol ile elde edilen HFK varyans değerleri	65

1. GİRİŞ

Dünya üzerinde artan nüfus, büyüyen ekonomi, gelişen endüstri dinamiklerine paralel olarak enerji ihtiyacı da her geçen gün artmaktadır. Bir ülke için enerji tüketiminden yola çıkarak gelişmişlik ve ekonomik büyüme hakkında yorum yapılabilir. Dünya enerji tüketiminin yaklaşık %40'ı en büyük iki ekonomi (Çin, Amerika) tarafından gerçekleştirilir. Sınırlı bir enerji kaynağı olan fosil kökenli yakıtlar toplam enerji ihtiyacının büyük çoğunluğunu karşılamakta iken alternatif enerji kaynaklarının değerlendirilmesi ve mevcut kaynakların daha verimli bir şekilde kullanılması günümüz için bir hedef ve geleceğimiz için bir mecburiyettir. Aksi halde oluşturulan zararlı atıkların çevremizi ve sağlığımızı tehdit edeceği, küresel ısınma sonucunda yeryüzünde var olan dengenin bozulacağı bilimsel bir gerçektir.

Dünya genelinde harcanan toplam enerji miktarının yaklaşık üçte biri taşımacılık sektörü için gereken enerji ihtiyacını karşılamaktadır. Enerji tüketiminin önemli bir kısmı, taşımacılık sektöründe çoğunlukla fosil kökenli yakıt kullanımı ile gerçekleşir. Bu alanda en yaygın enerji dönüşüm sistemi olan içten yanmalı motorlarda enerji kaynağı olarak %95 oranında fosil kökenli yakıtlar kullanılmaktadır. Büyüyen taşımacılık sektöründe, alternatif enerji dönüşüm tasarımlarının kullanımının yaygınlaşmasının zaman alacağı da bir gerçek iken içten yanmalı motorlara bağımlılık devam edecektir.

Taşımacılık sektörünün çevresel sorunların büyük bir sebebi olduğu bilinmektedir. Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) istatistiklerine (2015) göre küresel ısınmada başrolü oynayan karbondioksit (CO₂) salınımının %23'lük bir kısmı bu sektör ile gerçekleşmektedir. İçten yanmalı motorlar üzerinde yapılan çalışmalara bağlı olarak enerji dönüşüm sistemlerinde tüketilen yakıt ve çevreye atılan zararlı egzoz gazı salınımlarını azaltabilmek mümkündür. Gelecek için tahmin edilen senaryolara göre CO₂ salınımını azaltıcı yönde ortak hedefler belirlenmekte ve bu yönde standartlar oluşturulmaya devam edilmektedir. Bu hedeflere yönelik çalışmalar alternatif yakıt

arayışı çerçevesinde veya daha kontrollü ve verimli bir enerji dönüşümü elde etmek yönünde, ya da her iki uygulamayı da içererek sürdürülmektedir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan yakıtlar arasında birçok farklı alternatif yakıt seçeneğinin yanı sıra Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (LPG) kullanımı ciddi boyutlardadır. Buji ateşlemeli motorlarda LPG, tüketim sıralamasında benzinden sonra gelmesine rağmen otomotiv sektöründeki LPG tüketim payı artarak devam etmektedir (Anonim 2014). Ayrıca sürekli katılan emisyon standartları daha çevreci bir yakıt olan LPG'nin önemini daha da artıracığına dair ipucu vermektedir.

Motorlarda LPG kullanımı dizel araçlarda çift yakıt kullanımı şeklinde, benzinli araçlarda ise LPG dönüşüm sistemlerinin motora uygulanmasıyla elde edilir. Avrupa'da LPG'li araç sayısı 10 milyonun üzerindedir. Dünya genelinde ise bu rakam 25 milyona ulaşmıştır. Bazı ülkelerde son tüketici fiyatı olarak da oto gazın avantajlı olması bu ülkelerdeki otomotiv sektöründe kullanım oranını artırmıştır. Çizelge 1 incelendiğinde motor yakıtı olarak LPG'yi kullanan araç sayısı en fazla Türkiye'dedir. Ayrıca bu alanda tüketim sıralamasında da ülkemiz önemli bir konumdadır (Ceviz *et al.* 2015). Dönüşüm uygulaması bilinçsiz bir şekilde yapıldığı takdirde daha az zararlı emisyon değerleri ile bilinen oto gazın bu avantajı ortadan kalkacaktır. Bu sebeple LPG dönüşümü yapılmış bir içten yanmalı bir motorda optimum çalışma şartlarına motor üzerindeki ateşleme sistemi ile beraber yakıt sisteminin tam adaptasyonu sonucunda ulaşılabileceği bilinciyle hareket etmek gereklidir (Raslavičius *et al.* 2014).

Çizelge 1.1. Motor yakıtı olarak LPG'nin en çok kullanıldığı ülkeler ve araç sayıları (Ceviz *et al.* 2015)

Ülkeler	LPG Tüketimi (x10 ³ Ton)	Tüketim Oranı	Araç sayısı (x10 ³)
Güney Kore	3987	15.5	2433
Rusya	2850	11.0	3000
Türkiye	2650	10.3	3935
Tayland	1775	6.9	1020
Polonya	1575	6.1	2750
Dünya Geneli	25802	100	24911

Kullanılan LPG dönüşüm sistemleri de gelişen motor teknolojisiyle paralel olarak değişmektedir. Karbüratörlü araçlarda kullanılan sistemler ilk LPG dönüşüm sistemleridir. Daha sonra manifold basıncı bilgisini kullanarak sisteme ilave edilen LPG enjektörlerini yöneten elektronik kontrol ünitesinin (ECU) bulunduğu ikinci nesil sistemler geliştirilmiştir. Daha yeni nesil teknolojilerde LPG ECU'sü ilaveten egzoz gazları içerisindeki oksijen yoğunluğuna, gaz kelebeği pozisyonuna, devir sayısı bilgisine ve emme havası debi miktarı gibi birçok parametreden faydalanır. Bu bilgilerin yanında benzin kontrol ünitesinde oluşturulan enjeksiyon süresi de dikkate alınır, bu bilgiler LPG kontrol ünitesinin belleğinde var olan enjeksiyon tabloları ile karşılaştırılarak ideal hava yakıt karışımının elde edilmesi sağlanır (Masi 2012).

LPG bileşimi incelendiğinde ağırlıklı olarak Propan (C_3H_8) ve Bütan (C_4H_{10})'dan oluşmaktadır. Bu bileşim üretildiği ham petrol veya doğalgaz kaynağının özelliklerine ve rafineri işlemine göre değişim gösterebilir (Masi 2012). Motor yakıtı olarak da LPG ile ilgili üretilen standartlar kompozisyon ile ilgili bir sınırlama getirmemektedir. Bu standartlarda yakıt özellikleri ile ilgili sınırlamalar söz konusudur (Anonim, 2012). Dolayısıyla soğuk iklim bölgelerinde bulunan ülkeler propan oranını artırmakta diğer taraftan daha sıcak bölgelerde ise bütan oranı daha yüksek olan yakıtlar kullanılmaktadır. Hatta ülkemizde olduğu gibi kış mevsimi için geliştirilen LPG bileşimi ile yaz mevsimi için uygulanan LPG bileşimleri de birbirinden farklılık gösterebilmektedir (Çizelge 1.2). Oto gaz içeriğinin bu denli farklılık içermesi buji ateşlemeli motorlarda hem emisyon hem de verimlilik açısından önemli bir parametre olan ideal hava yakıt karışımı (sitokiyometrik) elde etmeyi zorlaştırır.

Oto gaz dönüşümü yapılmış bir araçta kurşunsuz benzin tüketen araçlara göre özgül yakıt tüketimi %28.38, ulaşım maliyetleri %47 oranında azaltılabilir (Sulaiman *et al.* 2013). Bu avantajların yanı sıra LPG yakıtlı motorların çıkış güçleri benzin motorlarından yaklaşık %5-10 aralığında daha düşüktür. Çünkü LPG emme manifoldu içerisinde (benzine göre) %15-20 oranında daha fazla hacim kaplamaktadır. Bu durum, yakıt-hava karışımının enerji yoğunluğunu düşürmektedir ve silindire her bir çevrimde

alınan enerji miktarı azaldığı için motor çıkış gücü de azalmaktadır (Ceviz and Yüksel 2006; Ceviz *et al.* 2014).

Çizelge 1.2. Ülkelere göre LPG'nin propan ve bütan oranları (Kocagöz 2009)

Ülkeler	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

LPG yakıtının özellikle buji ateşlemeli motorlarda tek veya çift yakıt olarak kullanımı durumunda ortaya çıkan performans ve emisyon karakteristiklerindeki değişim üzerinde birçok çalışma yürütülmüştür. Yapılan bu çalışmalar ile LPG'nin motor performansı, yanma karakteristikleri ve egzoz emisyonları konusunda ciddi bilgi birikimi oluşmuştur. Literatürdeki çalışmalarda LPG kullanımı sonucunda motor karakteristikleri ve emisyon değerlerindeki değişimi deneysel olarak inceleyen araştırmacıların yanında, sadece simülasyon sonuçlarına yer veren uzmanlarda bulunmaktadır. Ayrıca benzinli motorlarda hava yakıt oranı ve hava yakıt oranının kontrolü üzerinde birçok çalışma bulunmaktadır. Aşağıda bu kapsamda yapılan çalışmalar tanıtılacaktır.

Sayın vd (2006)'nin çalışmasında, benzin ile LPG karışımının farklı hava yakıt oranlarındaki yanma ürünlerini bilgisayar ortamında belirlenmiştir. Karışımda adım adım benzin oranını azaltıp LPG oranını artırırken karışımın enerji yoğunluğu sabit tutulmuştur. Ayrıca yakıt karışım oranının değişiminin emisyon değerlerine etkisini yanma reaksiyonu sıcaklığını 1000- 3500 K aralığında değiştirirken incelemiştir. Referans olarak %100 benzin kullanıldığı durumdaki sonuçları kullanmıştır. Fakir

karışımlarda azot oksit (NO_x) oluşumu ideal karışımlara kıyasla daha fazla iken, karbon monoksit (CO) oluşumu daha zengin karışımlarda fazla çıkmıştır. Ayrıca sıcaklık artışıyla her iki yanma ürününde artış gözlemlenmiştir.

Özcan (2010) çalışmasında; buji ateşlemeli bir motorun matematiksel modeli oluşturulmuş ve çevrimsel analizi yapılmıştır. Sıvılaştırılmış petrol gaz ile sıkıştırılmış doğal gazı (CNG) yakıtlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki farklılıklarına yer verdiği matematiksel modelde, bu yakıtlarının kullanımı ile silindir basınç değişimi, indike güç ve efektif güç gibi performans parametrelerinin değişimini gözlemiştir. Ayrıca, oluşturulan model ile elde ettiği egzoz emisyonlarında ortaya çıkan değişiklikleri belirlemiştir. Yapılan çalışma sonuçlarına göre; maksimum silindir basıncında benzine göre LPG kullanımında ortalama %4,46, CNG kullanımında ise %7,26'lık bir azalma meydana gelebilmekte, motor gücünde ise benzine göre LPG'de kullanımında %4,93, CNG'de ise %7,65 azalma ortaya çıkabilmektedir. Benzine ile kıyaslandığında özgül yakıt tüketiminde de LPG'de ortalama %5,88, CNG'de ise ortalama %17,64, NO emisyonlarında ise %42,41, CNG kullanımı ile de %91,96 oranında azalma olduğunu göstermiştir.

Balki (2005) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıkıştırma oranına sahip buji ateşlemeli bir motorda LPG kullanılmasının motor performansı üzerindeki etkileri incelenirken sıkıştırma oranı değiştirilebilen bir araştırma motoru kullanılmıştır. Deneplerinde test motorunu; 5/1, 7/1 ve 9/1 sıkıştırma oranlarında LPG ile çalıştırarak, motor performansı ve egzoz emisyonları verilerini kaydetmiştir.

Güler (2006) çalışmasında, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt kullanımına değinerek LPG'nin motor yakıtı olarak kullanımını incelemiştir. Çalışmasında, çok boyutlu modellemeyi esas almış ve bu yaklaşımı açıklamıştır. Daha sonra, bir deney motorunun verilerini kullanarak LPG ve benzini karşılaştırmış, çeşitli tablo ve grafiklerle egzoz emisyonları ve motor performans değerlerini incelemiştir. İncelemelerini KIVA-3V kodu kullanılarak gerçekleştirmiş, sonuçları GMV ve MS Excel paket programları ile görselleştirmiştir. İncelemelerinin sonucunda, LPG'ile

benzini oluşturdıkları egzoz gazları emisyonları açısından kıyasladığında LPG ile daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini görmüştür. Ancak eşit koşullarda ulaşılan maksimum basınç düzeyinde azalma görmüştür. Sıkıştırma oranını arttırmak suretiyle ve çeşitli avans değerlerinde bu güç kaybının geri kazanılabildiğini tespit etmiştir.

Li *et al.* (2002) çalışmalarında küçük boyut buji ateşlemeli LPG motorunda, emisyon karakteristikleri üzerinde deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Dört stroklu, su soğutmalı, 125 cc bir motosiklet motoru, LPG yakıt kullanımı için hazır hale getirmiştir. Sonuçlarında LPG'ile oluşan gücün, benzinin güç çıktısına oranını %95 olarak gözlemlemiştir. LPG ile benzinin emisyon karakteristikleri karşılaştırarak, LPG'nin motosikletlerdeki emisyon seviyesini azaltmaya yardımcı olabileceğini görmüştür. Çalışmada NO_x emisyonunun artarken, HC ve CO emisyon seviyelerinin önemli ölçüde azaldığını, gözlemlenmiştir.

Gümüş (2011)'ün çalışmasında, sıralı ve çok noktadan gaz enjeksiyon sistemi ile donatılmış bir SI motorda, farklı LPG kullanım seviyelerindeki (%25, %50, %75 ve %100) motor emisyon karakteristiklerine bağlı olarak volumetrik verimde değişim gözlemlemiş ve bu etkinin sebepleri incelemiştir. Deneylerini, sabit motor hızında (3800 d/dak) ve farklı yük şartlarında (%5, %30, %60 ve %90) gerçekleştirirken, volumetrik verim, hava yakıt oranı, fren termal verimi, fren özgül yakıt tüketimi, fren özgül enerji tüketimi ve egzoz gazlarındaki değişimlere yoğunlaşmıştır. Volumetrik verimin, %25 LPG kullanım seviyesinde önemli derecede azaldığını, %50, %75 ve %100 LPG kullanımı için ise LPG kullanımıyla orantılı olarak azaldığını görmüştür. LPG kullanım seviyesindeki artışla hava-yakıt oranının azaldığı ve minimum hava yakıt oranı değerinin %100 LPG kullanımında elde edildiğini gözlemlemiştir. Fren termal verim sabit tutularak elde ettiği verilere göre, %25 LPG içeren karışım kullanımı ile fren özgül yakıt ve enerji tüketimi azalmıştır. Egzoz emisyonları bakımından tüm LPG kullanım seviyelerinde olumlu sonuçlar elde etmiştir. Egzoz emisyonlarında en iyi sonuçlara, %100 LPG kullanımında ulaşmıştır.

Bayraktar and Durgun (2005) çalışmalarında, LPG dönüşümü yapılarak her iki yakıtı da kullanabilir hale getirilmiş otomobil motorunda çevrim tahmini için sanki boyutlu buji ateşlemeli SI motor çevrim modelini elde etmek için egzoz emisyon ve motor performansı verilerinden yola çıkmışlardır. Matematiksel model oluşturulurken kullanılan denklemlerini, silindir içi basınç ve sıcaklığından türetilen birinci dereceden adi diferansiyel denklemlerden faydalanmışlardır. Yanmış ve yanmamış iki farklı termodinamik bölgeyi ele alarak, yanmayı türbülanslı alev ilerlemesi olarak simule etmişlerdir. Yakıt tüketimi ve yakıt ekonomisi açısından, gerçekçi bir karşılaştırma yapmak için farklı motor hızlarında aynı hava-yakıt ekivalans oranlarında çalışmışlardır. Simülasyon sonuçlarına göre, LPG'li buji ateşlemeli motor ile benzinli buji ateşlemeli motor karşılaştırıldığında, egzoz emisyonlarında önemli ilerlemeler kaydedileceğini görmüşlerdir. Buna karşılık, çeşitli motor performans parametreleri ve motor yapı elemanları üzerindeki değişimlerin ümit verici olmadığını değerlendirmişlerdir.

Nergiz (2008) tarafından yapılan çalışmada, port yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir araca, çok noktadan LPG enjeksiyonlu yakıt sistemi montajı yapmış ve her iki yakıt türü ile açığa çıkan; devir, motor gücü, faydalı güç, değerlerini ölçmüş, aktarma organlarındaki kayıpları belirlemiş ve ayrıca emisyon değerlerini de ölçerek, her iki yakıt türünün performansı ve emisyon değerleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Aydın (2006) çalışmasında, içten yanmalı motorlarda kullanılan LPG sisteminin çalışma şartlarına yoğunlaşmıştır. Sıralı Gaz Fazı LPG Enjeksiyon Sistemini incelediği çalışmada, taşıt üzerindeki motor, LPG ve kurşunsuz benzinle çalıştırılarak emisyon ve güç değerlerini de tespit edilmiştir.

Jermy *et al.* (2006) tarafından yapılan çalışmada ise LPG'nin gaz fazına geçerken ihtiyacı olan ısı enerjisini emme havasından sağlaması sonucu, yoğunluğun azalıp volumetrik verimin artması ile motor çıkış gücünün pozitif yönde değişebileceğini göstermiş ve yaklaşık %6 oranında artacağı bildirilmiştir.

Kocagöz (2009) çalışmasında; farklı oranlarda çift yakıt (Benzin+LPG) kullanarak, sabit devirde fakat farklı yük değerleri için, hacimsel verim ve buna bağlı olarak motor çıkış parametrelerini ve yakıt tüketimi ile egzoz emisyonlarının değişimini incelemiştir. Dene sonuçlarında; karışım içerisindeki LPG oranının artarken ile hacimsel verim de azalma gözlemlenmiştir. Egzoz emisyonları ve yakıt ekonomisi yönünden ise artan LPG karışım oranında iyileşme elde etmiştir. %100 LPG kullanımı ile HC CO₂, CO, özgül yakıt maliyetinde, emisyonlarında sırasıyla %72.6, %33.9, %53.3 ve %23.5, oranında azalma sağlandığını tespit etmiştir.

1.1. Amaç

Bu çalışmada, motor çalışma parametrelerinin en önemlilerinden birisi olan hava-yakıt oranının yeni nesil geniş-band bir O₂ sensörü ile kontrol edilmesi sayesinde daimi şartlarda kontrol kalitesinin artırılması amaçlanmıştır. Uygulama için özellikle ülkemizde yaygın olarak kullanılan LPG yakıtlı bir motor üzerinde çalışılmıştır. Bu amaca ulaşmak üzere bir deney düzeneği kurulmuş ve LPG enjektörleri elektronik kontrol ünitesinden bağımsız olarak tarafımızca üretilen bir kontrol algoritması ile denetlenmiştir.

1.2. Kapsam

Bu çalışma otomotiv sektörünün kalbi niteliğindeki buji ateşlemeli motorlarda yeni nesil bir kontrol uygulamasının yapılması kapsamındadır. Özellikle LPG yakıtlı motorların daha doğru kontrol edilmesi ile hem egzoz emisyonları hem de motor performans karakteristikleri geliştirilebilir.

