

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**HOMOJEN DOLGULU BİR BENZİNLİ MOTORDA
DOĞALGAZ KULLANIMININ MOTOR
PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oto. Müh. Nihat ŞENOCAK
Anabilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği
Programı: Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri
Danışman: Prof. Dr. Cengiz ÖNER

Ağustos 2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HOMOJEN DOLGULU BİR BENZİNLİ MOTORDA DOĞALGAZ
KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oto. Müh. Nihat ŞENOCAK

(141136107)

Anabilim Dalı: Otomotiv Mühendisliği

Programı: Taşıt Tahrik ve Güç Sistemleri

Danışman: Prof. Dr. Cengiz ÖNER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08.08.2017

Ağustos 2017

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HOMOJEN DOLGULU BİR BENZİNLİ MOTORDA DOĞALGAZ KULLANIMININ
MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oto. Müh. Nihat ŞENOCAK
(141136107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08/08/2017

Tezin Savunulduğu Tarih: 24/08/2017

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cengiz ÖNER

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cumali İLKILIÇ

Doç. Dr. Rasim BEHÇET



Ağustos 2017

ÖNSÖZ

Çalışmalarım süresince karşılaştığım her zorlukta desteklerini esirgemeyerek başarıya ulaşmak için gereken motivasyonu sağlayan, değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, danışman hocam; sayın Prof. Dr. Cengiz ÖNER'e teşekkür ediyorum.

Laboratuvar çalışmalarım da bana yardımcı olan; Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü lisans öğrencisi değerli kardeşim Şafak Melih ŞENOCAK'a teşekkür ediyorum.

Ayrıca çalışmalarım süresince manevi desteklerini gördüğüm, Fırat Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, öğretim elemanlarına, idari ve teknik personellerine teşekkür ediyorum.

Sahip olduğum tüm değerlerimi bana kazandıran ve hayatım boyunca her şartta desteklerini benden esirgemeyen değerli anne ve babama teşekkür ediyorum.

Nihat ŞENOCAK

ELAZIĞ-2017

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XII
KISALTMALAR LİSTESİ	XV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Taşıit Motorları	5
2.1.1. İçten Yanmalı Motorlar	6
2.1.1.1. Benzinli (Buji Ateşlemeli) Motorlar	6
2.1.1.2. Benzinli Motorlarda Homojen Dolgu Sistemleri.....	8
2.1.1.3. Buji Ateşlemeli Homojen Dolgulu Benzinli Motorlar	11
3. DOĞALGAZ	14
3.1. Doğalgazın Tanımı	14
3.2. Doğalgazın Kimyasal Yapısı ve Bileşenleri	16
3.3. Doğalgazın Rezerv Kaynakları.....	18
3.4. Dünyadaki Doğalgaz Rezervinin Ömrü.....	19
3.5. Dünyada ve Türkiye’de Doğalgaz Depolama Faaliyetleri	19
3.6. Doğalgazın Taşıit Motorlarında Kullanılması	20
3.7. Doğalgaz’ın Taşıitlarda Kullanımı ve Formları.....	22
3.7.1. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG).....	23
3.7.2. Sıkıştırılmış Doğalgaz (CNG)	24
4. SIKIŞTIRILMIŞ DOĞALGAZ (CNG)	25
4.1. CNG’nin Tanımlanması, Nicelikleri ve Nitelikleri	25
4.2. Sıkıştırılmış Doğalgaz Kullanımında Güvenlik.....	27
4.3. CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Motorlu Taşıitlardaki Emniyet Unsurları	27

4.4.	Sıkıştırılmış Doğalgaz (CNG) Dönüşümünün Avantaj ve Dezavantajları	28
4.4.1.	Avantajları	28
4.4.2.	Dezavantajları	29
5.	SIKIŞTIRILMIŞ DOĞALGAZ'IN MODELLENMESİ VE	
	YANMASI	30
5.1.	Sıkıştırılmış Doğalgazın Modellenmesi	30
5.2.	Modellemesi Yapılan Sıkıştırılmış Doğalgaz Yakıtının Yanması.....	33
6.	LİTERATÜR ÇALIŞMALARI.....	35
6.1.	Benzinli Motorlar İçin CNG Yakıtının Kullanılabilirliğinin İrdelenmesi	35
6.2.	Benzinli Motorlarda CNG Yakıtı Kullanımının Motor Performansına ve Egzoz Gazı Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması	37
6.3.	Sıkıştırma Oranının Artırılmasında Oluşan Etkilerin, CNG Yakıtı Kullanılması Durumu İçin İrdelenmesi	40
7.	CNG YAKIT DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ.....	43
7.1.	Buji Ateşlemeli (Otto) Motorlarda CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri	43
7.1.1.	Karbüratörlü Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri	43
7.1.2.	Elektronik Kontrollü (Tek Nokta Enjeksiyonlu) CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri	45
7.1.3.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri	46
7.1.4.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri	47
7.2.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Çalışması.....	48
7.3.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Elemanları.....	49
7.3.1.	CNG Yakıt Tankları	51
7.3.1.1.	CNG Tanklarının Özellikleri	52
7.3.1.2.	CNG Tankları Hakkında Önemli Hususlar	53
7.3.1.3.	CNG Tankı Montaj Braketleri	53
7.3.2.	CNG Dolum Ağzı	53
7.3.3.	CNG Dolum Valfi.....	53
7.3.4.	CNG İkmal Valfi	54
7.3.5.	CNG Regülatörü	54

7.3.5.1.	CNG Regülatörlerinin Yapısı	55
7.3.5.2.	CNG Elektronik Regülatörlerinin Özellikleri ve Çalışması	55
7.3.6.	Sıcaklık Sensörü	56
7.3.7.	CNG Filtresi	56
7.3.8.	MAP Sensörü.....	56
7.3.9.	CNG Enjektörleri.....	57
7.3.10.	CNG Sistemi Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU)	57
7.3.11.	CNG Dönüşüm Sistemi Yakıt Seçme Anahtarı.....	57
7.3.12.	Su Hortumları	58
7.3.13.	CNG Akış Boruları ve Hortumları	58
7.3.14.	Elektrik Tesisatı Kablo Demeti	59
7.3.15.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Aksesuar Takımı	59
8.	DENEY MATERYALLERİ	60
8.1.	Deneyel Çalışma Süreçleri.....	60
8.2.	Deney Seti.....	61
8.2.1.	Motor Bremze Tezgâhı	63
8.2.2.	Deney Motoru	66
8.2.3.	Notebook Bilgisayar	67
8.2.4.	Temassız Sıcaklık Ölçer Termometre	68
8.2.5.	Dijital Termometre	70
8.2.6.	Landi Renzo Omegas 3.2 Arayüz Yazılımı ve Bağlantı Kablosu	71
8.2.7.	Egzoz Gazı Emisyon Test Cihazı	72
8.2.8.	CNG Dönüşüm Seti	73
8.2.9.	Titreşim ve Gürültü Şiddetinin Ölçülmesinde Kullanılan Cihaz ile Yazılımlar	74
8.2.10.	Benzin ve Sıkıştırılmış Doğalgaz	76
8.2.11.	CNG Tüp Demeti.....	77
9.	YÖNTEM VE METOT	84
9.1.	Deneyel Çalışmadaki Yöntem Ve Metot Süreçleri.....	84
9.2.	Deney Motoruna CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Uygulaması.....	84
9.3.	Motor Momentinin Ölçülmesi	95
9.4.	Motor Gücünün Hesaplanması	96