2. KURAMSAL TEMELLER

İçten yanmalı bir motorda enerji dönüşümünün gerçekleştiği safha yanma ve genişleme zamanıdır. Bu evrede yakıtın kimyasal, fiziksel ve ısı özellikleri gerçekleşen çevrimin verimliliğini doğrudan etkiler. Yakıt içeriğindeki C/H oranı ve yakıtın kapalı formülü, yanma ürünlerinin yüzdesi ve hava yakıt karışımının enerji yoğunluğu hakkında bilgi verir. Bu bölümde öncelikle yanma, yanma kimyası ve hava fazlalık katsayısının yanında yanma analizlerinde kullanılan temel tanımlar yapılmış ardından yanma reaksiyonları açıklanmıştır.

Kullanılan motor yakıtının tutuşma ve yanma karakterlerinin yanı sıra silindir içerisine alınan hava yakıt karışımının oranı yanma ürünlerini etkileyen önemli bir parametredir. Fakat hava yakıt oranını tam ideal değeri üzerinde sabit tutmak oldukça güçtür. Kullanıcıya bağlı değişken güç ve tork talepleri, sıcaklık, basınç ve oksijen yoğunluğu gibi çevresel faktörler, çevrimsel farklar ve bunun gibi dışardan gelen birçok bozucu etkinin yer aldığı bir sistemde oluşturulan denetiminin bu bozucu etkilere anında müdahale etmesi sistemin yapısında var olan gecikmelere bağlı olarak daha da zorlaşır. Bu bölümde ayrıca sisteme uygun denetimci tasarımında faydalanılan model de açıklanmıştır.

2.1. Yanma

Yakıt adı verilen ve uygun şartlar sağlandığında, oksijen ile reaksiyon vermesi sonucu dış ortama enerji veren maddelerin, oksijen ile etkileşimine yanma, meydana gelen reaksiyona da yanma reaksiyonu denilmektedir. Yanma olayı kimyasal bir işlemdir. Yanma reaksiyonları oksidasyon olarak da adlandırılmaktadır. Tanımda anlatıldığı gibi yanma reaksiyonları dış ortama enerji verdikleri için egzotermik reaksiyon grubuna girerler. Oluşan enerji reaksiyon esnasında yakıtın içerisinde moleküller ve/veya elementler arasındaki kimyasal bağların parçalanması ile oluşmaktadır. Çünkü kimyasal bağlar enerji yüklüdürler.

Yanma olayı, yakıt ile oksijenin bir araya getirilmesi ile oluşmaz. Çünkü ilgili yakıtın kendine özel bir tutuşma sıcaklığı vardır ki; eğer yanma prosesinde yakıt bu tutuşma sıcaklığına gelmezse yanma işlemi başlamaz. Aynı zamanda, yanma reaksiyonuna yetebilecek miktarda oksijenin ortamda bulunması ve yanma reaksiyonu sonucu oluşan egzoz gazlarının prosesden uzaklaştırılması için yeterli ölçülerde bacanın mevcudiyeti yanma için gereklidir. Bu faktörler tamamen birbirine bağlıdır ve biri olmazsa diğerleri anlam ifade etmezler.

Her yakıtın kendine özgü bir tutuşma sıcaklığı vardır. Dolayısıyla yakıttan yakıtta yanma için gereken şartlar değişmektedir. Dolayısıyla yanma prosesinin şartları belirlenirken yakıtın özelliklerinin bilinmesi gerekir.

2.2. Yanma Kimyası

Hidrokarbon yakıtlarda yanma, kimyasal olarak karbonun ve hidrojenin oksitlenmesi olarak tanımlanmaktadır.



Şeklinde karbonun yanması gerçekleşirken;



Şeklinde de hidrojenin yanması gerçekleşir.

Yanma olaylarında genellikle havanın içerisinde bulunan serbest oksijen kullanılır. Havanın içerisindeki serbest oksijenin kullanılma amaçları;

- Her ortamda havanın mevcut olması,

- Havadan oksijen temininde herhangi bir maliyet olmaması,
- Yanma prosesinde oksijenin elde edilmesi için prosese ilave yatırım yapılmamasıdır.

Hava hacimsel bileşim olarak aşağıdaki gazlardan oluşmaktadır.

- Oksijen : %20,94
- Azot : %78,08
- Argon : %0,93
- Karbondioksit : %0,03
- Diğer gazlar : %0,02

Yanma hesaplamalarında, havanın içerisinde sadece oksijen ve azot gazlarının olduğunu varsayarak hesaplamalar yapılır. Oksijen dışındaki diğer gazlar da inert azot gazı gibi düşünülür. Bu kabul hesapların kolay yapılmasını sağlar. Oksijen ve azot gazı dışındaki gazların hacimsel oranlarına bakıldığı zaman ciddi mertebelerde ehemmiyet göstermemektedirler. Dolayısıyla yapılan bu kabul hesaplarda ciddi sapmalara neden olmamaktadır. O halde yapılan kabuller sonucu havanın bileşimi şöyle düşünebilir:

- Oksijen : %20,94
- Azot : %79,06

Daha yüzeysel hesaplarda, hacimsel oranlar; %21 oksijen, %79 azot kabul edilir.

Hava ideal gaz olarak kabul edilmektedir. İdeal Gaz Yasasına göre; ideal gazların hacimsel oranları mol oranlarına eşittir. Dolayısıyla hava 0,21 mol oksijen, 0,79 mol azot gazı içermektedir. Buradan hareketle hesaplama yapılırsa:

1 mol havada 0,21 mol oksijen varsa; 1 mol oksijen; $\frac{1}{0,21} = 4,76$ mol havanın içerisinde bulunmaktadır. 4,76 mol havanın içerisindeki azot gazı: $4,76 - 1 = 3,76$ mol olarak bulunur.

Karışımların molekül ağırlığının hesabından hareketle havanın molekül ağırlığı hesaplanırsa:

$$V_{\text{oksijen}} \times M_{\text{oksijen}} + V_{\text{azot}} \times M_{\text{azot}} = V_{\text{hava}} \times M_{\text{hava}} \quad (2.3)$$

V_{oksijen} = hava içerisindeki oksijenin hacimsel oranı,

M_{oksijen} = oksijenin molekül ağırlığı: 32 g/mol,

V_{azot} = hava içerisindeki azotun hacimsel oranı,

M_{azot} = azotun moleküler ağırlığı: 28 g/mol,

V_{hava} = havanın hacimsel oranı,

M_{hava} = havanın moleküler ağırlığı, (Aşağıda hesaplanacaktır.)

Eldeki veriler denklem (2.3)'te yerine yazılırsa:

$$0,2094 \times 32 + 0,7906 \times 28 = 1 \times M_{\text{hava}} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'ten;

$M_{\text{hava}} = 28,84$ g/mol olarak hesaplanır.

Eğer havanın içerisindeki oksijen ve azotun kütleli kesirlerini ($X_{\text{oksijen}}, X_{\text{azot}}$) hesaplanmak istenirse;

$$X_{\text{oksijen}} = \frac{V_{\text{oksijen}} \times M_{\text{oksijen}}}{M_{\text{hava}}} \quad (2.5)$$

$$X_{\text{azot}} = \frac{V_{\text{azot}} \times M_{\text{azot}}}{M_{\text{hava}}} \quad (2.6)$$

(2.5) ve (2.6) numaralı denklemlerde biline değerler yerine yazılıp denklemler çözüldüğünde $X_{oksijen} = 0.23$, $X_{azot} = 0.77$ olarak bulunur.

2.2.1. Stokiyometrik hava

Bir yakıtın tam olarak yanabilmesi için gerekli olan minimum hava miktarıdır. Yanma reaksiyonlarında stokiyometrik hava miktarı soru çözümlerinde ya sorunun içerisinde verilir ya da hesaplanması istenir. Eğer hesaplanması isteniyorsa ve hesaplama için yanma ürünlerinin bilgileri de verilmişse; yanma reaksiyonu, girenler ve oluşanlar şeklinde detaylı bir şekilde yazılır ve denklemin her iki tarafı denkleştirilir. Daha sonra atom denkliği yazılarak eşitlikler oluşturulur. Oluşturulan bu eşitlikler denklem takımı çözüm yöntemleri ile çözümlenerek stokiyometrik hava miktarı hesaplanır.

2.2.2. Hava fazlalık katsayısı (λ)

Yanma reaksiyonlarında yakıtın yanması için kullanılan hava miktarının, kullanılması gereken minimum hava miktarına yani stokiyometrik hava miktarına oranı olarak tanımlanır. Hava fazlalık katsayısı (λ) yanmanın verimliliği ve yanma sonu ürünleri hakkında bilgiler verir. Örneğin; hava fazlalık katsayısı 1'den büyük olduğu durumlarda, yanma için gerekenden fazla hava verilmiştir. Dolayısıyla yakıt yanma sonunda tamamen tükenmiştir ön görüsü yapılabilir. Tam tersi durumda ise ortamda hala yanabilecek yakıt olabilir ön görüsü yapılır.

2.2.3. Tam yanma

Yanma reaksiyonunda yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken miktarda hava verilirse sisteme, yakıt tamamen yanabilir. Tam yanma ideal bir durumdur. Yanma proseslerinde bir kriter olarak düşünülerek, bu ideal duruma yaklaşılmaya çalışılır.

Tam yanma sonucunda oluşan yanma ürünleri: karbon dioksit (CO_2), su veya su buharı (H_2O), azot (N_2) ve azot oksitler (NO_x); eğer yakıtın bünyesinde safsızlık maddeleri varsa, kükürt oksitler (SO_x), hidrojen sülfür (H_2S) ve partikül maddeler oluşur.

Yanma proseslerinde, yakıtın tam yanabilmesi için gereken hava miktarından biraz fazla hava sisteme gönderilerek yanma işlemi gerçekleştirilir. Çünkü yakıtın tamamının yanması istenir ki maksimum enerji elde edilebilsin. Yakma havası çok fazla da gönderilirse; havanın içerisindeki azot gazı inert bir gazdır ve tepkimeye girip etkilenmeden çıkar, ama bünyesine ısı alarak sistemden enerji kaybolmasına neden olur. Bu durum istenmeyen bir durum olduğu için yakma hava %10 ile %30 dolaylarında fazladan sisteme gönderilir.

2.2.4. Zengin yanma

Yanma reaksiyonlarında, yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken stokiometrik hava miktarından daha az hava sisteme gönderildiğinde meydana gelen yanma zengin bir yanmadır. Böyle bir yanma olayında yakıtın tamamı yanmaya katılamaz. Dolayısıyla verimli bir yanma gerçekleşmez ve yakıtın enerjisinden maksimum seviyede yararlanılamaz. Aynı zamanda zengin yanma emisyon artırıcı bir etki de yapmaktadır.

Zengin yanma sonucu oluşan ürünler; karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO_2), hidrojen (H_2), su veya su buharı (H_2O), azot monoksit (NO) hidrokarbonlar (HC); eğer yakıtın bünyesinde safsızlık maddeleri varsa, hidrojen sülfür (H_2S), kükürt oksitler (SO_x), partikül maddeler oluşur.

2.2.5. Fakir yanma

Yanma reaksiyonlarında, yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken hava miktarından fazla havanın sisteme gönderildiğinde meydana gelen yanma işlemi fakir bir yanma reaksiyonudur.

Fakir yanma işlemine ilk bakıldığında zararsız gibi görünmektedir. Emisyon bakımından böyle düşünülebilir. Fakat enerji verimliliği bakımından bakıldığında inert gaz olan azot gazı bünyesine enerji olarak sistemden egzoz gazıyla birlikte daha fazla ısı çekilmesine sebebiyet vermektedir. Sonuç olarak yakıttan elde edilen enerjinin bir kısmı bu yolla kaybedilmektedir. Fazla hava ile yanma işleminde, yanma sonu ürünler arasında serbest olarak bulunan oksijen ile yüksek sıcaklıklı proseslerde tepkime verme eğilimi başlayan azot, birbirleriyle tepkimeye girerler. Bu tepkimeler sonucu olan azot oksitlerin çevre emisyonları yüksektir. Böyle bir durumda emisyon standartları açısından istenmeyen bir durumdur.

2.2.6. Hava-yakıt oranı

Yanma prosesinde yanma işlemine giren hava kütesinin, yanma işlemine giren yakıtın kütesine oranı hava/yakıt oranı olarak tanımlanmaktadır.

$$H/Y \text{ oranı} = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} \quad (2.7)$$

2.2.7. Yakıt-hava oranı

Yanma işlemlerinde, birim havanın yakmış olduğu yakıt miktarına da yakıt/hava oranı denir.

$$Y/H \text{ oranı} = \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} \quad (2.8)$$

2.3. Yanma Stokiyometrisi

Bu bölümde yanıcı karışımlarda, reaktanların (reaksiyona giren maddelerin) ve ürünlerin bileşimi arasındaki ilişkiler anlatılmıştır. Bu ilişkilerde, tepkimeye boyunca kütle kaybı söz konusu olmaz. Dolayısıyla nükleer reaksiyon ve radyoaktif bozunmanın

olmadığı reaksiyonlarda Kütlelerin Korunumu Yasası temel alınır ve tüm hesaplar bu yasaya göre yapılır.

Eğer yanma odasında yeterli miktarda oksijen (O_2) mevcut ise; hidrokarbon yakıtın tamamının oksidasyonu gerçekleşebilir. Yanma esnasında, hidrokarbon yakıtın bünyesindeki karbonlar karbon dioksit (CO_2 'e), hidrojenler suya (H_2O 'ya) dönüşür. Örnek olarak, 1 mol propanın (C_3H_8 'in) genel yanma denklemi incelenirse;



Karbon için kütle balansı yazılırsa; $3 = b$,

Hidrojen için kütle balansı yazılırsa; $8 = 2 \times c$, $c = 4$,

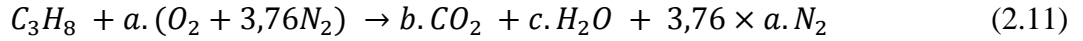
Oksijen için kütle balansı yazılırsa; $2 \times a = 2 \times b + c$, $2 \times a = 2 \times 3 + 4$, $a = 5$ bulunur. O halde bilinmeyenler yerine yazılırsa denklem aşağıdaki şekilde denkleştirilmiş olur.



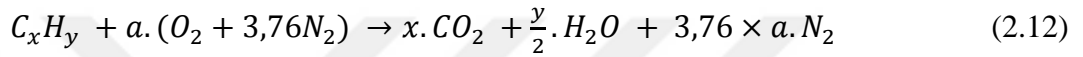
Denklem (2.10) sadece sade bir yanma denkleminin denkleştirilmesini göstermektedir. Fakat yanma reaksiyonları, bu kadar basit değildir. Konular ilerledikçe, kompleks reaksiyonlarla ilgilenilecektir.

Yukarıdaki propanın yanması reaksiyonuna dikkat edilirse (denklem 2.9 ve 2.10), hidrokarbonun yakılmasında oksijen kullanılmaktadır. Fakat daha önce de bahsedildiği üzere yanma reaksiyonlarında havanın içerisindeki oksijenden faydalanılır. Havanın kimyasal bileşimi de incelenmişti. Havanın içerisinde oksijenin yanında önemli miktarda azot da (N_2) bulunmaktadır. Havanın içerisindeki azot düşük sıcaklıklı yanma

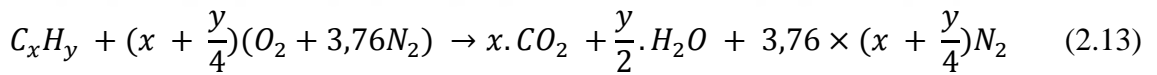
reaksiyonlarında inerttir ve reaksiyona girip, etkilenmeden reaksiyondan egzoz gazıyla birlikte dışarı atılır. Propanın hava ile yakılması incelenirse;



Denklem (2.11)'de kütle denkliği oluşturulursa; $a = b + \frac{c}{2}$ 'ye eşit olur. O zaman bir hidrokarbonun genel yanma denkliği yazılırsa;



(2.11) numaralı denklemdeki b ve c değerlerini (2.12) numaralı denklemdeki x ve $\frac{y}{2}$ 'ye eşitliğini kabul edersek; $a = x + \frac{y}{4}$ 'ye dönüşür. O halde daha genel bir denklem yazılabilir.



(2.13) numaralı denklemi, bünyesinde sadece karbon ve hidrojen bulunan tüm hidrokarbonlara uygulanabilir. Eğer hidrokarbonun bünyesinde safsızlık maddeleri varsa (kükürt (S), azot (N) vs.) denklem (2.8) için kurulan kütle balanslarına ilaveten ilgili safsızlık maddeleri için de kütle balansları kurulması gerekir. Aksi halde kütle balansları denklem takımının çözümü mümkün olmamaktadır.

Denklem (2.13)'e bakıldığı zaman yanma reaksiyonun gerçekleşmesi için gereken oksijen miktarı yakıtın bileşimine göre değişmektedir denilebilir. Dolayısıyla yanma prosesleri için yakma havası temin edilirken yakıtın kimyasal bileşimini göz önünde bulundurmak gerekir. İşte bu noktada hava/yakıt oranı işin içine girmektedir.

Denklem (2.7)'a bakarsak eğer; hava/yakıt oranı hesabı için, denklem (2.13)'teki hidrokarbon katsayıları bazında bir formül türetilir.

$$H/Y \text{ oranı} = \frac{m_{hava}}{m_{yakıt}} = \frac{(x + \frac{y}{4}) \times (32 + 3,76 \times 28)}{(x \times 12 + y \times 1)} \quad (2.14)$$

Aynı şekilde denklem (2.8)'da hidrokarbon katsayıları bazında formüle edilebilir.

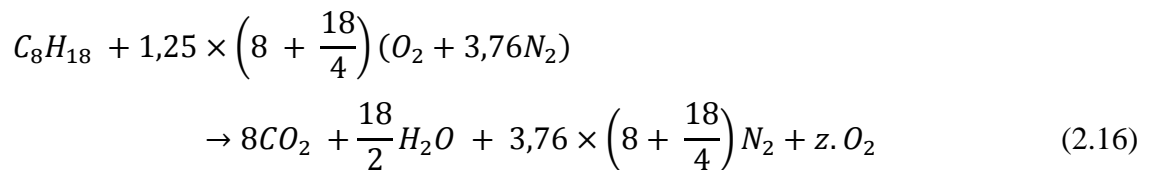
$$Y/H \text{ oranı} = \frac{m_{yakıt}}{m_{hava}} = \frac{(x \times 12 + y \times 1)}{(x + \frac{y}{4}) \times (32 + 3,76 \times 28)} \quad (2.15)$$

Denklem (2.13) hesaplanan hava miktarı; ilgili yakıtın tamamen yanabilmesi için gereken minimum hava miktarıdır. Yani tam yanma için gereken hava miktarıdır.

Yanma proseslerinde yakıt-hava karışımlarında gereken hava miktarından daha fazla hava veya gereken hava miktarından daha az miktarda hava bulunabilir. Dolayısıyla yanma ile ilgili problemlerde ilk olarak yapılması gereken ilk iş, problemde verilen veriler doğrultusunda yakıtın tam yanması için gereken hava miktarının yani stokiometrik hava miktarının hesaplanmasıdır. Devamında da hava fazlalık katsayısının hesaplanması gerekir. Hava fazlalık katsayısı (λ) bize yanmada kullanılan hava-yakıt karışımı ile ilgili bilgiler verir.

Örneğin; %25 fazla hava ile yakılan izo-oktan incelenirse: (C_8H_{18})

Burada en önemli husus elimizde izo-oktanın yanma denklemi yoktur. Fakat soru bize bir takım ipuçları vermektedir. %25 hava fazlası derken, yakıtın yanmasında karbon ve hidrojenin doygunluğundan fazla oksijen var demektir. Dolayısıyla yanma ürünleri arasında O_2 'de vardır. Yakıtın bünyesindeki denklem (13)'e göre x ve y katsayıları sırasıyla, 8 ve 18'dir. Denklem (13)'te yerine yazılırsa,



Denklem (2.16)'deki $z = 0,25 \times \left(8 + \frac{18}{4}\right) = 3,125$ olarak hesaplanır.