9.5.	Hava Fazlalık Katsayısının Ölçülmesi.....	97
9.6.	Hava/Yakıt Oranlarının Hesaplanması	97
9.7.	Özgül Yakıt Tüketiminin Ölçülmesi	98
9.8.	Efektif Verimin Hesaplanması	100
9.9.	Özgül Enerji Maliyetinin Hesaplanması.....	100
9.10.	Titreşim Yoğunluğunun Ölçülmesi	101
9.11.	Gürültü Şiddetinin Ölçülmesi	101
9.12.	Egzoz Gazı Emisyonlarının Ölçülmesi.....	102
9.13.	Sıcaklık Ölçümleri	104
10.	DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	107
10.1.	Motor Performans Testlerinin Değerlendirilmesi.....	107
10.1.1.	Motor Momentinin Değerlendirilmesi.....	107
10.1.2.	Efektif Gücün Değerlendirilmesi.....	111
10.1.3.	Hava Fazlalık Katsayısının ve Hava/Yakıt Oranının Değerlendirilmesi.....	114
10.1.4.	Özgül Yakıt Tüketiminin Değerlendirilmesi	123
10.1.5.	Efektif Verimin Değerlendirilmesi	128
10.1.6.	Özgül Enerji Maliyetinin Değerlendirilmesi	130
10.1.7.	Titreşim Yoğunluğunun Değerlendirilmesi	132
10.1.8.	Gürültü Şiddetini Değerlendirilmesi.....	134
10.2.	Egzoz Gazı Emisyonlarının ve Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi.....	138
10.2.1.	Tam Gaz Açıklığı ve Tam Yük Şartlarında Egzoz Gazı Emisyonlarının ve Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi	139
10.2.1.1.	HC Emisyonlarının Değerlendirilmesi	139
10.2.1.2.	CO Emisyonlarının Değerlendirilmesi	142
10.2.1.3.	CO ₂ Emisyonlarının Değerlendirilmesi	144
10.2.1.4.	NO Emisyonlarının Değerlendirilmesi	147
10.2.1.5.	Egzoz Gazı Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi	150
10.2.1.6.	Rölanti Devrinde Egzoz Gazı Emisyon Değerlerinin ve Egzoz Gazı Sıcaklığının İncelenmesi.....	154
10.2.2.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığı Şartı İle Motor Devir Sayısının Artırılması Durumunda Susturucu Çıkışından Ölçülen Egzoz Gazı Emisyonlarının İncelenmesi	158

10.2.2.1.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı HFK Değişimlerinin İncelenmesi	159
10.2.2.2.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi	161
10.2.2.3.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı CO ₂ Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi	162
10.2.2.4.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi	163
10.2.2.5.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı O ₂ Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi	164
10.2.2.6.	Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi	166
10.2.3.	Rölanti Devrinde Susturucu çıkışından llen Benzin ve Doğalgazla alışma Durumundaki Emisyon Değişimlerinin Değerlendirmesi	168
11.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	169
11.1.	Sonuçlar	169
11.2.	neriler	172
	KAYNAKLAR	174
	ZGEMİş	179

ÖZET

Alternatif yakıtların kullanılmasında hedeflenen iki önemli amaç vardır. Yakıtın çevreci olması ve enerji verimliliği sağlamasıdır. Doğalgaz, diğer alternatif yakıtlara göre daha çevreci ve daha ekonomiktir. Bu sebeple taşıt motorlarında kullanılması açısından oldukça avantajlıdır. Doğalgaz, sahip olduğu yüksek oktan değeri ve özelliklerinden dolayı buji ateşlemeli motorlar için ideal bir yakıttır. Buji ateşlemeli bir motorun doğalgazla çalışmasını sağlamak için, motorda esas bir değişikliğe gerek yoktur. CNG yakıt dönüşüm sistemini motora uygulamak ve sistemin ECU konfigürasyonunu gerçekleştirmek yeterlidir.

Bu çalışmanın amacı; benzin yerine doğalgaz kullanılması durumunda motor performans karakteristiklerindeki değişimleri deneysel olarak belirleyip karşılaştırmaktır. Homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motora, CNG yakıt dönüşümü uygulanmıştır. Dönüşüm işleminde, çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi kullanılmıştır. Deney motoru; hem benzinle çalışabilir duruma, hem de doğalgazla çalışabilir duruma getirilmiştir.

Deney motorunun, benzinle çalıştırılması ve doğalgazla çalıştırılması şartlarında deneysel ölçümler yapılmıştır. Motor momenti, yakıt tüketim miktarı, egzoz gazı emisyonları, egzoz gazı sıcaklığı, hava fazlalık katsayısı, titreşim yoğunluğu ve gürültü şiddeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümlerle birlikte; motor gücü, hava/yakıt oranları, özgül yakıt tüketimi, efektif verim ve özgül enerji maliyeti hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Doğalgazla çalışmada; motor gücünün ve momentinin azaldığı görülmüştür. CO, CO₂, HC ve NO emisyonlarında önemli oranda azalma olduğu, egzoz gazı sıcaklıklarında ise artış meydana geldiği görülmüştür. Daha ekonomik yakıt tüketimi sağladığı görülmüştür. Efektif verimde azalma belirlenmiştir. Motor titreşimin yoğunluğunda kayda değer oranda bir değişim görülmemiştir. Gürültü seviyesinde ise azalma tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CNG, Doğalgaz, Homojen Dolgu, Buji Ateşlemeli Motorlar, Motor Performansı, Egzoz Gazı Emisyonları

SUMMARY

Investigation of the Effect of Natural Gas Usage on Engine Performance at the Homogeneous Filling Gasoline Engine

There are two important purposes of use alternative fuels. The fuel should be environmentalist and provide to energy efficiency. Natural gas is more environmentally friendly and more economical compared to other alternative fuels. For this reason it is quite advantageous in terms of its use in vehicle engines. Natural gas is an ideal fuel for spark ignition engines because of it possesses high octane value and characteristics. Not necessary of main change at the engine to ensure that a spark-ignition engine works with the natural gas. It is enough to apply the CNG fuel conversion system to the engine and perform the ECU configuration of the system.