Verilen örnek yakıt yönünden fakir bir yanma, hava yönünden ise zengin bir yanma örneğidir. Yani verilen örnekteki hava-yakıt karışımında yakıt yanma esnasında havanın içerisindeki tüm oksijeni bağlayamamaktadır ve fazla oksijeni egzoz gazlarıyla atmosfere salmaktadır.

Yanma verimliliği açısından, hava-yakıt karışımında havanın stokiometrik hava miktarından daha fazla olması iyidir. Çünkü yanma esnasında yakıtın tamamının yanma ihtimali çok yüksektir.

Eğer hava-yakıt karışımında bulunan hava stokiometrik hava miktarından daha az miktarda ise yanma ürünleri arasında oksidasyonunu kimyasal yükü oranında tamamlayamamış, yani eksik yanmış bileşikler bulunacaktır. Aynı zamanda yakıtın tamamının okside olması mümkün değildir. Yakıt fazlasının ve eksik yanmış yanma ürünlerinin egzoz gazı ile atmosfere salınımı emisyon açısından çok zararlıdır. Dolayısıyla yanma proseslerinde emisyon açısından, yakma havası miktarı, stokiometrik hava miktarından fazla olması, eksik olmasından daha iyidir. Dolayısıyla yanma sistemi tasarımlarında stokiometrik hava miktarı kesinlikle yapılmalıdır.

Yanma ürünleri bileşimi, yakıt yönünden fakir ve zengin karışımlarda önemli ölçülerde farklılık gösterdiğinden dolayı, hava-yakıt karışımlarından bahsedilirken, stokiometrik yakıt/hava oranının, gerçek yakıt/hava oranına oranı olarak tanımlanan yakıt/hava eşdeğerlik oranı daha açıklayıcı bir parametredir. Eküvalans oranı olarak da bilinen bu parametre (ϕ) simgesi ile gösterilmektedir. Hava fazlalık katsayısı (λ)'nın tersi olarak da tanımlanan eküvalans oranı (ϕ),

$$\phi = \frac{\left(\frac{m_{\text{yakıt}}}{m_{\text{hava}}}\right)_{\text{gerçek}}}{\left(\frac{m_{\text{yakıt}}}{m_{\text{hava}}}\right)_{\text{stokio.}}} \quad (2.17)$$

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (2.18)$$

Denklem (2.17 ve 2.18)'deki gibi formüle edilir.

Buradan yola çıkarak hava fazlalık katsayısı (λ) ile eküvalans oranı (ϕ) arasındaki ilişki,

Yakıt yönünden fakir karışımlarda; $\phi < 1, \lambda > 1,$

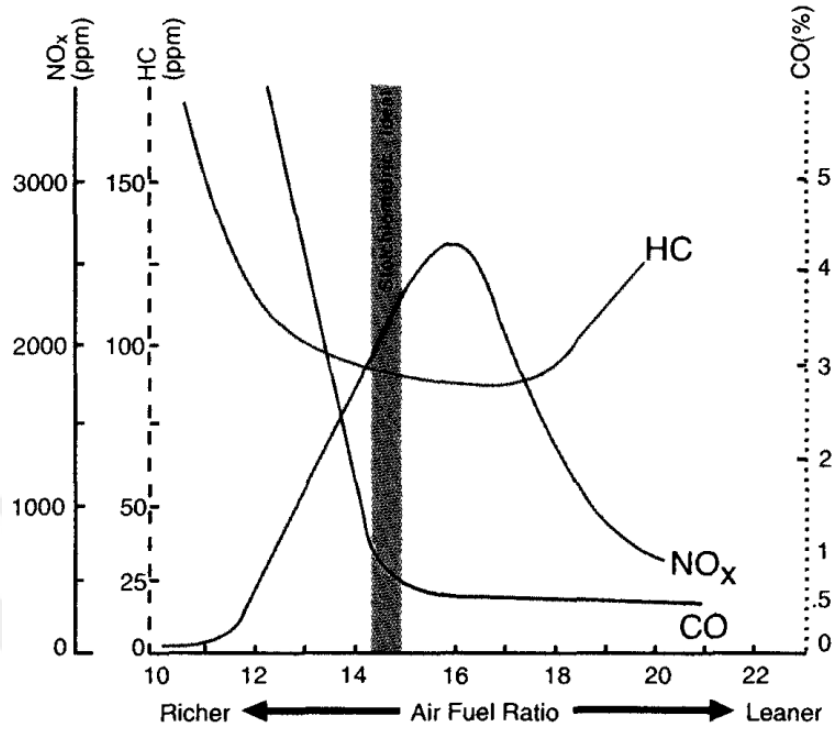
Stokiyometrik karışımlarda; $\phi = 1 = \lambda,$

Yakıt yönünden zengin karışımlarda; $\phi > 1, \lambda < 1,$

şeklinde ifade edilir.

2.4. Hava Fazlalık Katsayısı ile Egzoz Emisyonları Arasındaki İlişki

Buji ateşlemeli motorlarda hava fazlalık katsayısının kontrolü, özellikle egzoz emisyonları üzerinde ciddi seviyedeki etkisi dolayısıyla önem arz etmekte ve dolayısıyla üzerinde çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Bu bölümde buji ateşlemeli motorlarda hava fazlalık katsayısının karbon monoksit, hidrokarbonlar ve azot oksitler olmak üzere ana kirletici egzoz emisyonlarındaki etkileri açıklanmıştır. Tüm açıklamalarda Şekil 2.1'den faydalanılmıştır.



Şekil 2.1. Hava fazlalık katsayısı ile CO, HC ve NO_x emisyonlarının değişimi

2.4.1. Karbon monoksit

Karbon monoksit bir eksik yanma ürünüdür ve temelde yakıtın kısmi yanmasından dolayı üretilir. Yanma esnasında hava-yakıt karışımında bulunan oksijen yanma için yeterli seviyede değilse yakıt tam olarak yanamayacaktır. Yeteri kadar oksijenin olmadığı bir ortamda yanma gerçekleştiğinde karbonun tamamı CO₂'ye dönüşmez ve karbon atomları bir oksijen atomu ile bağ yaparak karbon monoksit oluşturur.

Karışım zengin olduğunda veya hava fazlalık katsayısı 1'in altına indiğinde karışım içerisinde yeteri seviyede oksijen olmayacaktır. Motorlarda bu durumun ortaya çıkmasına neden olacak birçok çalışma şartı oluşabilir. Örneğin soğukta ilk hareket, ısınma fazı ve motor çıkış gücünün artırılması gibi. Dolayısıyla bu şartlar altında karbon monoksit üretim seviyesi de artacaktır. Şekil 2.1'den de görüleceği üzere hava fazlalık katsayısı 1'in altına indikçe karbon monoksit üretimi artmaktadır. Aksine fakir bölgeye

doğru geçtikçe ise üretim azalmaktadır. Dolayısıyla karbon monoksit emisyonunun üretiminin doğrudan hava fazlalık katsayısının fonksiyonu oluğu anlaşılmaktadır.

2.4.2. Azot oksitler

Yanma süresince silindir içerisinde görülen yüksek sıcaklıklı bölgelerde azot oksijen ile reaksiyona girer. Bu tür emisyonlar, azot oksitler (NO_x) olarak adlandırılır. Her ne kadar çok çeşitli azot esaslı emisyon türü olsa bile yaklaşık %98 oranında azot oksitten (NO) oluşmaktadırlar.

Azot oksitlerin oluşumunda etkin ikinci parametre ise yanma ortamındaki oksijen seviyesidir. nceki bölümde aıklanđıđı üzere karışım fakir bölgeye geçtikçe oksijen seviyesi artmaktadır. Ancak diğer taraftan yanma sıcaklığı azalmaktadır. Bu durum karışımın zengin bölgeye geçmesi için ters şekilde cereyan etmekte ve oksijen seviyesi azalırken sıcaklık artmaktadır. Bu iki zıt etkinin altında azot oksit emisyonları stokiyometrik karışımın çok az fakir tarafında en fazla üretilmektedir. şekil 2.1'den azot oksit emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi net olarak görülmektedir.

2.4.3. Hidro karbonlar

Hidrokarbonlar basitçe ham yanmamış yakıt parçalarıdır. Yanma gerçekleşmediğinde, veya eksik yanma oluştuğunda büyük seviyede hidrokarbon emisyonu yayılır. Buji ateşlemeli motorlardan az miktarda hidrokarbon emisyonu yayılımı söz konusudur. Alev yanma odasının duvarına yaklaştığında, nispeten düşük sıcaklı olan duvar alevi söndürür ve snme mesafesi olarak adlandırılan bu bölgeden hidrokarbonlar üretilmiş olur. Sebeplerden bir diğer ise yanma odasındaki depozitlerdir (okelme). Gözenekli yapıdaki bu depozitlere hidrokarbonlar girer ve yanma esnasında bu bölgedeki hidrokarbonlar tutuşamaz. Egzoz esnasında ise egzoz gazlarına karışarak atılırlar. şekil 2.1'den de görüleceği üzere hidrokarbon emisyonlarının oluşumunda hava fazlalık katsayısı da etkindir. Zengin bölgede oksijen miktarındaki azalma hidrokarbonların artmasına neden olurken hava fazlalık katsayısı arttığa hidrokarbon üretimi de

azalmaktadır. Ancak aşırı fakir bölgede karışım içerisindeki yakıt moleküllerinin birbirlerinden çok fazla uzaklaşması dolayısıyla eksik yanma (misfire) oluşarak hidrokarbon miktarının tekrar artmaya başladığı da görülmektedir.

2.5. Sistem Tanımı ve Hava Fazlalık Katsayısı Kontrolü

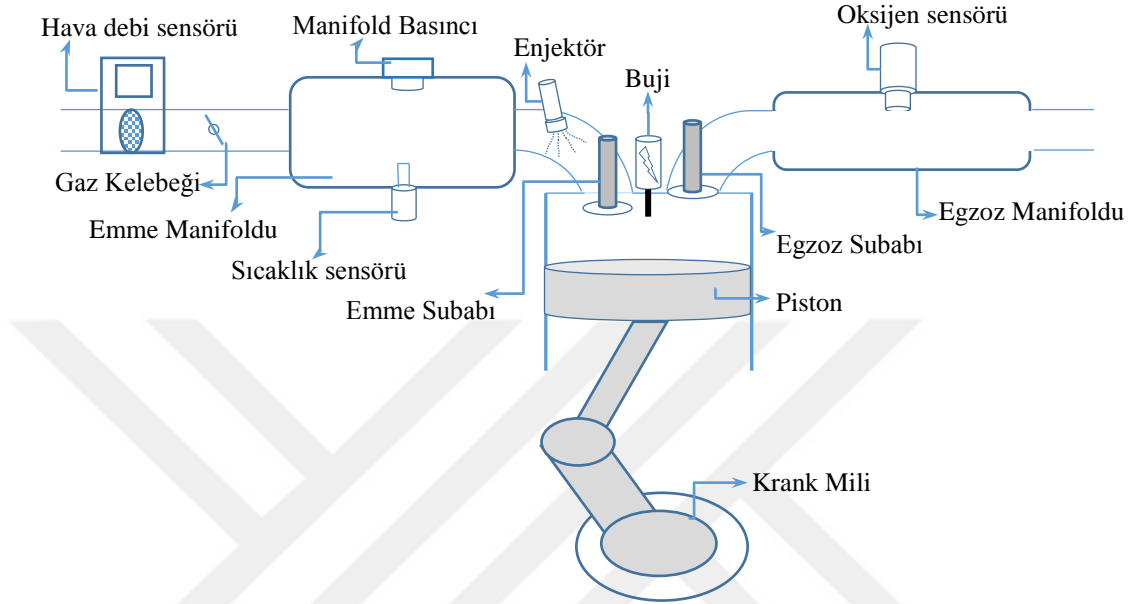
Hava fazlalık katsayısı (λ) denetiminde önemli olan bozucu etkilere hızlı cevap verebilen bir denetimci tasarımı ile beraber ve bu oranı istenilen değer aralığına mümkün olabildiğince yaklaştırabilmektir. Gerçek bir sistemde kontrol uygulamasına geçilmeden önce bilgisayar tabanlı ve sisteme benzetilmiş bir model üzerinde çalışma yaparak güvenilirliğin sağlanması gereklidir.

İçten yanmalı motorlarda denetime (kontrol) yönelik oluşturulan modellerle sistemin lineer olmayan girdi-çıkı ilişkileri basit şekilde açıklanmaya çalışılır. Ateşleme avansı, enjeksiyon süresi ve gaz keleşliği açıklık oranı temel girdi parametrelerinden bazılarıdır. İlişkilendirilmesi gereken sinyal çıktılarına ise devir, manifold basıncı, hava debisi, ve hava fazlalık katsayısı gibi örnekler verilebilir. Bu ilişkileri belirlerken faydalanılan iki kaynaktan birincisi temel fizik kanunları, ikincisi önemli parametreleri belirlerken faydalanılan deney verileridir. (Guzella and Onder, 2010)

2.5.1. Ortalama değer motor modeli

Bilgisayar tabanlı kontrole yönelik geliştirilen modellerin daha basit bir yapıda olması gerektiğinden sistem tanımlamasını yaparken her bir çevrimde yer alan yanma, genişleme, egzoz ve emme zamanında sistem üzerinde gerçekleşen tüm değişiklikleri ayrı ayrı ele almak yerine, buji ateşlemeli bir motor için otto çevrimindeki termodinamik esaslardan faydalanmak yeterli olur. Bu tip modellerde çevrimsel farklar göz ardı edilerek ardışık çevrimlerde aynı başlangıç şartları kabul edilir. Böylece gerçek değerlere çok yaklaşılabilir. Bu durumda yanma reaksiyonları sanki statik etki oluşturan bir girdi kabul edilir. İçten yanmalı motor sistemleri için geliştirilen diğer bilgisayar

tabanlı modellerde krank açısı bağımsız değişken olarak tanımlanabilirken burada bağımsız değişken zamandır.



Şekil 2.2. Buji ateşlemeli motor sisteminin basitleştirilmiş şeması

Port yakıt püskürtmeli bir motordan bahsederken ardışık çevrim davranışları silindir bloğu olarak tanımlanan kontrol hacminin manifold gibi diğer hacimlerle arasındaki kütle ve enerji alışverişleri ile açıklanır. Dinamik bir yapıya sahip buji ateşlemeli motor sisteminin basitleştirilmiş şeması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Buji ateşlemeli bir motor hava fazlalık katsayısı (λ) iki parametre ile doğrudan ilişkilidir. Bu değer için her bir çevrimde silindir içerisine yönelen taze hava kütesinin tam olarak belirlenmesi gerekir (Ebrahimi *et al.* 2012). Bunun yanında eş zamanlı giren yakıt miktarı (m_f) da bilinmesi gereken diğer parametredir. Yine sistem dinamiği incelendiğinde krank miline hareket kazandıran tork (τ_e) üretiminin ilgili silindir içerisinde belirli bir krank açısı aralığına karşılık gelen genişleme zamanında gerçekleştiği görülecektir. Üretilen tork değeri emme zamanı süresince silindir içerisine giren hava kütesi ve yakıt miktarının bir çıktısı ve bir sonraki çevrimi doğrudan

etkileyen bir parametredir. Bu sebeple sistem üzerinde krank mili dinamiği de incelenmelidir.

2.5.2. Hava akışı dinamiği

Silindir içerisine giren hava kütlesi ile ilgili pratikte direkt olarak ölçülebilir bir nicelik olarak söz etmek doğru bir ifade olmayacaktır. Sistemin dinamik yapısı ve var olan çevrimsel farklar silindir içerisine giren hava kütlesinin belirsizliğinin temel esasıdır. Bu büyüklük gaz keleşi açıklık oranı veya hava debi sensör bilgisi ile beraber manifold basıncı değişimi ile ilişkilendirmek yerinde olacaktır. Hava yolunda kısılma etkisi yapan gaz keleşi açıklık oranına bağlı olarak manifold basıncında (P_m) bir değişim söz konusudur. Kullanıcı gaz pedalı ile silindir içerisine yönelen hava miktarını dolaylı olarak, fakat manifold içerisine yönelen hava miktarını doğrudan etkiler. Bu bakımdan silindir içerisine yönelen hava miktarını manifold bağlı basıncı (P_b) ile ilişkili bir parametre olarak tanımlanabilir.

Dış ortamdan gaz keleşini geçerek emme manifolduna yönelen hava akışının adiyabatik bir proses olarak kabul edilmesinde sakınca yoktur (Heywood 1988). Atmosfer sıcaklığına eşit kabul edilen manifold sıcaklığında ($T_m = T_a$), ideal gaz yasısından türetilmiş;

$$\dot{p}_m = \frac{RT_a}{V_m} (\dot{m}_h - \dot{m}_i) \quad (2.19)$$

denklemini kullanılır. Burada R [J/(kg.K)] gaz sabitini, (P_m) manifold basıncını ve V_m (m^3) manifold hacmini ifade etmektedir. Gaz keleşini geçip manifolda yönelen hava kütlesi m_i (kg) ile ifade edilmiştir.

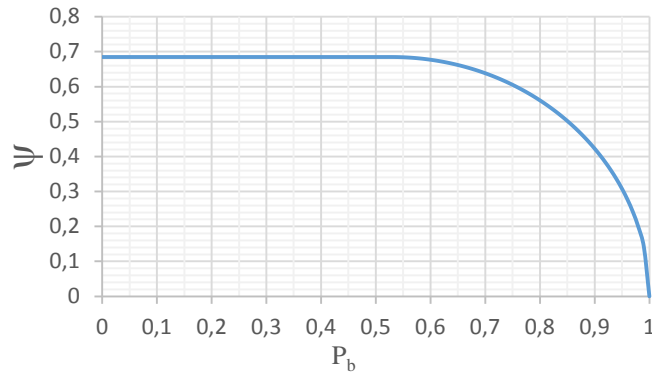
Bilinmesi gereken m_h için Heywood (1988) gaz keleşini bir dar kanal gibi ele alıp lineer olmayan bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Bu ifade denklem aşağıda gösterilmektedir.

$$m_h = A_t(1 - \cos \theta) \frac{P_a}{\sqrt{RT_a}} \psi(P_b) \quad (2.20)$$

A_t ve θ sırası ile gaz kelebeği kesit alanını(m²) ve açısını(rad) ifade eder. Bu denklemdaki $\psi(P_b)$ fonksiyonu bağıl basınç değerine göre değişen ve hava akışının üst sınırı olan ses hızına bağlı olarak tanımlanmış bir kritik değer ile sınırlandırılmış bir denklemdir.

$$\psi = \begin{cases} P_b^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left[1 - P_b^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]}, & P_b \geq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \\ \sqrt{\kappa \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}, & P_b \geq \left(\frac{2}{\kappa+1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \end{cases} \quad (2.21)$$

Bu fonksiyonun bağıl basınca karşılık değişiminin grafiği aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.3. Kısmi basınç (P_b)'a karşılık ψ fonksiyonu

Yine silindir içerisine yönelen hava kütlesi ifade edilirken ile ilgili silindir içerisine alınan hava-yakıt karışım hacminin silindir hacmine (V_c) oranı ifadesinin karşılığı olan volumetrik verim(η)'den faydalanılabilir. Bu durumda silindir içerisine yönelen hava kütlesi,

$$\dot{m}_i = \frac{\rho_a V_c \eta}{4\pi P_a} \omega_n P_m \quad (2.21)$$

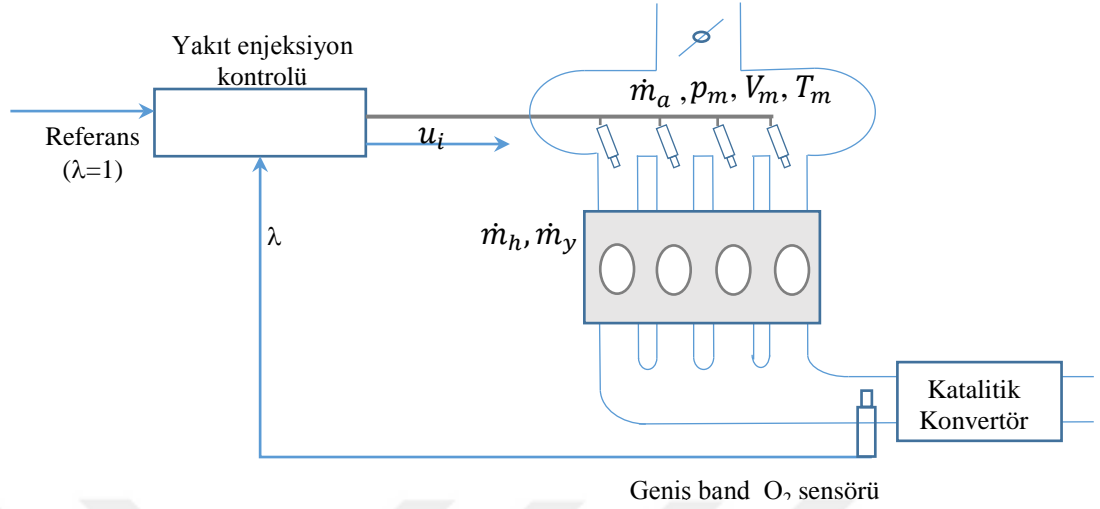
şeklinde ifade edilebilir ve sabit devir ile çalışma durumu için geçerliliği olan bir denklemdir (Zhang *et al.* 2010).

2.5.3. Yakıt yolu dinamiği

Yakıt yolu modeli ile silindir içerisine aktarılan yakıt kütlesi m_y (kg) belirlenmeye çalışılır. Yakıt yolu için sistemin dinamik tanımlaması yapılırken göz önüne alınması gereken parametre duvar ıslaklık olgusudur. Manifolda püskürtülen yakıtın bir kısmı buhar fazında hava ile karışım oluşturarak silindir içerisine aktarılırken bir kısmı da manifold duvarlarında, hava yolu çevresinde veya subap üzerinde birikerek ıslaklık oluşturmasıdır. Ayrıca bu yüzeyde oluşan yakıt tabakası buharlaşma hızına bağlı olarak gelecek çevrimler için kontrol edilebilirliği olmayan bir yakıt kaynağı oluşturur. Bu açıklamanın sayısal ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{cases} \dot{m}_y = \varepsilon u_i + \dot{m}_{yf} \\ \tau_y \dot{m}_{yf} + \dot{m}_{yf} = (1 - \varepsilon) u_i \end{cases} \quad (2.22)$$

Bu denklem içerisinde yer alan ε , püskürtülen yakıtın buhar fazında silindir içerisine yönelen oranı, u_i yakıt enjeksiyon komutunu belirtmektedir. τ_y ise buharlaşma hızı için türetilmiş bir sabit olarak karşımıza çıkmaktadır (Souder *et al.* 2004).



Şekil 2.4. Yakıt enjeksiyon denetim sistemi şeması

2.5.4. Krank mili dinamiği

Motor torku krank açısı ve silindir içi basınca bağlı olarak değişebilen kararsız bir etkendir. Krank mili dinamiği incelenirken üretilen motor torku, yük (τ_l), sürtünme (τ_f) ve krank mili üzerindeki atalet mometinden (J) faydalanılarak açıklanabilir. N silindirli bir motorda tam bir çevrim için aşağıdaki eşitlik verilmiştir (Shen *et al.* 2016).

$$J\ddot{\theta} = \sum_{i=1}^n \tau_{e,i} - \tau_l - \tau_f \quad (2.23)$$

Tork üretimi ayrı zamanlarda gerçekleşen bir olaydır. Fakat ortalama değer modeli ile krank mili dinamiği incelenirken yine ortalama bir tork ifadesi elde etmek gerekir. Tork üretimi sırası ile emme zamanı ve sıkıştırma zamanının tamamlanmasının ardından başlar. Standart koşullarda birim kütledeki hava için tam yanma durumunda açığa çıkan ısı enerjisi Q ile ifade edildiği durumda, silindir içerisine giren dm_i kütlesi için Qdm_i miktarınca ısı açığa çıkacaktır. Isı enerjisinin mekanik enerjiye dönüşen kısmını belirlemek için ateşleme avansı ve karışımın hava-yakıt oranına bağlı bir değişken yanma verimini de kapsayan genel bir katsayı (c_y) kullanılarak,

$$\tau_e = \frac{Qc_f \rho_a V_c \eta}{4\pi P_a} p_m(t - t_d) \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilir (Shen *et al.* 2016).

Sürtünme torku ise;

$$\tau_f = D \omega_n + D_0 \quad (2.25)$$

ifadesiyle açıklanırken buradaki D ve D_0 iki farklı sabittir.

Maksimum tork kapasite göz önüne alınırken burada ateşleme avansının etkisini (f_s) ve hava fazlalık katsayısının etkisini (f_λ) maksimum değerde $[(f_\lambda), (f_s) = 1]$ kabul edilebilir (Jiao *et al.* 2013). Sonuç olarak, krank mili dinamiği motor torku ve sürtünme torkuna bağlı olarak yeniden düzenlendiğinde;

$$\begin{cases} \dot{\omega}_n(t) = a_1 p_m(t - t_d) - \bar{D} \omega_n(t) - T_D \\ \dot{p}_m(t) = a_u u_{th}(t) - a_2 p_m(t) \omega_n(t) \end{cases} \quad (2.26)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada kullanılan parametrelerin karşılıkları aşağıda verilmiştir.

$$a_1 = \frac{c_f \rho_a V_c \eta Q}{4\pi J P_a}, \quad \bar{D} = \frac{D}{J}, \quad T_D = \frac{D_0 + \tau_l}{J},$$

$$a_u = \frac{RT_m}{V_m} A_{th} \left(\frac{\pi}{2}\right) \psi(P_b, T_a), \quad a_2 = \frac{RT_m \rho_a V_c \eta}{V_m 4\pi P_a},$$

Bu parametrelerin belirlenebilmesi için öncelikle örnekleme zamanına bağlı olarak elde edilmiş verilerin birbirleri arasındaki ilişkinin tanımlanması gerekir. Burada ardışık veriler arasındaki ilişki,

$$P_m(t_{k+1}) - P_m(t_k) = a_u T u_{th}(t_k) - a_2 T P_m(t_k) \omega_n(t_k) \quad (2.27)$$

$$\bar{\omega}(t_{k+1}) = (1 - \bar{D}T)\bar{\omega}(t_k) + a_1 T \bar{P}_m(t_k) \quad (2.28)$$

ifadeleriyle tanımlanabilir. Burada $t_k = kT (k = 1, \dots, n)$ şeklinde anlık örnekleme verilerine karşılık gelmektedir..

Sistemi tanımlayan matematiksel eşitliklerin içerisinde yer alan parametreler, sistem üzerinden belirli bir örnekleme zamanıyla alınan gaz kelebeği açıklık oranına bağlı olarak ω_n ve p_m verileri literatürde özyinelemeli en küçük kareler yöntemi olarak isimlendirilen bir sayısal algoritma ile hesaplanarak belirlenmektedir. Aşağıda bu parametre kestirim algoritmasından bahsedilmektedir.

2.5.5. Özyinelemeli en küçük kareler yöntemi

Modeli oluşturmak için sistemin giriş değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak çıkışı tanımlamak gerekmektedir. Eşitlik 2.29'da ifade edilen denklemde kontrolcü çıkışı $u(t)$, bozucu değişken $v(t)$ ve sistem çıkışı ise $y(t)$ ile gösterilmiştir (Bobal *et al.* 2013).

$$y(t) = f(u(t), v(t), t) \quad (2.29)$$

Gerçek zamanlı uygulamalarda sürekli zaman yerine ayrık zaman tercih edilmektedir. Çünkü kontrol ve diğer algoritmaların üzerinde çalışıldığı bilgisayar yalnızca ayrık zaman dizilerinde çalışmaktadır. $t_k = kT_0 (k = 0, 1, 2, 3, \dots)$. Burada T_0 ise örnekleme zamanını göstermektedir. Buna göre bir dinamik sistemin çıkışı ayrık zamanda önceki zaman noktasında aldığı değerlerin bir fonksiyonu olarak Eşitlik 2.30'daki gibi tanımlanması mümkün olmaktadır.

$$y(k) = [f(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_a), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b), v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-n_d), k)] + n_k \quad (2.30)$$

Burada $y(k)$, k örnekleme aralığında çıkış değişkeninin değeri iken $n(k)$ ise gürültü sinyalini göstermektedir. Eşitlik 2.31'de ise gürültü sinyalinin rasgele gürültü sinyali olarak tanımlandığında ise elde edilen denklem görülmektedir.

$$y(k) = [f(y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n_a), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b), v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-n_d), e(k), e(k-1), \dots, e(k-n_c), k)] \quad (2.31)$$

Burada $e(k)$ sistemde sıfır ortalamalı beyaz gürültü olarak tanımlanmaktadır. Buna göre Eşitlik 2.31 ile ifade edilen denklem z domeninde ifade edildiğinde ARMAX (oto regresif hareketli ortalamalar) modeli elde edilecektir.

$$A(z^{-1})y(k) = B(z^{-1})u(k) + D(z^{-1})v(k) + C(z^{-1})e(k) \quad (2.32)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + \dots + a_{n_a}z^{-n_a}$$

$$B(z^{-1}) = 1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + \dots + a_bz^{-n_b}$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1z^{-1} + c_2z^{-2} + c_3z^{-3} + \dots + c_{n_c}z^{-n_c}$$

$$D(z^{-1}) = 1 + d_1z^{-1} + d_2z^{-2} + d_3z^{-3} + \dots + d_{n_d}z^{-n_d} \quad (2.33)$$

Fakat ARMAX modeli uyarlamalı denetim için tamamen uygun bir model olmamaktadır (Bobal *at al.* 2012). Bundan dolayı uyarlamalı denetim uygulamalarında ARX regresyon modeline göre tasarım yapılmaktadır. ARX regresyon modeli genellikle Eşitlik 2.33'deki gibi vektör formunda ifade edilmektedir.

$$y(k) = \theta^T(k)\varphi(k-1) + e(k) \quad (2.34)$$

Burada

$$\theta^T(k) = [-y(k-1), -y(k-2), \dots, -y(k-n_a), u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-n_b), v(k-1), v(k-2), \dots, v(k-n_d)] \quad (2.35)$$

$\theta^T(k)$ vektörü regresör olarak adlandırılmaktadır.

Bu ifadede yer alan (a_1, a_2, b_1, b_2) parametrelerin belirlenmesinde uyarlamalı unutma (forgetting factor) çarpanına sahip öz yinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır.

k zamanında öngörülen sistem çıkışı (\hat{y}_k) sisteme uygulanan önceki giriş ve çıkış değerlerine bağlıdır.

$$\hat{y}_k = -\hat{a}_1 y(k-1) - \hat{a}_2 y(k-2) + \hat{b}_1 u(k-d-1) + \hat{b}_2 u(k-d-2) \quad (2.36)$$

Parametreler vektör formunda ifade edilecek olursa;

$$\hat{y}_k = \theta_{k-1}^T \varphi_k$$

$$\theta_{k-1}^T = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1, \hat{b}_2]$$

$$\varphi_k^T = [-y_1, -y_2, u_1, u_2] \quad (2.37)$$

Proses parametreleri Eşitlik 2.37 ile verilen denklem belirlenen örnekleme adımında güncellenmektedir.

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \frac{C_{k-1} \cdot \varphi_k}{1 + \delta} (y_k - \theta_{k-1}^T \varphi_k) \quad (2.38)$$

Eşitlik 2.38'de yer alan ifade C kovaryans matrisini ifade etmektedir ve her yeni adımda Eşitlik 2.39 ile güncellenmektedir.

$$C_k = C_{k-1} - \frac{C_{k-1} \cdot \varphi_k \cdot \varphi_{k-1}^T \cdot C_{k-1}}{\varepsilon^{-1} + \delta} \quad (2.39)$$

$$\varepsilon = \gamma_{k-1} - \frac{1 - \gamma_{k-1}}{\delta} \quad (2.40)$$

γ ile ifade edilen unutma çarpanı ise Eşitlik 2.41 ile güncellenmektedir.

$$\gamma_k = \frac{1}{1 + (1 + \rho)[\ln(1 + \delta) + \left((\vartheta_k + 1)\eta / (1 + \delta + \eta) - 1 \right) \frac{\delta}{1 + \delta}]} \quad (2.41)$$

Eşitlik 2.41 içinde yer alan parametreler Eşitlik 2.42 ile belirlenmektedir (Bobal *et al.* 2012).

$$\begin{aligned} \vartheta_k &= \gamma_{k-1}(\vartheta_{k-1} + 1) \\ \eta &= \frac{(y_k - \theta_{k-1}^T \varphi_k)^2}{\lambda_k} \\ \lambda_k &= \gamma_{k-1} \left[\lambda_{k-1} + \frac{(y_k - \theta_{k-1}^T \varphi_k)^2}{1 + \delta} \right] \end{aligned} \quad (2.42)$$

Sistemi tanımlayan transfer fonksiyonuna ait parametrelerin öngörülmesi uyarlamalı en küçük kareler yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.5.6. PID

PID denetimcisi hem sabit durum, hem de değişken dinamik yapılar için basit ve etkili kontrol yapısı ile bilinmektedir. Bu sebeple endüstrideki kontrol çözümlerinin bir çoğu bu denetim yapısını kullanmaktadır (Ang *et al.* 2005). Yapısında üç kontrolcü terimi bulunduran bu denetimci üzerindeki transfer fonksiyonu

$$G(s) = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$

veya

$$G(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$$

şeklinde iki farklı formda ifade edilebilir. Burada K_P oransal kazanç katsayısı, K_I integral kazanç katsayısı ve K_D türev kazanç katsayısı iken, T_I integral zaman sabiti ve T_D türev zaman sabitidir. K_P kontrolcü sinyalini hata ile orantılı olarak değiştiren bir sabit iken, integral katsayıları ($K_I - T_I$) daha düşük frekanslı etkisi ile sabit durum hata bandını iyi oranda daraltır. K_D veya T_D türev kazanç faktörleri ile de geçiş şartlarında oluşabilecek aşırı salınımların önüne geçerek kontrol süresini kısaltır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde uygulanan deneysel yöntem açıklanmış, ve ekipmanların tanıtımı yapılmıştır.

3.1. Deneysel Yöntem

Bu tez çalışması kapsamında Ford MVH418 tipi motor kullanılmıştır. Buji ateşlemeli, 4-stroklı motorumuz port yakıt enjeksiyon sistemine sahiptir. Atiker marka safe fast modelinde LPG dönüşüm kiti uygulanmış ve gerekli ekipmanların montajı yapılmıştır. Ayrıca motor üzerindeki mekanik gaz kelebeği elektronik gaz kelebeği ile değiştirilerek kelebek açıklık oranı kontrol edilmiş bu açıklık değerine karşılık farklı devirlerde deneyler yapılmıştır. Kullanılan motorun teknik özellikleri Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Yapılan deneylerde, Kistler 4503A model tork sensörü ile motor üzerindeki yük bilgisi elde edilmiştir. Motor bloğu soğutma suyu ve hidrolik fren için 25 ton kapasiteli bir su tankı kullanılmıştır.

Motor test düzeneği üzerinde bulunan sensör ve cihazlar ile bağlantı National Instrument firması tarafından üretilen PCIe-6363 modeli veri toplama (Data Acquisition) kartı kullanılarak bilgisayar ortamına istenildiğinde kaydedilmek üzere aktarılmıştır. Ayrıca, tez kapsamında tasarlanan kontrol sisteminde kullanılan yine aynı firmaya ait FPGA (Alan programlanabilir kapı dizileri) tabanlı çalışan ve özellikle yüksek hız gerektiren gerçek zamanlı uygulamalarda sıklıkla kullanılan Compact Rio şasi ve bu şasiye ait kam mili sensörü için AD Combo modülü, Port yakıt enjektör sürücü modülü ve oksijen sensör modülü kullanılmıştır. Bundan başka kullanılan bu modülle FPGA tabanlı analog sinyal ölçümü de gerçekleştirilebilmektedir.

Çizelge 3.1. Deneyleerde kullanılan motora ait teknik özellikler

Motor Tipi	Ford MVH418, 4-Stroklı, Su Soğutmalı, Yakıt Püskürtmeli, Buji Ateşlemeli
Silindir Tipi ve Sayısı	Sıra Tipi, 4 Silindirli, Dohc-16V
Ateşleme Sırası	1-3-4-2
Çap	80.6 mm
Strok	88 mm
Kapasite	1796 cm ³
Sıkıştırma Oranı	10 : 1
Maksimum Güç	6250 d/dak'da 93 kW
Maksimum Moment	4500 d/dak'da 157 Nm
Rölanti Devri	900 ± 50 d/dak
Buji Ateşleme Açıklığı	1.3 mm
Yakıt	LPG - Kurşunsuz Benzin
Yakıt Emme Sistemi	BOSH KE-Jetronik
Krank Yarı Çapı	44 mm
Emme Açılma Avansı	6 ⁰ KMA
Emme Kapama Gecikmesi	54 ⁰ KMA
Egzoz Açılma Avansı	54 ⁰ KMA
Egzoz Kapama Gecikmesi	6 ⁰ KMA

3.2. Deneyleerde Kullanılan Cihaz ve Yazılımlar

Bu çalışma kapsamında kullanılan cihazlar ve hazırlanan yazılımlar aşağıdaki şekildedir

- 1- Emme havası debi sensörü
- 2- Tork sensörü
- 3- Veri toplama kartı
- 4- Genişband Lambda sensörü
- 5- Oksijen Sensör Modülü
- 6- Analog giriş modülü
- 7- Port Yakıt Enjektör Sürücü Modülü
- 8- FPGA tabanlı şasi
- 9- Kontrol sistemi ve diğer motor parametrelerin izlenmesi için tasarlanan yazılımlar

3.2.1. Emme havası debi sensörü

Sierra Marka 628S-BW2-EN2-V1-DD tipi akış sensörü kullanılarak silindir bloğuna giren hava debisi ölçümü yapılmıştır. Şekil 3.1 ile ilgili cihazın görünümü ve boyutları verilmiştir. Ayrıca teknik özellikleri Çizelge 3.2 ile verilmiştir.



Şekil 3.1. Emme havası debi sensörünün genel görünümü

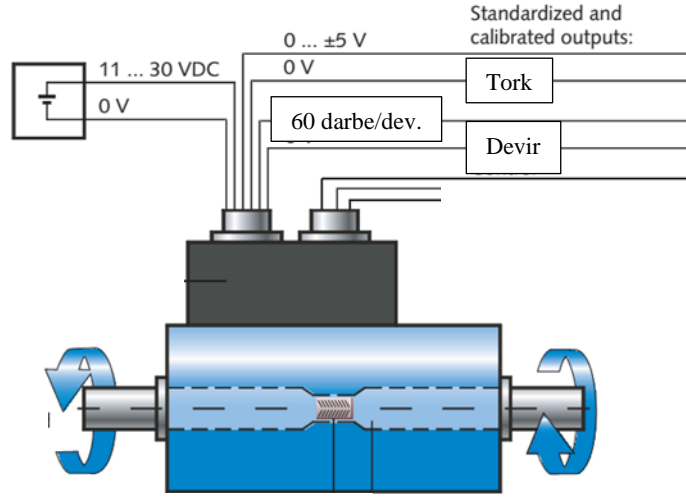
Çizelge 3.2. Emme havası debi sensörünün teknik özellikleri

Gaz	Hava
Güç gereksinimi	18-30 VDC
Çıkış sinyali	0-5 VDC
Cevap süresi	200 milisaniye
Doğruluk (Tam skala)	% 1
Kalibrasyon çıkış voltajı	Debi (kg/saat)
0.004 Volt	0.623
1.250 Volt	194.750
2.510 Volt	391.058
3.770 Volt	587.366
4.958 Volt	772.456

Cihazın kalibrasyon sertifikasında belirtilen ve yukarıda verilen kalibrasyon verileri kullanılarak cihazın çıkış sinyalinin veri toplama kartında şartlandırılmasının ardından ölçümler yapılmıştır.