The purpose of this study is; experimentally determining and comparison of changes in engine performance characteristics when natural gas is used instead of gasoline. CNG fuel conversion was applied to a homogeneous filled spark ignition engine. Multi-point injected sequential type CNG fuel conversion system was used to in the conversion process. The experiment engine was made operable with natural gas besides gasoline.

Experimental measurements were carried out at experiment engine of conditions in working situations with gasoline or with natural gas. Engine torque, amount of fuel consumption, exhaust gas emissions, exhaust gas temperatures, air surplus coefficient, vibration density and noise fierceness measurements were performed. Experimental measurements along with were calculated engine power, air-fuel ratios, specific fuel consumption, effective yield and specific energy cost. The data obtained were compared and interpreted.

It has been seen that the engine power and engine torque have decreased when executed with natural gas. It has been observed that there is the significant decrease in CO, CO₂, HC and NO emissions. It has been seen at increase of that the exhaust gas temperatures. It has been seen at provide more economical fuel consumption. It has been determined that the effective yield has decreased. Significant change in engine vibration intensity hasn't been observed. It has been determined that the noise intensity has decreased.

Keywords: CNG, Natural Gas, Homogeneous-Filled, Spark Ignition Engines, Engine Performance, Exhaust Gas Emissions

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Termik Motorların Sınıflandırılması.....	5
Tablo 3.1.	Bazı Ülkelerde Çıkarılan Doğalgazlara Ait Bileşen Oranları.....	16
Tablo 3.2.	Doğalgazın Bileşenleri ve Mol Yüzdeleri.....	17
Tablo 3.3.	Türkiye’de Kullanılan Doğalgazın Garanti Edilen ve Fiili Özellikleri.....	18
Tablo 4.1.	CNG Yakıtının Karakteristiği	25
Tablo 4.2.	CNG Yakıtının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	26
Tablo 5.1.	Modellenen Sıkıştırılmış Doğalgazın Kompozisyonu ve Modelleme Koşulları.....	30
Tablo 5.2.	Modellenen Sıkıştırılmış Doğalgazın Nicel Özellikleri	31
Tablo 6.1.	Benzin ve Doğalgazın Fiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılması	35
Tablo 6.2.	Doğalgaz ve Petrolün Kimyasal Bileşenlerinin Karşılaştırılması	35
Tablo 8.1.	Deney Motoruna Ait Özellikler ve Teknik Veriler	66
Tablo 8.2.	Bilgisayara Ait Bilgiler ve Teknik Özellikler	67
Tablo 8.3.	Temassız Sıcaklık Ölçere Ait Teknik Özellikler.....	69
Tablo 8.4.	CHY 502K/J Dijital Termometreye Ait Özellikler.....	70
Tablo 8.5.	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Benzinin Laboratuvar Analiz Sonuçları	76
Tablo 8.6.	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Bileşen Kompozisyonu	77
Tablo 8.7.	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Özellikleri.....	77
Tablo 8.8.	CNG Tüp Demetine Ait Bilgiler.....	79
Tablo 8.9.	Yüksek Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Bilgiler ve Teknik Veriler	81
Tablo 8.10.	Alçak Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Teknik Veriler	83
Tablo 10.1.	Motor Devir Sayısına Bağlı Motor Momenti Değişim Değerleri	108
Tablo 10.2.	Motor Devir Sayısına Bağlı Güç Değişim Değerleri	112
Tablo 10.3.	Motor Devir Sayısına Bağlı Hava Fazlalık Katsayısı Değişim Değerleri.....	115
Tablo 10.4.	CNG Tüp Demeti Yüzey Sıcaklıkları	118
Tablo 10.5.	DeneySEL Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Bileşen Kompozisyonu	118
Tablo 10.6.	Motor Devir Sayısına Bağlı Hava/Yakıt Oranı Değişim Değerleri	122
Tablo 10.7.	Benzinle Çalışma Durumundaki Motor Devir Sayısına Bağlı Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri	124