3.2.2. Tork sensörü

Deneyleerde, Kistler 4503A model tork sensörü kullanılmıştır. İlgili sensörün genel görünümü Şekil 3.2 ile verilmiştir. Çizelge 3.3 ile de teknik özellikleri sunulmuştur.



Şekil 3.2. Tork sensörünün genel görünümü

Çizelge 3.3. Tork sensörünün teknik özellikleri

Tork ölçüm aralığı	0-500 Nm
Devir sayısı ölçüm aralığı	0-8000 d/dak
Çalışma sıcaklığı	10-60°C
Analog çıkış sinyali	0-5 Volt
Besleme voltajı	11-30 VDC
Doğruluk	0.1

Deneyleerde alınan tork ve devir sayısı ölçümleri bu mekanik olarak bağlantısı kurulmuş olan tork sensörü sensör ile gerçekleştirilmiştir.

3.2.3. Veri toplama kartı

Veri toplama kartı olarak National Instrument firması üretimi olan PCIe-6363 modeli veri toplama (Data Acquisition) kartı kullanılmıştır. Veri toplama kartının görünümü Şekil 3.3, teknik özellikleri Çizelge 3.4 ile verilmiştir. Devir sayısı ve tork ölçümü için tork sensörünün çıkışları ve hava debisi bilgisi bu veri toplama kartı ile ölçülmüştür ve

alınan bu veriler LabView ortamında hazırlanan programlar ile işlenmiş ve veri kaydı yapılarak analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Veri toplama kartının görünümü

Çizelge 3.4. PCIe-6363 modeli veri toplama kartının teknik özellikleri

Genel	
Ürün adı	PCIe-6363
Ürün ailesi	Çok fonksiyonlu veri toplama
Form faktörü	PCI Express
LabVIEW RT Desteği	Evet
DAQ Ürün ailesi	X Serileri
Ölçüm tipi	Çeyrek enkoder, Dijital, Frekans,
İzolasyon tipi	Yok
RoHS Uyumu	Evet
Analog giriş	
Kanallar	32, 16
Tek uçlu kanallar	32
Diferansiyel kanallar	16
Çözünürlük (Kararlılık)	16 bit
Örnekleme sayısı	2 MS/s
Üretilen (Tüm kanallar)	1 MS/s
Maksimum voltaj	10 volt
Maksimum voltaj aralığı	-10 V, 10 V
Maksimum voltaj aralığı doğruluğu	1,66 mV
Minimum voltaj aralığı	-0,1 V, 0,1 V
Minimum voltaj aralığı doğruluğu	33 µV
Örnekleme sayısı	7
Eşzamanlı örnekleme	Yok

Çizelge 3.4. (devam)

Analog çıkış	
Kanallar	4
Çözünürlük (Kararlılık)	16 bit
Maksimum voltaj	10 volt
Maksimum voltaj aralığı	-10 V, 10 V
Maksimum voltaj aralığı doğruluğu	1,89 mV
Minimum voltaj aralığı	-5 V, 5 V
Minimum voltaj aralığı doğruluğu	935 μ V
Güncelleme oranı	2.86 MS/s
Tekli güncel sürücü	5 mA
Dijital Giriş / Çıkış	
Çift yönlü kanallar	48
Sadece girdi kanalları	0
Sadece çıktı kanalları	0
Zamanlama	Yazılım, Donanım
Maksimum giriş aralığı	0 V , 5 V
Maksimum çıkış aralığı	0 V , 5 V
Sayaç / Zamanlayıcılar	
Sayaçlar	4
Maximum Aralık	0 V , 5 V
Maksimum kaynak frekansı	100 MHz
Darbe Üretimi	Evet
Çözünürlük	32 bits

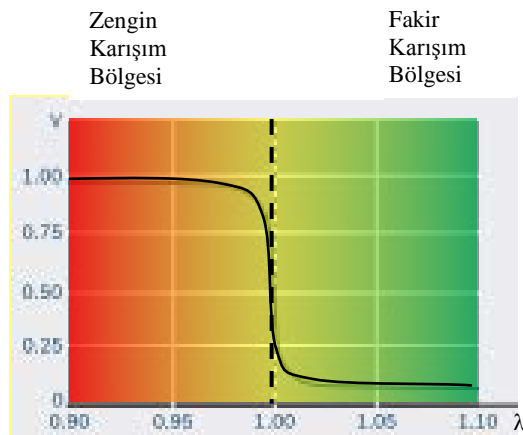
3.2.4. Geniş-bant lamda sensörü

Oksijen sensörü egzoz gazları içerisindeki oksijen konsantrasyonunu belirlemek amacıyla kullanılmış bu veri hava yakıt oranı kontrolünde kullanılmıştır. Yakıtın yanması sonucunda egzoz gazı ile çevre havası arasında ciddi bir oksijen konsantrasyonu farkı bulunacaktır. Oksijen sensörü, yüksek O₂ konsantrasyonlu çevre havasından düşük O₂ konsantrasyonuna sahip egzoz gazı bölgesine geçmek isteyen O₂ moleküllerinin indirgenmesine imkân sağlayarak aynı anda bir potansiyel fark oluşturur.

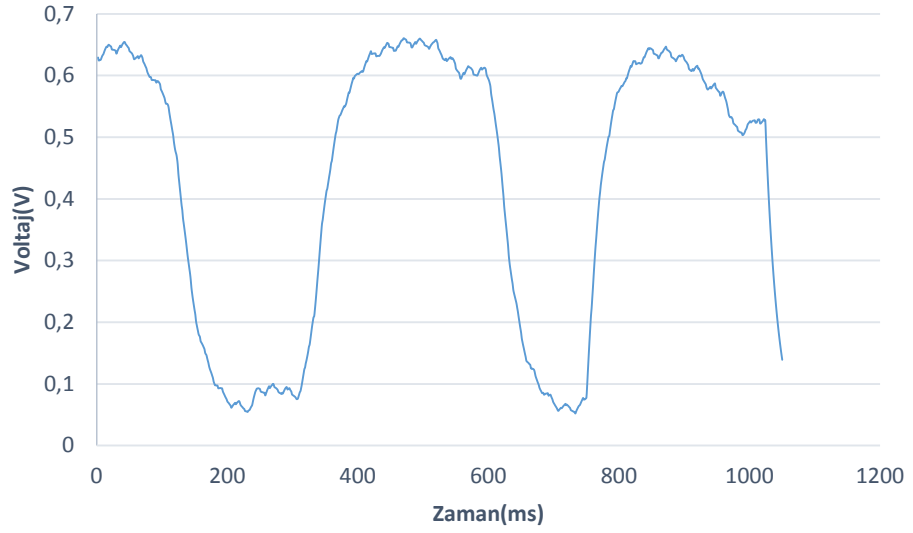


Şekil 3.4. Geniş Bant Oksijen Sensörü (Bosch 2016)

Dar bant oksijen sensörlerinde bu potansiyel fark doğrudan hava fazlalık katsayısı ile ilişkilendirilmiştir. 0.45-0.50 mV gibi bir değer $\lambda=1$ olarak değerlendirilir. Zengin karışımda ($\lambda < 1$) bu çıkış voltajı (U_s) 800-1000 mV değerlerine ulaşabilirken fakir karışımda ($\lambda > 1$) $U_s \cong 100$ mV civarına düşer (Şekil 3.5). Araç beyinde bu sinyal fakir ya da zengin karışım olarak değerlendirilirken $\lambda=1$ değeri için net bir öngörü yapmak oldukça güçtür. Bu tip sensör kullanılarak gerçekleştirilen hava yakıt kontrolünde karışım ardı ardına zengin karışım- fakir karışım voltajı üretir (Şekil 3.6).

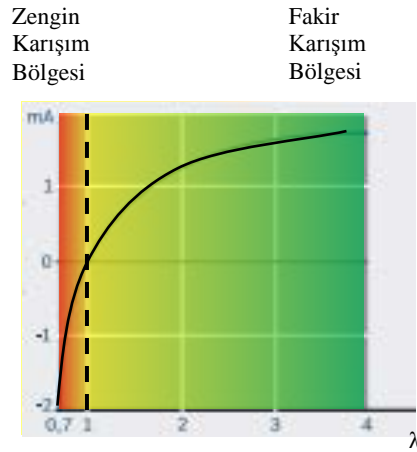


Şekil 3.5. Dar bant O₂ sensörü voltaj(V)/ lambda(λ) grafiği



Şekil 3.6. Dar band O₂ sensörü voltaj değişimi

Yeni teknolojiye sahip geniş bant oksijen sensörleri ise daha geniş çalışma aralığına sahiptir. Bu tip sensör yardımıyla hava fazlalık katsayısı değerinin $0.7 < \lambda < \infty$ aralığında kesin bir şekilde ölçülebilir olması, zengin şartlarda veya fakir şartlarda da kararlı çalışma olanağı verir. Bu yüzden dizel araçlarda da kullanıma elverişlidir.



Şekil 3.7. Dar bant O₂ sensörü voltaj(V)/ lambda(λ) grafiği

Çizelge 3.5. Oksijen sensörü teknik özellikleri (Bosch 2016)

Teknik Özellikler	
λ Ölçüm aralığı	0,65 - ∞
Egzoz Gaz basıncı	$\leq 2,5$ Bar
Egzoz Gazları Çalışma Sıcaklığı	$< 930^{\circ}\text{C}$
Egzoz Gazları Çalışma Sıcaklığı (Maks.) Kısa süreli	$< 1030^{\circ}\text{C}$
Koruyucu kılıf ve Kablo Sıcaklığı	$< 250^{\circ}\text{C}$

3.2.5. Oksijen sensör modülü

National Instruments firmasına ait NI 9757 modülü, egzoz gazı içerisindeki O_2 konsantrasyonunu belirleyip ve bu veri daha sonra hava yakıt oranı kontrolü için geri bildirim sağlaması amacıyla kullanılmıştır. İki kanal geniş band kontrolcü ve dört sığ kanal girişi bulunduran modül, fpga ve real time görsel enstrüman (VI) arayüzleri ile entegre edilmiştir.

O_2 sensor modülü iki farklı kaynak ile beslenmiştir. Birinci kaynak olarak compactRio arka planında regüle edilmiş 5 volt çıkışı kullanılmış, ve bu şekilde modül içerisindeki sayısal mantık fonksiyonlarının işletilmesine imkan sağlanmıştır. İkinci kaynak olarak da akü kullanılarak O_2 sensörü yapısında bulunan ısıtıcı için ilk 30 saniye süresince 2A daha sonra ise 1 A lik akım ihtiyacı karşılanmıştır. Bu ısıtıcı akımının kontrolü geniş bant O_2 sensörlerinde modül tarafından kontrol edilmiştir (National Instruments 2015).



Şekil 3.8. NI 9757 O₂ sensör modülü (National Instruments 2015)

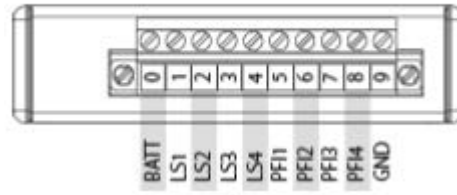
3.2.6. Port yakıt enjektör sürücü modülü

Çalışmamızda LPG enjektörleri National Instruments firmasına NI 9758 Modülü kullanılarak sürülmüştür. Bu Port yakıt enjektör sürücü (PFI) modülü arka planındaki logic devreler compactRio şasisinden regüle edilen 5 V çıkışı kullanılarak işletilmiştir. Şekil 3.3 de kullanılan modül gösterilmektedir.

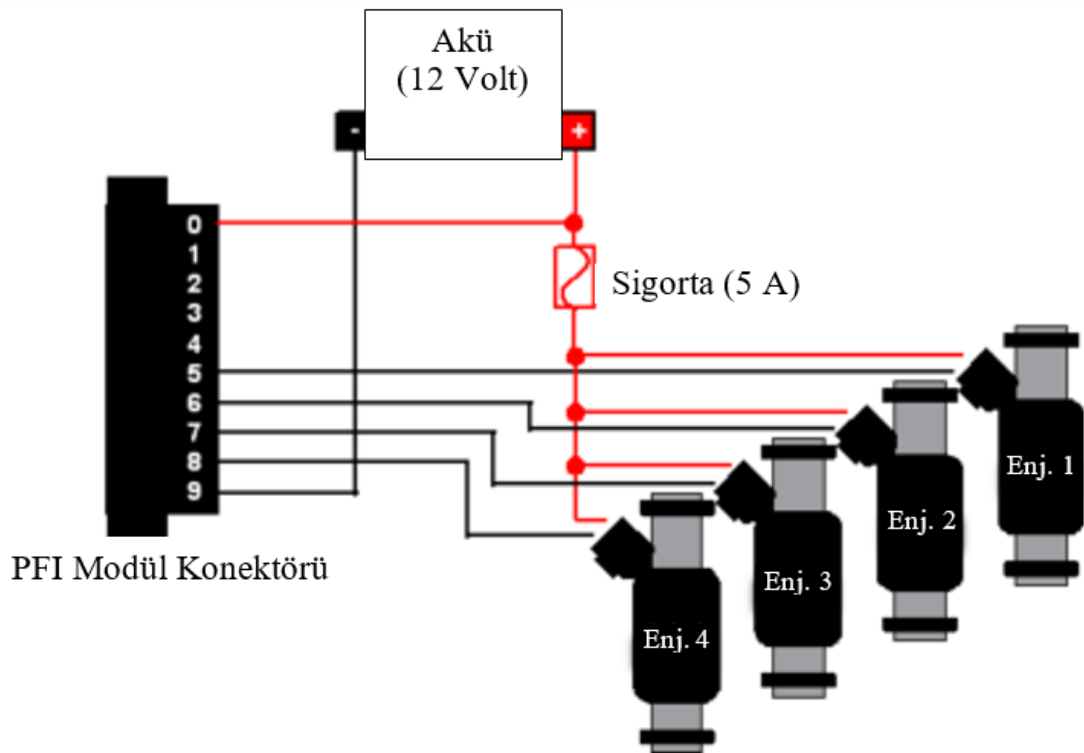


Şekil 3.9. Port yakıt enjektör sürücü modülü (National Instruments 2013)

Harici güç kaynağı olarak yine akü kullanılmış akü, PFI modülü ve LPG enjektörleri arasında kapalı devreler oluşturulmuştur. Bu devrede anahtarlama görevi Modül ile sağlanmaktadır. Modül bağlantı girişleri Şekil 3.10'da verilmiştir. Ayrıca Enjektör bağlantıları Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. PFI modülü girişleri (National Instruments 2013)



Şekil 3.11. LPG enjektörleri ile Port yakıt sürücü modül bağlantısı (National Instruments 2013)

Oluşturulan görsel programın(VI) ile sürücü bağlantısı oluşturularak LPG enjektörlerine birbirinden bağımsız olarak sinyal gönderilmiştir. Ardışık olarak üretilen LPG enjektörü sinyalleri emme zamanından yeterli miktar öncesinde ilgili enjektöre gönderilmiştir. Kullanılan VI programı enjeksiyon süresi kontrol edilirken enjeksiyon zamanına da müdahale edilebilecek şekilde tasarlanmıştır.

3.2.7. Analog giriş modülü

Bu çalışma kapsamında otomotiv tipi analog ve sayısal sinyallerin ölçülmesinde yine Drivven firmasına ait AD combo analog giriş modülü kullanılmıştır. Bu modül sayesinde motor üzerinde krank mili sensörü ve kam mili sensörü ölçüm bilgileri elde edilerek uygun krank mili açısında enjeksiyon başlatılmıştır. Adı geçen modülün görüntüsü Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Analog giriş modülü (Drivven 2012)

Bu sensörlerin yapısında sabit mıknatıs özelliğinde, çekirdeği çevreleyen sargılar bulunur. Mil üzerine monte edilmiş disk üzerinde bulunan dişli yapının dönme hareketine bağlı olarak görülen manyetik alan değişimi, sensörde bir analog sinyal oluşturur. Şekil 3.18’de krank mili üzerine monte edilmiş diskin yapısı görülmektedir.

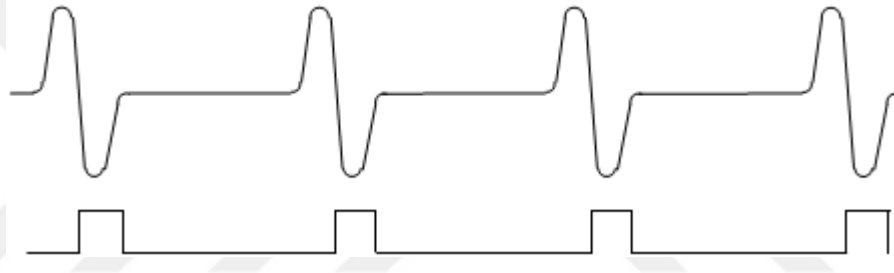


Şekil 3.13. Disk diş yapısı



Şekil 3.14. Krank mili sensöründen alınan sinyal biçimi

Şekil 3.14’de sensör üzerinden alınan analog işaret, modül tarafından genliğin sıfırın altındaki negatif bölgelerde TRUE, sıfırın üstündeki bölgelerde ise FALSE değerinin üretilmesiyle dijital sinyal şekline dönüştürülmektedir (Drivven 2012). Böylelikle, sıfır geçiş noktası dikkate alınmaktadır. Bu durum Şekil 3.15’de gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Krank sensörü çıkış analog sinyali ve dijitalleştirilmesi (Drivven 2012)

3.2.8. Fpga tabanlı şasi

Motor elektronik kontrol birimi (ECU-Engine Control Unit) üzerine yapılan araştırmaları geliştirmek için çeşitli sensör ve aktüatörlerin tasarımlarının yapılmasının yanı sıra motor parametrelerinin efektif ve indike motor karakteristiklerini iyileştirmek üzere ileri kontrol algoritmaları ile denetlenmesi gerekmektedir. Otomobil, kamyon ve motosiklet gibi içten yanmalı motor ile çalışan araçlarda düşük yakıt tüketimi ve yüksek performans sağlamaları için üretici fabrika tarafından laboratuvar koşullarında haritalandırma yöntemi ile tasarlanan motor kontrol ünitesi kullanılmaktadır. Fakat fabrika tarafından yapılan motor kontrol ünitesi oldukça kapalı bir yazılım ve donanıma sahiptir. Bu durum, motor üzerine çalışan araştırmacılar için olumsuz bir durum oluşturmaktadır.(Dase *et al*, 2006)

Temelde Alan Programlanabilir Kapı dizileri herhangi bir sayısal fonksiyonu gerçekleştirilmek için kullanıcı tarafından programlanması yapılan tümleşik devrelerdir. Bu tümleşik devreler paralel işlem yapabilme kapasiteleri ile ön plana çıkmaktadırlar.

FPGA'lerin paralel işlem yapabilme kapasitesine sahip olmaları çok daha hızlı kontrol veya görüntü işleme sistemlerinin tasarlanmasına olanak sağlamıştır. Özellikle bir tümleşik devre içerisinde hem kontrol birimi olarak işlemcinin ve hem de kullanıcıya özel donanımsal fonksiyonların bir arada bulunmasından dolayı işlemci ve diğer donanım birimleri arasındaki veri alış verişi esnasından meydana gelen gecikmeler azalacaktır.