Tablo 10.8. Doğalgaz ve Benzinle Çalışmada Ölçülen Gürültü Şiddetlerinin Karşılaştırılması	135
Tablo 10.9. Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyon Değerleri.....	140
Tablo 10.10. Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyon Değerleri.....	142
Tablo 10.11. Motor Devir Sayısına Bağlı CO ₂ Emisyon Değerleri	145
Tablo 10.12. Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değerleri	148
Tablo 10.13. Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Sıcaklık Değerleri.....	151
Tablo 10.14. Rölanti Devrinde Egzoz Gazı Emisyonları ve Sıcaklığı	154
Tablo 10.15. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığı Şartlarında Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Emisyonları.....	158



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dört Zamanlı Benzinli Motorun Basınç-Hacim Diyagramı.....	7
Şekil 3.1.	Metan (CH ₄)'ın Kimyasal Yapısı.....	14
Şekil 3.2.	Doğalgazlı İlk Araçlardan Bir Örnek	23
Şekil 4.1.	Doğalgazın ve Sıkıştırılmış Doğalgazın (CNG) Molekül Yoğunluklarının Temsili Olarak Modellenmesi	25
Şekil 4.2.	CNG'li Taşıt Uyarı Etiketleri	28
Şekil 5.1.	Modellenen Doğalgazın Bileşen Oranlarının Grafikselleştirilmesi	31
Şekil 5.2.	Modellenen Doğalgazın Basınç-Yoğunluk Diyagramı	32
Şekil 7.1.	Karbüratörlü Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi.....	44
Şekil 7.2.	Elektronik Kontrollü CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi.....	45
Şekil 7.3.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi.....	47
Şekil 7.4.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi	48
Şekil 7.5.	Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Elemanları	50
Şekil 7.6.	CNG Tank Tiplerine Ait Kesitler.....	52
Şekil 7.7.	CNG Elektronik Regülatörünün Kısımları.....	55
Şekil 7.8.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Su Tesisatı Şeması.....	58
Şekil 8.1.	Deney Setinin Şematik Gösterimi	62
Şekil 8.2.	Bremze Tezgahına Ait Görseller	64
Şekil 8.3.	Dinamometre Tezgahı Su Kulesi	65
Şekil 8.4.	Deney Motorunun Bremze Tezgahına Kurulmuş Hali	67
Şekil 8.5.	Omega 3.2 Yazılımı ile Sistem Kontrolü	68
Şekil 8.6.	Optris Ms-Pro Temassız Sıcaklık Ölçer.....	69
Şekil 8.7.	CHY 502K/J Isıl Çift Donanımlı Dijital Termometre	70
Şekil 8.8.	Landi Renzo – Omega 3.2 Arayüz Yazılımı	71
Şekil 8.9.	Landi Renzo Gaz Yakıt Dönüşüm Sistemi ECU-PC Arası Bağlantı Kablosu.....	72
Şekil 8.10.	BOSCH BEA350 Egzoz Gazı Emisyon Test Cihazı	73