Bu nedenle FPGA sistemlerinin hassas zamanlama ve döngüleri eş zamanlı çalıştırabilme yeteneklerinden dolayı otomotiv kontrol uygulamalarında kullanılmalarının önemi gittikçe artmaktadır. Gömülü FPGA sistemlerinin motor kontrol ünitesi tasarımında kullanılması kullanıcıya esnek bir yapı sunmaktadır. İkinci bir avantajı ise kontrol sisteminde yüksek seviyeli dillerin kullanılması sayılabilir.

Mathworks firması tarafından geliştirilen Simulink ve National Instruments firması tarafından geliştirilen LabView programlama dilleri yüksek seviyeli diller arasında sayılmaktadır. Çünkü adı geçen her iki programlama dili FPGA'nın doğasında var olan veri akış yapısıyla paralellik göstermektedir.

Compact Rio yeniden yapılandırılabilen bir gömülü sistemdir. Bu sistem üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar içerisinde gerçek zamanlı işletim sisteminin çalıştığı bir işlemci, uygulamalara göre yapılandırılabilen bir FPGA tümleşik devresi ve değiştirilebilir endüstriyel giriş çıkış modülleridir. Sistem içerisinde yer alan yeniden yapılandırılabilen FPGA gömülü sistem mimarisinin kalbi gibidir. Şasi için kullanılan her modül doğrudan FPGA ile veri yolları vasıtasıyla bağlantılıdır. FPGA otomatik olarak tasarlanan programların gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde çalışmasına imkân sağlar. Böylece özellikle yüksek hız gerektiren uygulamalara oldukça elverişlidir.

Örneğin, FPGA kullanarak yirmi oransal integral türev (PID) kontrolcü 100 kHz hızında eş zamanlı olarak çalıştırılabilmektedir (National Instruments 2014).

Bu amaçla, bu çalışmada kullanılmak üzere yine National Instruments firması tarafından geliştirilen ve içerisinde FPGA tümleşik devresinin bulunduğu ayrıca LabView programlama dili ile programlanabilen Compact Rio ürünü kullanılmıştır.

NI Compact Rio FPGA şasisi ile kullanılan oksijen sensörü modülü ve port yakıt enjektör modülü arasında oluşturulan LabView programına paralel olarak işlem yapılmasına olanak sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasında kullanılan NI 9075 Compact Rio gömülü sistem şasisine ait görüntü Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



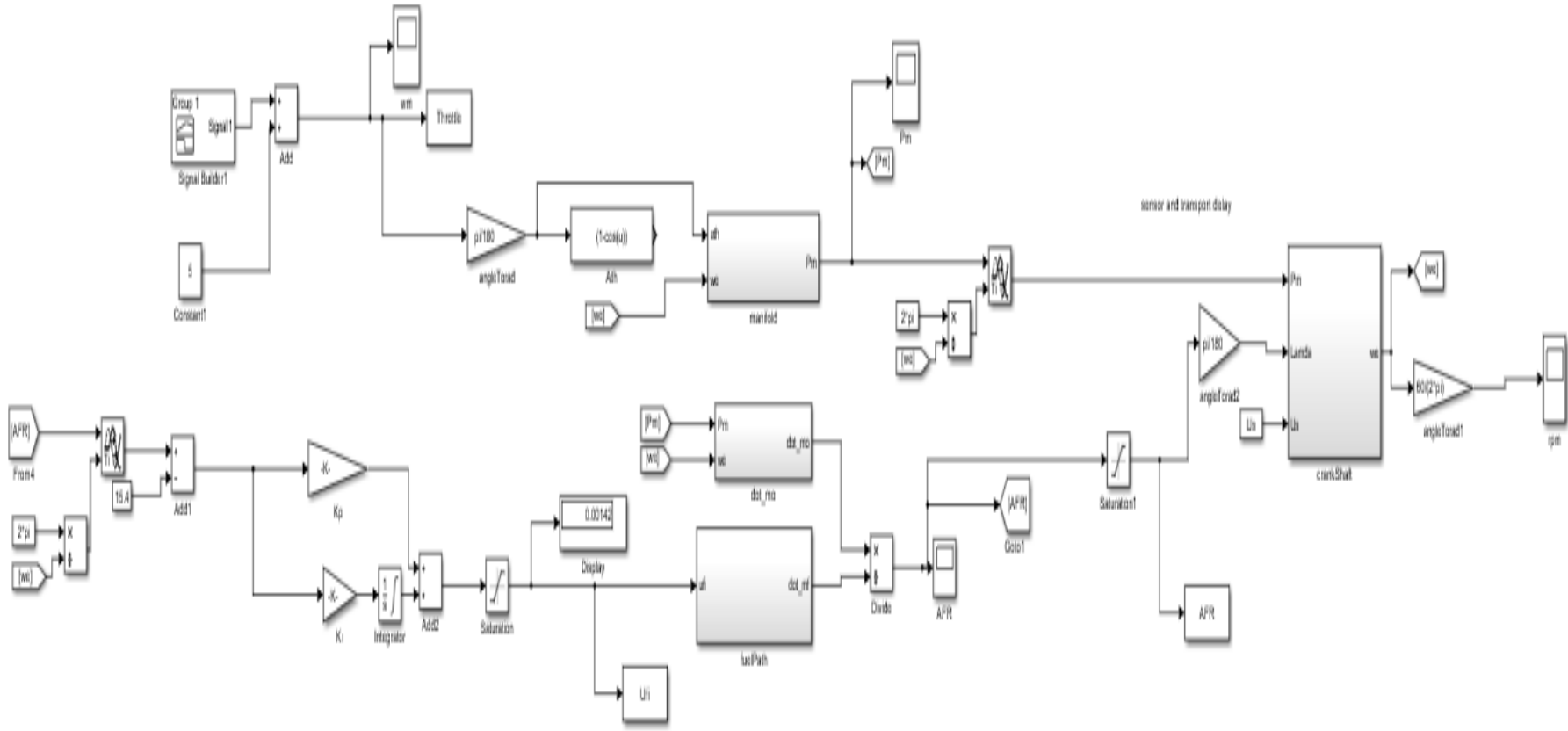
Şekil 3.16. Compact Rio gömülü sistem şasisinin görüntüsü

3.2.9. Kontrol sistemi ve tasarlanan yazılımlar

Kontrol sistemi tasarlanırken ilk önce bir simülasyon programı oluşturularak parametreler belirlenmiş ve deney sistemine benzer hale getirilmiştir. Bunun için

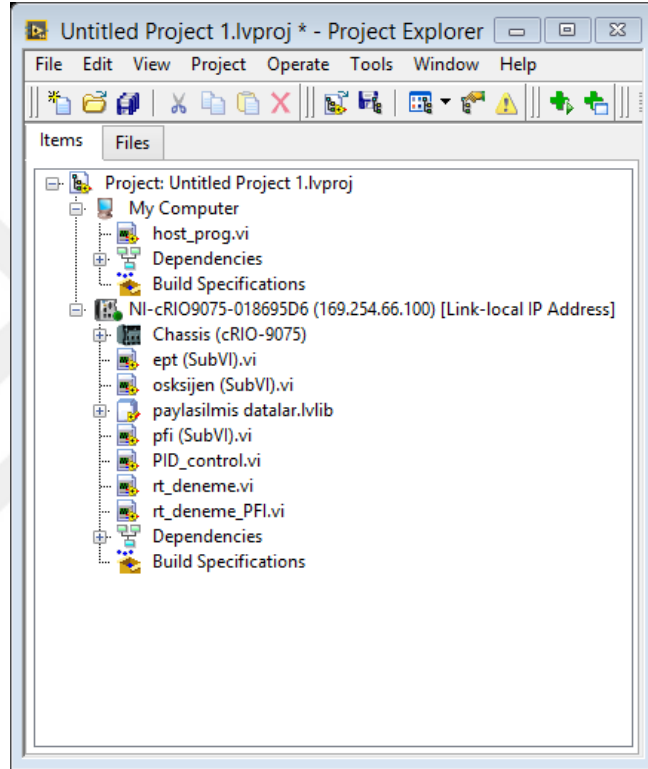
Mathworks firmasının Simulink programından faydalanılmıştır. Simülasyon çalışmasının öbek şeması aşağıda verilmiştir (Şekil 3.17).





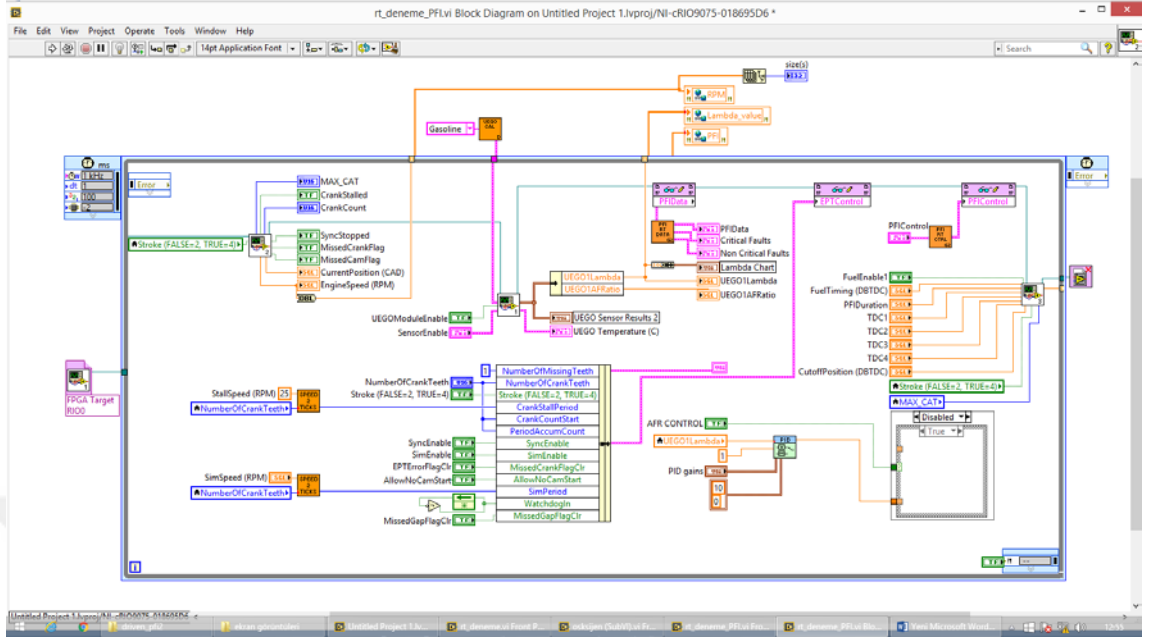
Şekil 3.17. Oluşturulan simulink programı öbek şeması

Deney düzeneğinde ise NI firmasına ait gelişmiş bir görsel programlama dili olan Labview programı kullanılarak çeşitli motor parametreleri gözlemlenmiş ve veriler bu program yardımı ile kaydedilip toplanmıştır. Devir sayısı anlık olarak gözlemlenirken aynı zamanda tork değişiminin izlendiği, ve gaz kelebeği açıklık oranının kaydedildiği bir proje programı oluşturulmuştur.



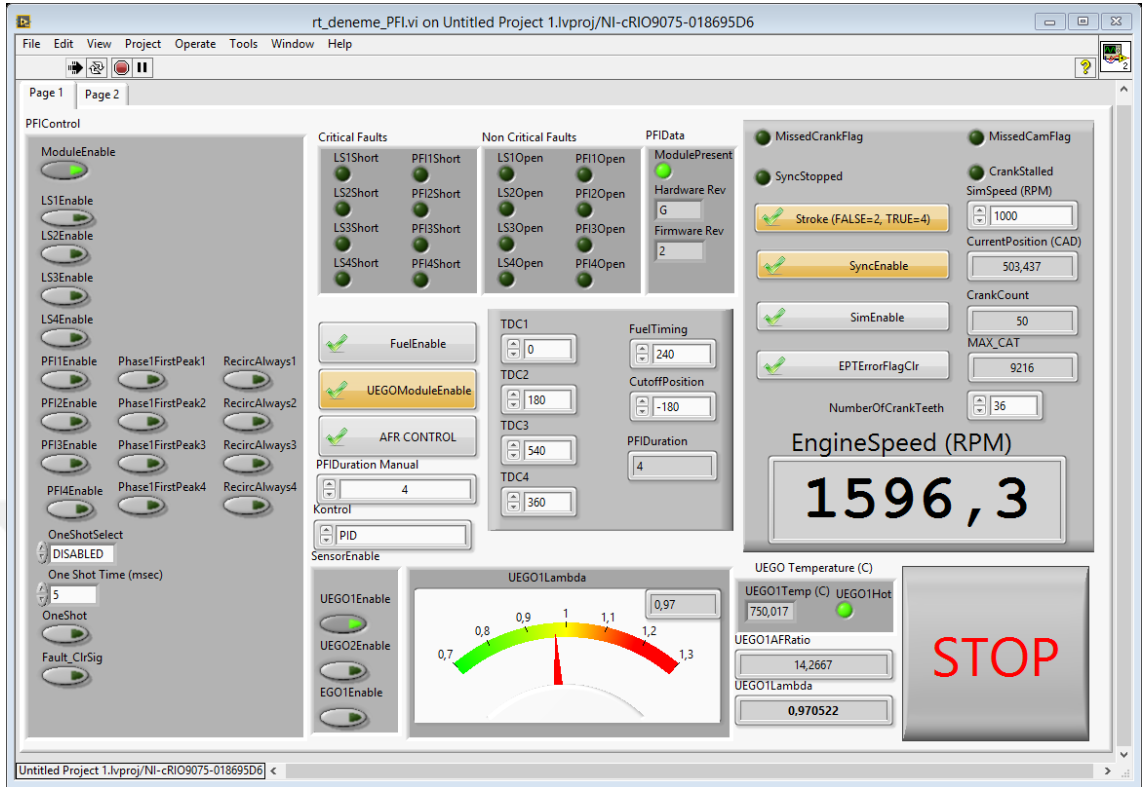
Şekil 3.18. Labview görsel programı üzerinde oluşturulan projenin pencere görüntüsü

Proje programında CompactRio şasisi üzerinde bulunan Analog giriş, Oksijen sensörü ve Port yakıt enjektör modülleri için sırasıyla, ept, oksijen ve pfi alt programları yanısıra, enjeksiyon süresinin kontrolü işlevini yerine getirmek amaçlı PID programı oluşturulmuştur. Bu alt programlar rt_deneme ana programı üzerinde birleştirilmiştir.



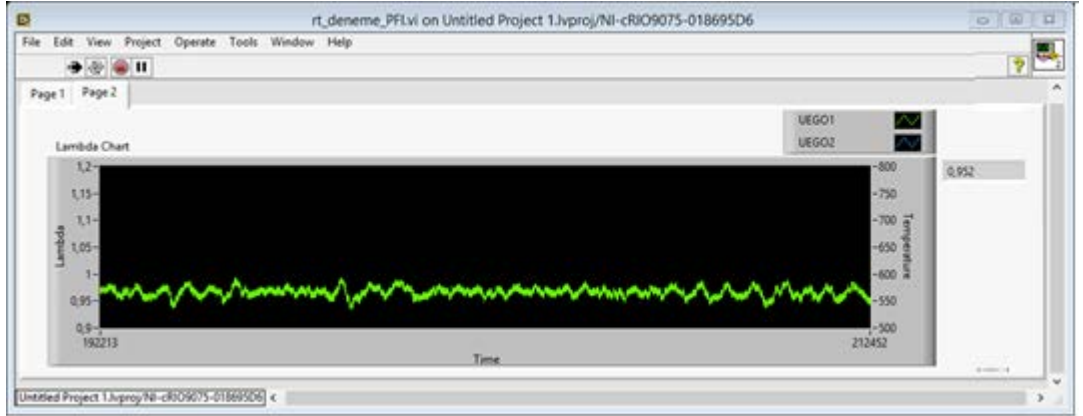
Şekil 3.19. Ana programın arka plan şeması

Oluşturulan bu programın blok diyagramı yukarıdaki şekilde gösterilmektedir. Örnekleme zamanı 1ms olarak belirlenip veriler bu şekilde alınmıştır. Ana programın ön görüntüsü ise aşağıda verilmektedir.



Şekil 3.20. Ana program ilk ekran görünümü

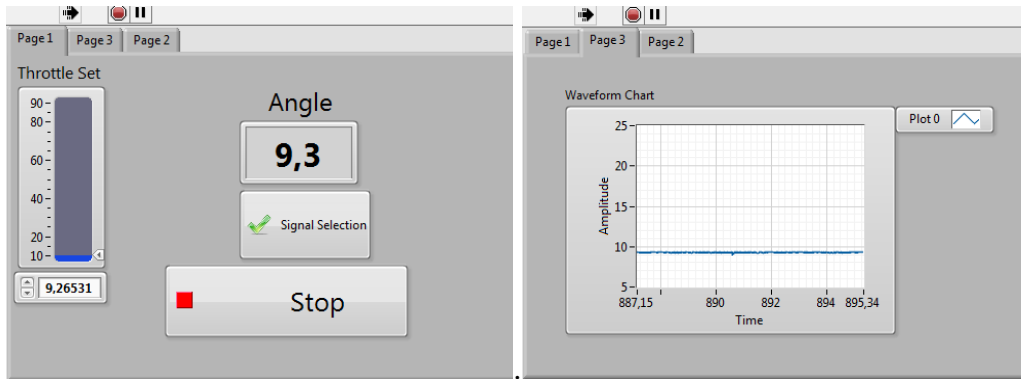
Oluşturulan bu ana program sayesinde FPGA şasisi üzerinde yer alan modüllerle iletişim sağlanmıştır. Gerektiğinde modülleri veya enjektörleri ayrı ayrı devreye alma veya devreden çıkarma gibi işlevler kazandırılmıştır. Ana programın ilk ekran sayfasında devir göstergesi, Krank mili açısı değeri cinsinden silindirler için enjektör püskürtme açıları, enjeksiyon süresi denetiminin devre dışı bırakıldığı durumda dışarıdan müdahaleye izin veren enjeksiyon süresi girdisi yer almaktadır. Yine geniş-bant O_2 sensörü ile ölçülen λ değeri için görselleştirilmiş bir ibre oluşturularak deney süresince gözlem yapma imkanı sağlanmıştır. Ana program ikinci ekran sayfasında ise son 20 sn'lik hava fazlalık katsayısı (λ) verilerinin oluşturduğu sürekli grafik eklenmiştir.



Şekil 3.21. Hava fazlalık katsayısı grafiği

Alt programı pozisyonundaki modül paket programları ile istenildiği takdirde modülleri devreden çıkarabilme kabiliyeti kazandırılan ana program ile hem çalışma güvenliği hem de ekipmanların güvenliği sağlanmıştır.