Şekil 8.11.	Deneysel Çalışmada Kullanılan CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Elemanları	74
Şekil 8.12.	Titreşim Yoğunluğu Ölçüm Yazılımına Ait Görsel.....	75
Şekil 8.13.	Ses Şiddeti Ölçüm Yazılımına Ait Görsel.....	75
Şekil 8.14.	CNG Tüp Demeti	78
Şekil 8.15.	CNG Tüp Demeti Manifold Çıkış Vanası.....	79
Şekil 8.16.	CNG Tesisatının Şematik Gösterimi.....	80
Şekil 8.17.	CNG Tesisatındaki Yüksek Basınç Dayanımlı Flex Hortumun Bağlantısı.....	80
Şekil 8.18.	Yüksek Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürü	82
Şekil 8.19.	Bina İçerisindeki Düşük Basıncılı Doğalgaz Boruları	82
Şekil 8.20.	Bina İçi Tesisat Çıkışı	83
Şekil 9.1.	Deney Motoruna CNG Yakıt Dönüşümünün Şematik Gösterimi.....	85
Şekil 9.2.	CNG Regülatörünün Bağlantısı	86
Şekil 9.3.	CNG Filtresinin Bağlantısı.....	87
Şekil 9.4.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi MAP Sensörünün Bağlantısı	88
Şekil 9.5.	CNG Enjektörlerinin Bağlantısı	89
Şekil 9.6.	Gösterge Üzerindeki CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Kontrol Butonu.....	89
Şekil 9.7.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Sigorta, Kontak ve Elektrik Bağlantıları	90
Şekil 9.8.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi ECU Bağlantısı.....	91
Şekil 9.9.	CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Elektrik Tesisatı.....	92
Şekil 9.10.	Kurulum ve Diyagnostik Kontrol İşlemleri	93
Şekil 9.11.	Konfigürasyon İşlemleri.....	94
Şekil 9.12.	Sistemin Ayar ve Adaptasyonları ile Son Kontrol İşlemleri.....	94
Şekil 9.13.	Motor Momentinin Ölçülmesi.....	96
Şekil 9.14.	Tüketilen Benzinin Hacimsel Miktarının Ölçülmesi	99
Şekil 9.15.	Egzoz Tesisatının ve Gaz Sıcaklığı ile Emisyon Ölçüm Noktalarının Gösterimi	103
Şekil 9.16.	Bosch BEA350 Test Cihazı ile Egzoz Gazı Emisyonlarının Ölçülmesi.....	104
Şekil 9.17.	Egzoz Gazı Sıcaklığı Ölçüm Metotları ve Ölçüm Düzenekleri	106
Şekil 10.1.	Motor Devir Sayısına Bağlı Moment Değişim Eğrileri	108

Şekil 10.2.	Motor Devir Sayısına Bağlı Güç Değişim Eğrileri	112
Şekil 10.3.	Motor Devir Sayısına Bağlı Hava Fazlalık Katsayısı Değişim Eğrileri.....	115
Şekil 10.4.	Motor Devir Sayısına Bağlı Hava/Yakıt Oranı Değişim Eğrileri	122
Şekil 10.5.	Özgül Benzin Tüketim Eğrisi.....	124
Şekil.10.6.	Benzin ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak ⁻¹] Motor Devrindeki Özgül Yakıt Tüketim Değerlerinin Karşılaştırılması	128
Şekil 10.7.	Benzin ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak ⁻¹] Motor Devrindeki Efektif Verim Oranlarının Karşılaştırılması.....	130
Şekil 10.8.	Benzinle ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak ⁻¹] Motor Devrindeki Özgül Enerji Maliyetlerinin Karşılaştırılması.....	131
Şekil 10.9.	Doğalgazla Çalışma Durumundaki Titreşim Yoğunluğu.....	132
Şekil 10.10.	Benzinle Çalışma Durumundaki Titreşim Yoğunluğu.....	133
Şekil 10.11.	Doğalgazla Çalışma Durumunda Ölçülen Ses Şiddeti ve Frekansı	134
Şekil 10.12.	Benzinle Çalışma Durumunda Ölçülen Ses Şiddeti ve Frekansı	134
Şekil 10.13.	Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişim Eğrileri	140
Şekil 10.14.	Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyon Değişim Eğrileri	143
Şekil 10.15.	Motor Devir Sayısına Bağlı CO ₂ Emisyonu Değişim Eğrileri.....	145
Şekil 10.16.	Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişim Eğrileri.....	148
Şekil 10.17.	Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Sıcaklık Değişim Eğrileri	153
Şekil 10.18.	Rölanti Devrindeki Egzoz Gazı Emisyonlarının Karşılaştırması.....	157
Şekil 10.19.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı HFK Değişim Eğrileri.....	159
Şekil 10.20.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyonu Değişim Eğrileri.....	161
Şekil 10.21.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı CO ₂ Emisyonu Değişim Eğrileri.....	162
Şekil 10.22.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişim Eğrileri.....	163
Şekil 10.23.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı O ₂ Emisyonu Değişim Eğrileri.....	165
Şekil 10.24.	Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişim Eğrileri.....	166
Şekil 10.25.	Rölanti Devrinde Susturucu Çıkışından Ölçülen Egzoz Gazı Emisyonları	168

KISALTMALAR LİSTESİ

A.B.D.	: Amerika Birleşik Devletleri
A.Ö.N.	: Alt Ölü Nokta
AFR	: Air-Fuel Ratio (Hava/Yakıt Oranı)
Ar-Ge	: Araştırma ve Geliştirme
C₂H₆	: Etan'ın Moleküler Formülü
C₃H₈	: Propan'ın Moleküler Formülü
C₄H₁₀	: Bütan'ın Moleküler Formülü
C₅H₁₂	: Pentan'ın Moleküler Formülü
C₆H₁₄	: Hekzan'ın Moleküler Formülü
CH₄	: Metan'ın Moleküler Formülü
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış Doğalgaz)
CO	: Karbonmonoksit'in Moleküler Formülü
CO₂	: Karbondioksit'in Moleküler Formülü
CO_{cor}	: Monossido di Carboni, Corretto (Karbonmonoksit Doğrulama Değeri)
DOHC	: Double Overhead Camshaft (Üstten Çift Kam Miline Sahip)
ECU	: Electronic Control Unit (Elektronik Kontrol Ünitesi)
EIA	: U.S. Energy Information Administration (Birleşik Devletler Enerji Enformasyon İdaresi)
H₂S	: Hidrojen Sülfür'ün Moleküler Formülü
HC	: Hidrokarbon'un Moleküler Formülü
HCCI	: Homogeneous Charge Compression Ignition (Homojen Dolgulu Sıkıştırma Ateşlemeli)
He	: Helyum'un Moleküler Formülü
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
HNO₃	: Nitrik Asit'in Moleküler Formülü
İzo-Bütan	: Bütan'ın İzomeri
İzo-Pentan	: Pentan'ın İzomeri
LNG	: Liquefied Natural Gas (Sıvılaştırılmış Doğalgaz)
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış Petrol Gazı)
mak.	: Maksimum
MAP	: The Manifold Absolute Pressure (Manifold Mutlak Basıncı)
min.	: Minimum
N₂	: Nitrojen'in Moleküler Formülü
n-Bütan	: Normal Bütan
NO	: Azot Oksit 'in Moleküler Formülü
NO_x	: Azot Oksitlerin Genel Moleküler Formülde Gösterimi
n-Pentan	: Normal Pentan
O₂	: Oksijen'in Moleküler Formülü

OBD	: On-Board Diagnostics (Göstergeden Arıza Teşhisi)
OECD	: Organisation for Economic Co-operation and Development (Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü)
PM	: Partikül Madde
PVC	: Polivinil Klorür
S.S.C.B.	: Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği
SDG	: Sıkıştırılmış Doğalgaz
SI	: Spark Ignition (Buji Ateşlemeli)
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
Ü.Ö.N.	: Üst Ölü Nokta



SEMBOLLER LİSTESİ

%	: Yüzde Oran
(Hacimsel%)	: Hacimsel Olarak Yüzde Oran
(Mol%)	: Molar Olarak Yüzde Oran
°C	: Santigrat Derece (Sıcaklık Birimi)
°K	: Kelvin Derece (Sıcaklık Birimi)
bar	: Basınç Birimi
be	: Özgül Yakıt Tüketimi
Bel	: Ses Şiddeti Temel Birimi
cc	: Santimetre Küp (Hacim Birimi)
Cl.	: Manometre Hassasiyeti Sınıflandırma Sembolü
cm	: Santimetre (Uzunluk Birimi)
cm²	: Santimetre Kare (Alan Birimi)
D	: Çap Sembolü
g	: Yoğunluk Sembolü
dB	: Desibel (Ses Birimi)
dB(A)	: Sesin İnsan Kulağını Referans Alan Birimi
g	: Gram (Kütle Birimi)
g.TNT	: Gram TNT (Gram Biriminde TNT Eşdeğer Patlama Enerjisi)
gr	: Gram (Kütle Birimi)
h	: Saat (Zaman Birimi)
HP	: Horse Power = Beygir Gücü (Güç Birimi)
H_U	: Yakıtın Alt Isıl Değeri
kCal	: KiloKalori (Enerji Birimi)
kg	: Kilogram (Kütle Birim)
kJ	: Kilo Joule (Enerji Birimi)
kmol	: Kilo Mol
kN	: KiloNewton (Basınç Birimi)
kW	: KiloWatt (Enerji Birimi)
lt	: Litre (Hacim Birimi)
m	: Kütle Sembolü
mt	: Metre (Uzunluk Birimi)
m³	: Metreküp (Hacim Birimi)
mbar	: Milibar (Basınç Birimi)
Md	: Motor Momenti Sembolü
mDoğalgaz	: Doğalgazın Kütlesi
mHava	: Havanın Kütlesi
MJ	: Mega Joule (Enerji Birimi)