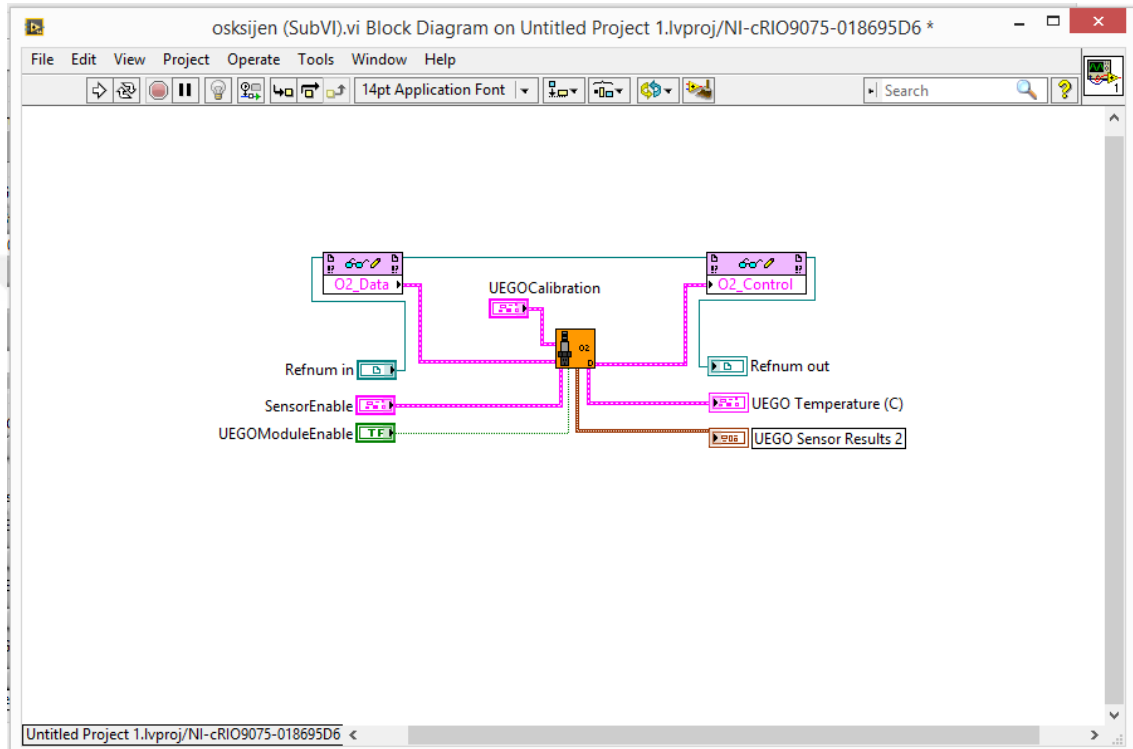
Ayrıca farklı devirlerde yapılacak deneyler için elektronik gaz keleşi pozisyonunu ayarlamak üzere oluşturulan programının ön pencere görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.22. Gaz keleşi kontrol programı ön pencere görüntüleri

Gaz keleşi açıklık oranına program ile müdahale edilmiş istenilen devir elde edilince veri toplanmaya başlanmıştır. Belirli bir zaman dilimindeki gaz keleşi hareketindeki değişimin gözlemlenebilmesi için de bir grafik yerleştirilmiştir.

Kullanılan paket programlardan O₂ sensör programı arka plan şeması aşağıda verilmiştir. Ayrıca farklı yakıtlar için düzenleme ihtiyacı olan kalibrasyon tablosu gösterilmiştir.



Şekil 3.23. O₂ Modülü programı arka plan görüntüsü

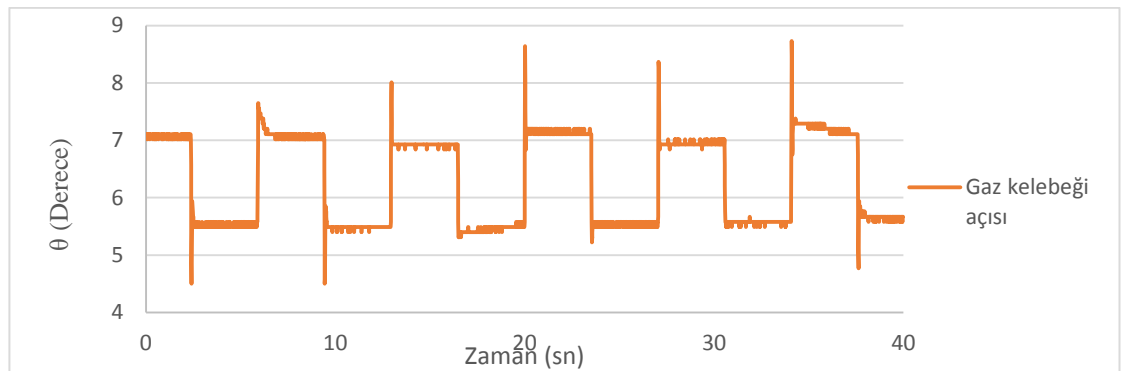
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında Mathworks firmasına ait Simulink programı ile buji ateşlemeli motor için ortalama motor modeli kullanılmış ve geçerliliği test edilmiştir. Öncelikle motor üzerinde deneyimizde kullandığımız sabit devir şartları etrafındaki deneysel verilerden yola çıkarak eşitlik 2.26 ile verilen model parametreleri belirlenmiş ve uygunluğu gözlemlenmiştir. Bu parametreler belirlenirken Bölüm 2.5.5'te tanımlanan özyinelemeli en küçük kareler yönteminden faydalanılmıştır. Bu yöntem ile belirlenen parametreler aşağıda verilmiştir.

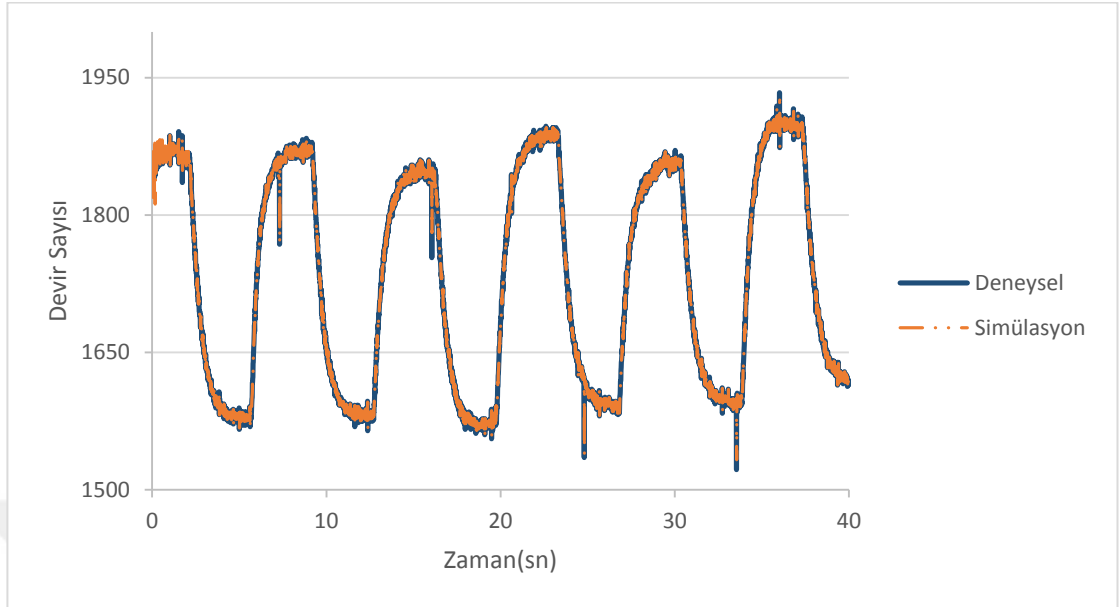
Çizelge 4.1. Özyinelemeli en küçük kareler yöntem ile belirlenen parametre değerleri

a_1	a_2	a_u	\bar{D}	T_D
$1,25 \times 10^{-4}$	0,040778453	$1,75 \times 10^6$	0,9231	144

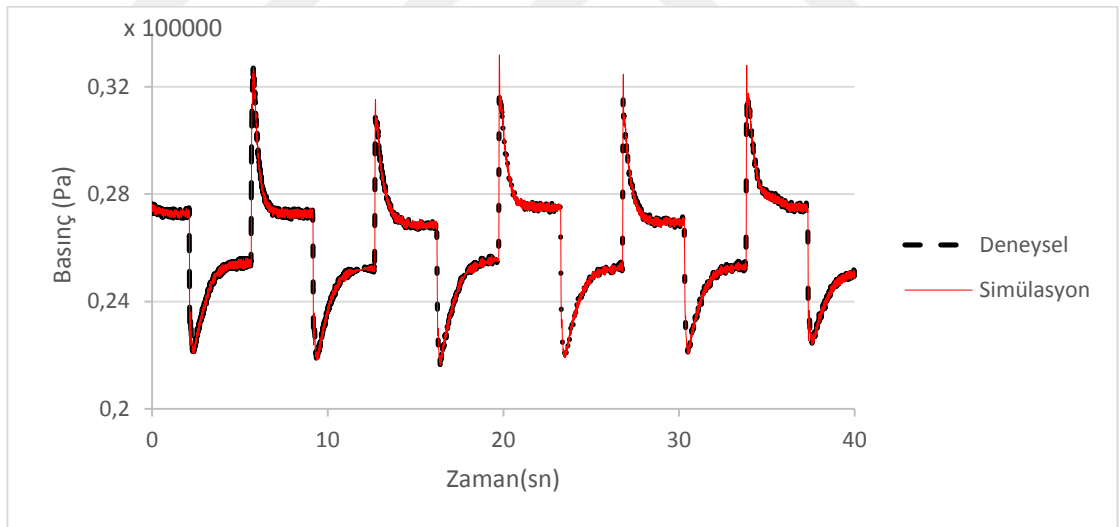
Deney sistemi üzerinden eyleyici işareti olarak ele alınan gaz kelebeği açıklık oranı 40 sn süresince değiştirilmiş (Şekil 4.1) ve buna bağlı olarak manifold basıncı (p_d) ve motor devri (ω_d) verileri toplanmıştır. Daha sonra aynı gaz kelebeği değişim sinyali bu sefer model üzerinde girdi olarak kullanılmış ve Simulink modeli üzerinden ile aynı parametrelerin simülasyon çıktıları (p_s ve ω_s) gözlemlenmiştir. Bu verilerin sırasıyla deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Model parametreleri belirlenirken kullanılan gaz kelebeği sinyali



Şekil 4.2. Deneysel devir verisi(ω_d) ile model devir çıktısı(ω_s)

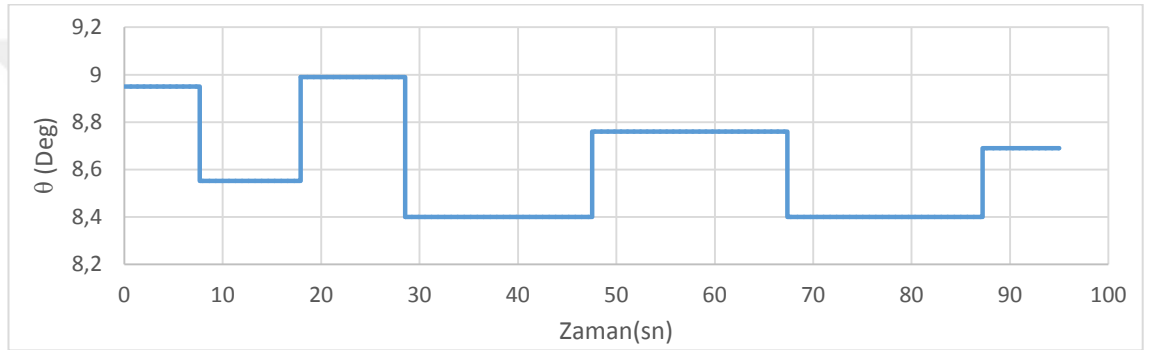


Şekil 4.3. Deneysel manifold basınç verisi(P_d) ile model manifold basınç çıktısı(P_s)

Şekil 4.2 ve 4.3 ile verilen grafiklerde Eşitlik 2.26 ile tanımlanan motor devri ve manifold basıncı model çıktı parametrelerinin deneysel sistem üzerinden alınan veriler ile doğrulaması gösterilmiştir. Doğrulama işlemi model çıktısı ile gerçek veriler arasındaki hata oranı %1'in altında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla elde edilen bu

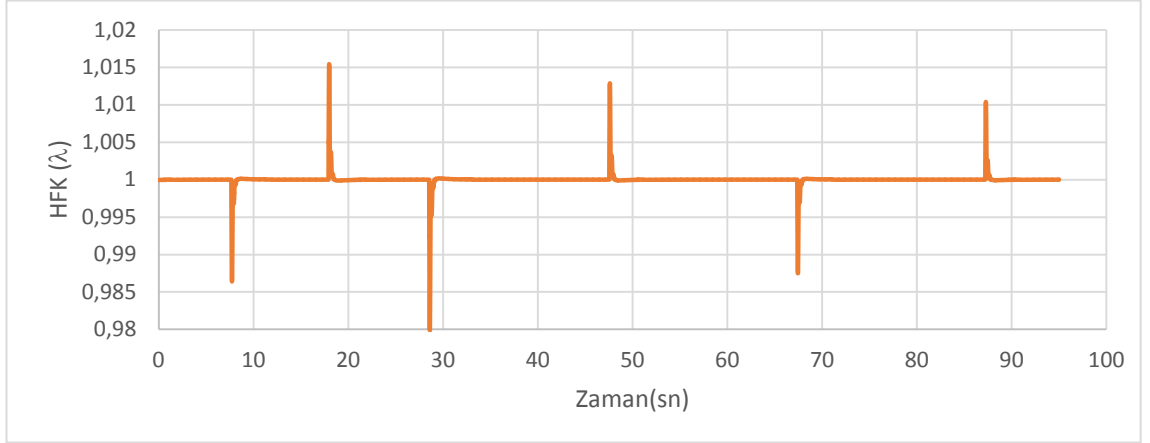
modelin motorun gerçek davranışını yansıttığı söylenebilmektedir. Bu aşamadan sonra kontrolcünün tasarlanması gerçekleştirilmiştir.

Bu gözlemler sonucunda doğrulanmış parametreler kullanılarak oluşturulan model üzerine PID kontrolcüsü uygulanmış yine model üzerinde gaz kelebeği sinyali değişimine karşılık λ değerini birde tutan PID kazanç katsayıları model üzerinden deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir.

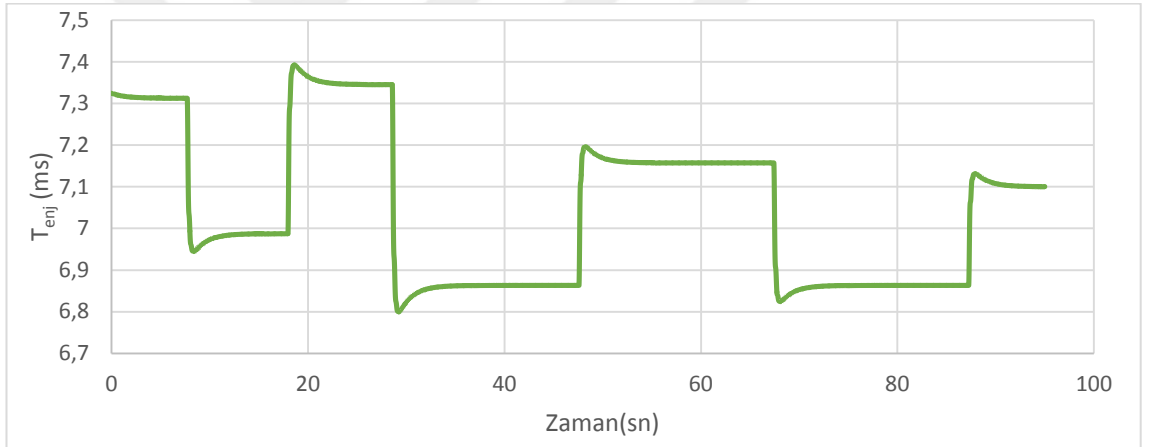


Şekil 4.4. Modele gönderilen gaz kelebeği sinyali

Şekil 4.4 ile kontrolcünün performansını test edebilmek amacıyla küçük bir aralıkta değişim gösteren rasgele şekilde tanımlanan gaz kelebek açıklık oranı sinyali gösterilmiştir. Bu sinyalin uygulanmasıyla Simulink ortamında gerçekleştirilen kontrolcü benzetim çalışmasının sonucunda hava fazlalık katsayısının beklendiği gibi 1 (bir) değeri etrafında kabul edilebilir oldukça küçük bir sapma yaptığı Şekil 4.5 ile gösterilen grafikten gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 4.6 ile yukarıda belirtilen koşullar altında kontrolcünün hava fazlalık katsayısının 1 (bir) değerinde tutabilmesi için üretilen sinyal gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Model hava fazlalık katsayısı (λ) çıktısı

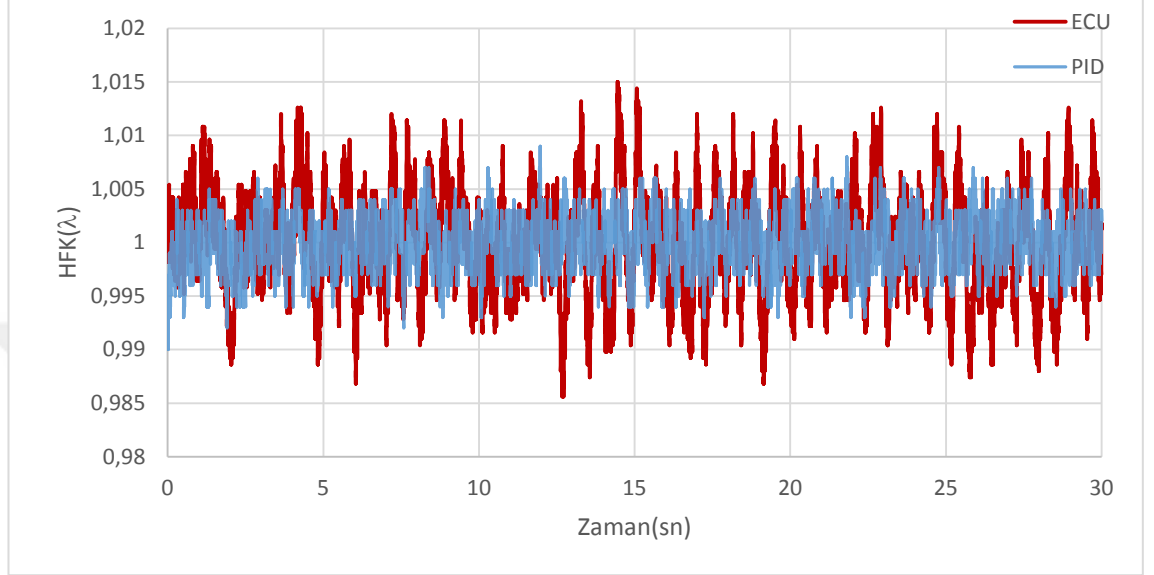


Şekil 4.6. Model enjeksiyon süresi (T_{enj}) çıktısı

Bu aşamadan sonra model üzerinde hava yakıt oranının kontrolüne imkan sağlayan PID kazanç katsayıları deney sistemi üzerinde test edilmiştir.

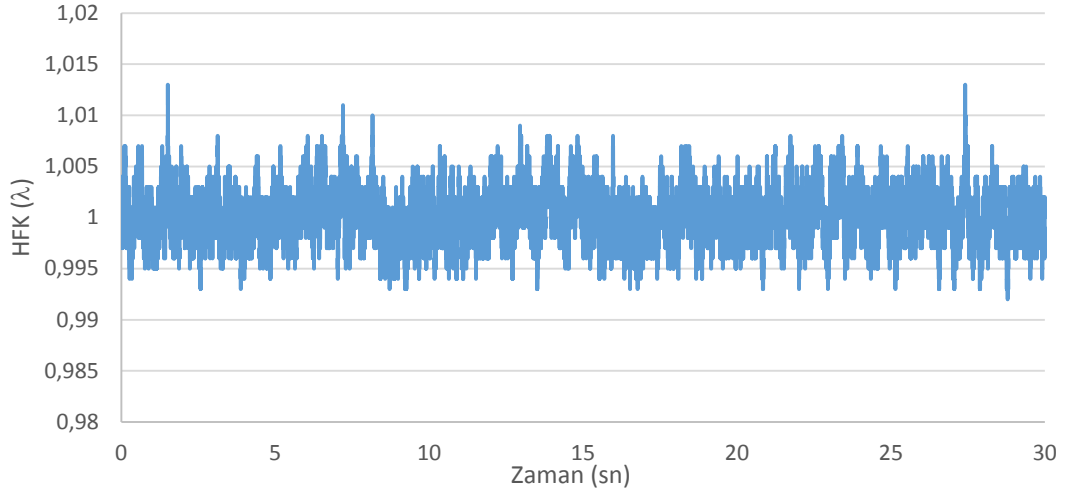
PID kontrol uygulanarak gerçekleştirilen HFK kontrolünde deneyler farklı motor devir sayılarında ve yüklerine bağlı olarak 2 grupta gerçekleştirilmiştir. İlk grup deneyleri hidrolik dinamometre kullanılarak bir miktar yüke maruz bırakılan motor 1500, 2000, 2500 d/dk motor hızlarında çalıştırılmış ve hava yakıt oranı, 30sn boyunca gözlemlenmiştir. İkinci grup deneylerde ise başlangıçta motor yükü ilk duruma göre

biraz daha artırılarak aynı motor devir sayılarında belirtilen parametreler gözlemlenmiştir.



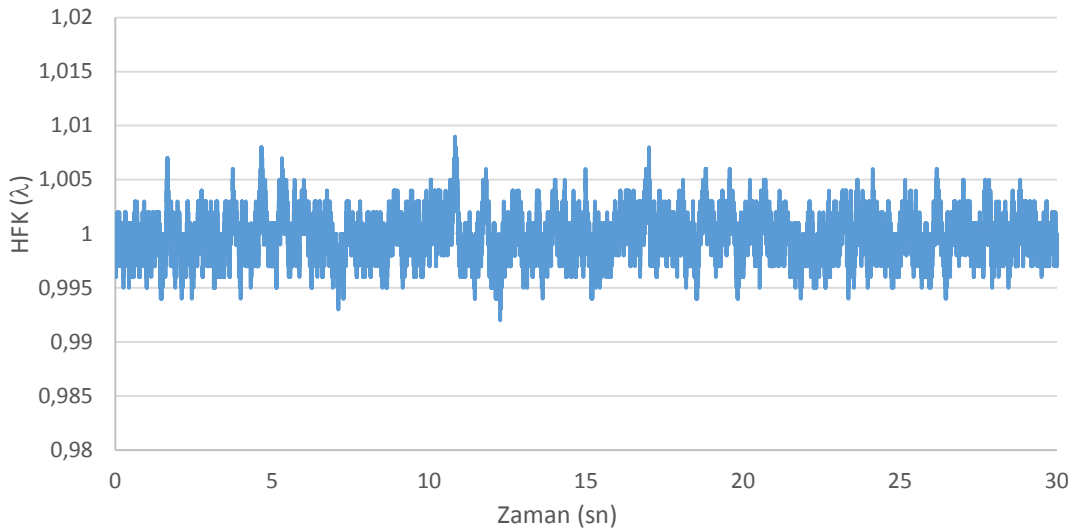
Şekil 4.7. Yüksüz 1500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü

Şekil 4.7’de klasik LPG enjeksiyon sistemi ile motor EKÜ’ ünden bağımsız olarak PID kontrolcüsü ile gerçekleştirilen hava yakıt oranının değişim grafiği gösterilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere klasik LPG sistemindeki hava yakıt oranının 1 etrafındaki salınımlarının PID kontrolcüsünün kullanıldığı duruma göre daha fazla olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumun istatistiksel olarak ifade edilmesi için her iki verinin ortalama değerinden sapma miktarını gösteren varyansı hesaplanmıştır. Buna göre klasik LPG enjeksiyon sistemi uygulandığı durumda hava fazlalık katsayısı verilerinin varyansı $1,57364 \text{ E-}05$ iken, PID kontrolcüsü uygulandığı durumda ise hava fazlalık katsayısı verilerinin varyansı ise $4,97004 \text{ E-}06$ olarak hesaplanmıştır. Varyans değerlerinden görüleceği üzere klasik durumdaki sapma miktarı PID kontrolcüsünün kullanıldığı duruma göre daha fazladır.



Şekil 4.8. %10 ile 1500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü

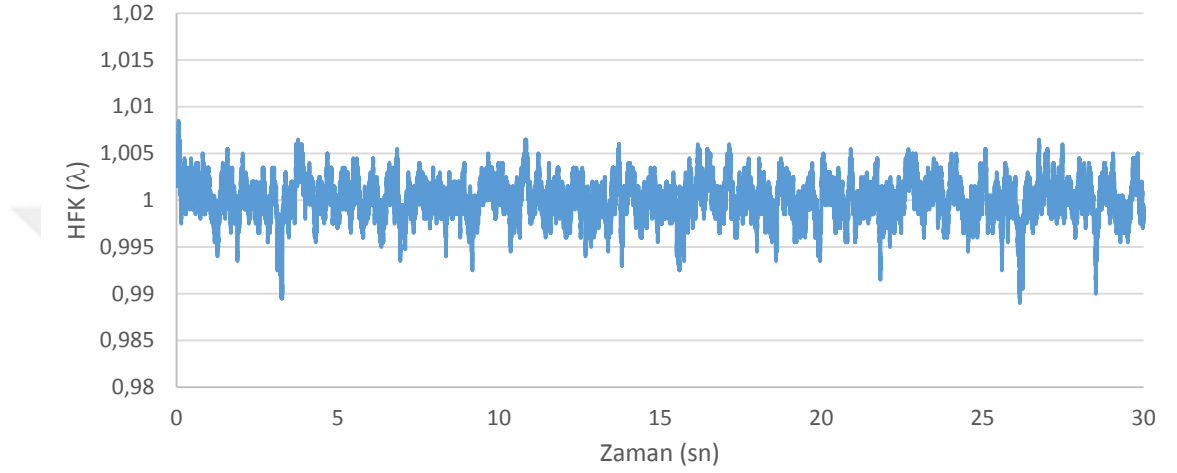
Kontrolcünün farklı çalışma koşullarındaki performansını deneysel olarak incelemek için bu kez aynı devir sayısında yük %10 civarında artırılmıştır. Bu koşullar altında PID kontrolcüsü kullanılarak denetlenen hava fazlalık katsayısının değişim grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir.



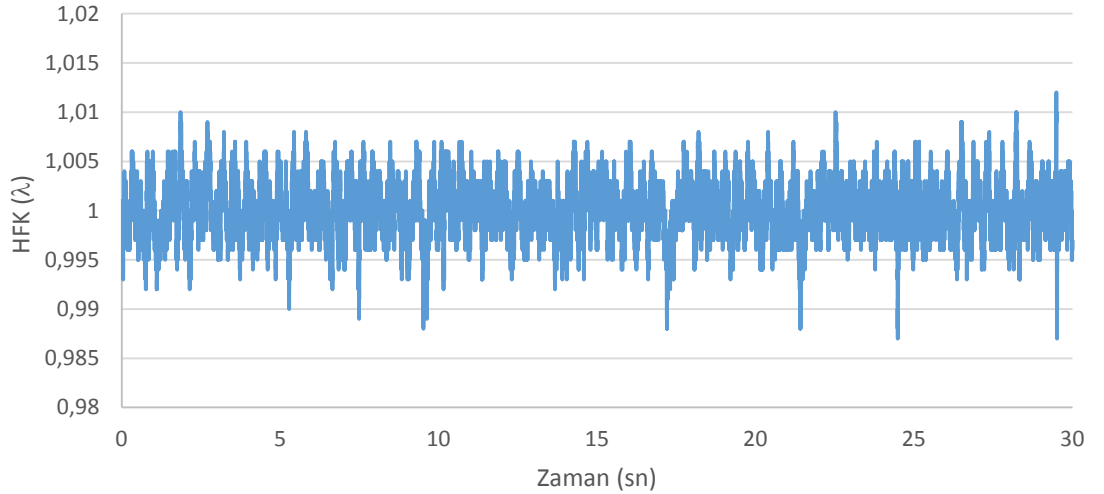
Şekil 4.9. Yüksüz 2000 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü

PID kontrolcüsü kullanılarak denetlenen hava fazlalık katsayısının değişimi farklı yük

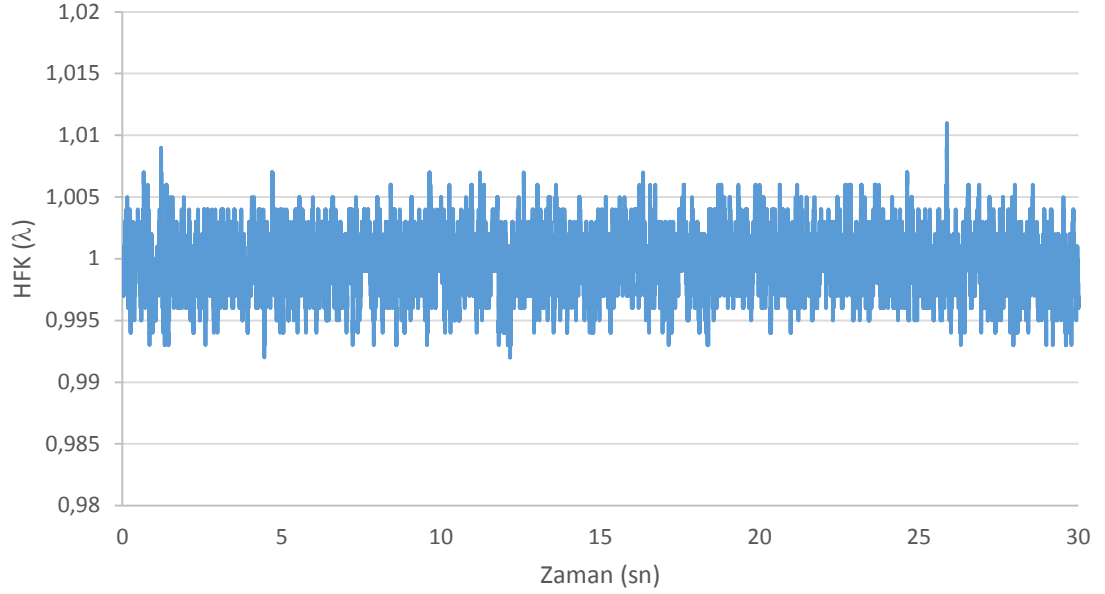
ve devir sayılarında incelenmiştir. Sırasıyla Şekil 4.9’da yüksüz 2000 d/dk, Şekil 10’da %10 yükü 2000 d/dk, Şekil 4.11’de yüksüz 2500 d/dk ve Şekil 4.12’de ise %10 yük ve 2500 d/dk sabit devir sayısı için PID kontrolcüsü uygulandığı durumlarda hava fazlalık katsayısının değişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.10. %10 yük ve 2000 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü



Şekil 4.11. Yüksüz 2500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü



Şekil 4.12. %10 yük ve 2500 d/dk sabit devir şartı için gerçekleştirilen HFK kontrolü

Çizelge 4.2’de ise her çalışma koşulu için hava fazlalık katsayıları değişimindeki varyans değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. PID kontrol ile elde edilen HFK varyans değerleri

	1500 Dev/dk	2000 Dev/dk	2500 Dev/dk
Yüksüz	4,97004E-06	3,26711E-06	8,2084E-06
%10 Yük	6,33911E-06	4,15181E-06	8,20307E-06

Bu çalışmada LPG kullanan buji ateşlemeli içten yanmalı motorlarda hava fazlalık katsayısını denetlemek ve bu parametreyi stikiyometrik değer etrafında salınımı azaltmak ve değişken çalışma koşullarında belirlenen referans değerden sapmasını engellemek üzere bir kapalı döngü kontrol sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan kontrol sistemi hem simülasyon ve hem de deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Bu kontrol sistemi model tabanlı bir sistem olduğundan öncelikle motor modeli çıkarılmış ve model çıktısı ile gerçek sistem üzerinde alınan veriler doğrulanmıştır. Elde edilen deneysel bulgulara göre motorun fabrikada benzin için oluşturulmuş enjeksiyon haritası

ile belirlenen LPG enjeksiyonunun motorun çıkış ve egzoz emisyon karakteristikleri açısından olumsuz yönlere sahip olmaktadır. Bu amaçla doğrudan motorun kendi EKÜ'sü yerine bu çalışma kapsamında ayrı bir enjeksiyon kontrol devresi tasarlanmış ve hava fazlalık katsayısının klasik sistemde görülen sapmalarının önüne geçtiği gözlemlenmiştir. Farklı çalışma koşullarına göre deneyler gerçekleştirilmiş, tasarlanan kontrol sistemi klasik sistemle karşılaştırılmış ve sonuçlar grafiksel olarak gösterilmiştir.



5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Sabit devir şartları için iki farklı yükleme oranıyla yapılan hava fazlalık katsayısı kontrolünün motor beyninden üretilen enjeksiyon sinyalinin kullanıldığı geleneksel LPG ECU'su için bir alternatif olabileceği öngörülmüştür. Dar bant oksijen sensörü yerine geniş band O_2 sensöründen faydalanılarak PID denetimcisi ile hava yakıt oranının iyi derecede kontrol edilebileceği görülmüştür. İyi tasarlanmış bir PID kontrolcünün LPG dönüşüm uygulamalarında tercih edilmesiyle faydalanılan geleneksel dönüşüm kitlerine nazaran yakıt ekonomisi ve sürüş konforu artırılabilceği düşünülmektedir. Fakat bunun için sabit devir şartlarının yanında değişken devir ve daha geniş bir yük değişimi altında yeni çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca sadece oksijen sensörü geri beslemeli(feedback) kontrolcü yanında ileri beslemeli (feedforward) PID yapısının kullanımının kontrol cevap süresini kısaltacağı, değişken ve geçişli durumlara daha elverişli hale geleceği öngörülmektedir. Bunun yanında LPG 'nin regülatör çıkış sıcaklığı sabit tutularak PID kontrolcünün verimi artırılabilir. Bu çalışma ile aynı zamanda içten yanmalı motorlarda fakir ve ultra fakir yanma koşullarında istenen hava fazlalık katsayısı elde edilerek yapılacak çalışmaların bir ön ayağı niteliğini taşımaktadır.

Bu sonuçların yanı sıra bu çalışmanın gelecekte yapılabilecek sonraki aşamalarında bu çalışmadakine ek olarak farklı çalışma koşulları ile sabit devir sayısı ve değişken devir sayılı çalışma koşulları yapılabilir. Bu durumda motor çıkış ve egzoz emisyon karakteristikleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Ang, K.H., Chong, G., Li, Y., 2005. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, 13(4) 559–576.
- Anonim, 2012. Otomotiv yakıtları - Lpg - Özellikler ve deney yöntemleri. TS EN 589+A1.
- Anonim, 2014. Sektör Raoru. PETDER(Petrol Sanayi Derneği) <http://www.petder.org.tr/uploads/2015/10/9284f7f30aad4f4ab191f65e34a2382a.pdf> (07.06.2015).
- Anonymous, 2015. CO₂ Emissions from Fuel Combustion Highlights. IEA statistics 2015 Edition, <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf> (05.06.2016)
- Aydın, F., 2006. Sıralı Gaz Fazı LPG Enjeksiyon Sisteminin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Balki, M.K., 2005. Buji Ateşlemeli Motorda Farklı Sıkıştırma Oranlarında LPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Bayraktar, H. and Durgun, O., 2005. Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance. *Energy Conversion and Management*, 46, 2317–2333
- Bobál, V., Chalupa, P., Kubalčík, M., Dostál, P., 2012. Identification and Self-tuning Control of Time-delay Systems. *Wseas Transactions On Systems*, 11(10), 597-606.
- Bobál, V., Kubalcik, M., Dostal, P., Matejcek, J., 2013. Adaptive predictive control of time-delay systems. *Computers and Mathematics with Applications*, 66, 165-176.
- Bosch, 2016. Bosch Motorsport Lambda Sensor LSU 4.2
- Ceviz, M.A. and Yüksel, F., 2006. Cyclic variations on LPG and gasoline-fuelled lean burn SI engine. *Renewable Energy*, 31, 1950-1960.
- Ceviz, M.A., Erentürk, K., Kaleli, A., Güner, E., Öner, İ.V., LPG yakıtlı buji ateşlemeli motorlarda yakıt sıcaklığının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkilerinin araştırılması, TÜBİTAK, 1001 proje raporu, 2014.
- Ceviz, M.A., Kaleli, A., Güner, E., 2015. Controlling LPG temperature for SI engine applications. *Applied Thermal Engineering*, 82, 298-305.
- Dase, C., Falcon, J., and Maccleery, B., 2006. Motorcycle Control Prototyping Using an FPGA-Based Embedded Control System. *IEEE Control Systems Magazine*, 17-21
- Drivven, 2012. AD Combo Module Kit User's Manual. San Antoino.
- Ebrahimi, B., Tafreshi, R., Masudi, H., Franchek, M., Mohammadpour, J., Grigoriadis, K., 2012. A parameter-varying filtered PID strategy for air–fuel ratio control of spark ignition engines. *Control Engineering Practice* **20**(8), 805-815.
- Güler, Y., 2006. İçten Yanmalı Motorlarda LPG'nin Yakıt Olarak Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Guzella, L. and Onder, C.H., 2010. Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems. Springer-Verlag, 354 s, Heidelberg.

- Heywood, J.B., 1988. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, 930s Newyork.
- Jermy, M.C., Harrison, M., Vuorenkoski, A.K., Mohamad, T.I., Kaparis, E., Macartney, M., 2006. Overcoming power loss in LPG/LPG conversions of vehicle engines. *International Journal of Heavy Vehicle Design, Special Issue*, 1-22.
- Kocagöz, S., 2009. Çift Yakıtlı (LPG-Benzin) Buji Ateşlemeli Bir Motorda Hacimsel Verimin Performans ve Emisyonlara Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Li, L., Wang, Z., Deng, B., Han, Y., Wang, H., 2002. Combustion and Emissions Characteristics of a Small Spark-Ignited LPG Engine. SAE Paper No: 2002-01-1738.
- Masi, M., 2012. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fuelled with LPG (liquefied petroleum gas). *Energy*, 41, 252-260.
- National Instruments, 2013. User Manual NI 9758(NI Powertrain Controls Port Fuel Injector Driver Module)
- National Instruments, 2014. NI Labview for CompactRIO Developer's Guide.
- National Instruments, 2015. User Manual NI 9757(NI Powertrain Controls O₂ Sensor Module Kit-Rev-E)
- Nergiz, M., 2008. MPI enjeksiyon sistemli araçlarda LPG ve Benzin Kullanımının Taşıt Performansına Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- 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.
- Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., 2014. Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513-525.
- Sayın, C., Çanakçı, M., Kılıçaslan, İ., Özsezen, N., 2006. Çift Yakıtlı (Benzin + Sıvılaştırılmış Petrolgazı) Bir Benzin Motorunun İdeal Emisyon Ürünleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 199-205.
- Shen, T., Zhang, J., Jiao, X., Kang, M., Kako, J., Ohata, A., 2016. *Transient Control of Gasoline Engines*, Taylor & Francis Group, 297s, Boca Raton.
- Souder, J.S., and Hedrick, J.K., 2004. Adaptive sliding mode control of air–fuel ratio in internal combustion engines. *International Journal of Robust Nonlinear Control*, 14, 525–541.
- Sulaiman, M.Y., Ayob, M.R., Meran, I., 2013. Performance of Single Cylinder Spark Ignition Engine Fueled by LPG. *Procedia Engineering*, 53, 579 – 585.
- Zhang, J., Shen, T., Marino, R., 2010. Model-based cold-start speed control scheme for spark ignition engines. *Control Engineering Practice*, 18, 1285–1294.

ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Yusufeli'nde doğdu. İlköğrenimini Artvin'de, orta öğrenimini Erzurum'da tamamladı. Lisans öğrenimine 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümüne başladı. 2012 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra, 2013 yılında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. Aynı yılın sonlarına doğru Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Enerji Bilim dalına araştırma görevlisi olarak atanmıştır. Eğitimini tamamlamak için 2014 yılından itibaren Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne görevlendirme almıştır. 2015 yılında evlilik yapan Hüseyin Köksal Halen aynı bilim dalındaki eğitimine devam etmektedir.