mm	: Milimetre (Uzunluk Birimi)
MPa	: Mega Pascal (Basınç Birimi)
m_H	: Stokiyometrik Orandaki Kütlesel Hava Miktarı
m_{r,Doğalgaz}	: Reaksiyona Göre Doğalgaz Kütlesi
m_{r,Hava}	: Reaksiyona Göre Hava Kütlesi
ms	: Milisaniye (Zaman Birimi)
m_{T,Benzin}	: Tüketilen Benzinin Kütlesi
m_{T,Doğalgaz}	: Tüketilen Doğalgazın Kütlesi
m_Y	: Stokiyometrik Orandaki Kütlesel Yakıt Miktarı
n	: Motor Devir Sayısı
n_{Doğalgaz}	: Doğalgazın Mol Sayısı
n_{Hava}	: Havanın Mol Sayısı
Nm	: Newton.Metre (Moment Birimi)
n_{Yakıt}	: Yakıtın Mol Sayısı
Ø	: Limit Aralığı
P₀	: Atmosfer Basıncı
P₁	: Sıkıştırma Sonu Basıncı
P₂	: Yanma Basıncı
Pascal	: Basınç Birimi
Pe	: Efektif Motor Gücü Sembolü
ppm	: Milyonda Bir Birim (Parts Per Million)
S	: Uzunluk, Mesafe Sembolü
s	: Saniye (Zaman Birimi)
sn	: Saniye (Zaman Birimi)
T	: Sıcaklık Sembolü
V	: Hacim Sembolü
V_S	: Strok Hacmi
V_T	: Her Bir Silindire Ait Toplam Hacim
V_Y	: Yanma Odası Hacmi
z	: Silindir Sayısı
Δt	: Zaman(Süre) Değişimi
η_e	: Efektif Verim
λ	: Hava Fazlalık Katsayısı

1. GİRİŞ

Bu bölümde, çalışma konusu ile ilgili bilgilere yer verilmekle birlikte çalışma konusunun amacı, önemi ve çalışmalara ait bilgiler kısaca belirtilmiştir.

Günümüzde mevcut olarak kullanılan ve üretilen motorlu taşıtların neredeyse tamamına yakını, güç üretim ünitesi olarak içten yanmalı motorlara sahiptir. İçten yanmalı motorlar genel olarak otto çevriminde ve dizel çevriminde üretilmektedir. Karayollarında kullanılan motorlu taşıtlarda; yaygın olarak benzin, motorin ve likit petrol gazı yakıt olarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde üretilen taşıtların ve mevcut olarak kullanılan taşıtların çoğunluğunu binek taşıtlar oluşturmaktadır. Genel kullanım süresinin çoğunluğunu şehir içi trafiğinde geçiren binek taşıtların büyük oranı benzinli motorlara sahiptir. Şehir içi trafikte; hız sınırlamalarının bulunması, kısa mesafe aralıklarında trafik ışıklarının bulunması, yavaşlatma kasislerinin yaygın olarak kullanılması ve trafik akışının çevresel faktörlerden dolayı düşük hızlarda seyir etme zorunluluğunu getirmesi; motorların kısmi yüklerde çalışmasına neden olmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı benzinli motorların kısmi yüklerde daha az yakıt tüketmesi ve daha az miktarda egzoz gazı emisyon salınımı yapması istenilmektedir. Bu çalışmada, motorlu taşıtların neden olduğu çevre kirliliğini en asgari seviyeye düşürmek ve enerji kaynaklarının verimli kullanılabilmesini sağlamak amacıyla alternatif yakıt olan doğalgazın homojen dolgulu buji ateşlemeli motorlarda kullanılmasının motor performansına etkileri belirlenmiştir.

Petrol esaslı yakıtlarla çalıştırılan motorlu taşıtların, ürettikleri zararlı egzoz gazı emisyonları; önemli miktarda çevresel kirliliğe sebep olmakta ve ekolojik dengeyi bozmaktadır. Özellikle yerleşim bölgelerinde yoğun olarak biriken egzoz gazı emisyonları, doğrudan insan sağlığına zararlı etkiler oluşturmaktadır. Bu sebepten dolayı, alınan diplomatik kararlar doğrultusunda; otomotiv endüstrisi ana imalatçıları, daha az çevresel tahribata neden olan taşıtlar üretebilmek doğrultusunda çalışmalar sürdürmektedir. Otomotiv sektöründeki günümüz motor teknolojilerinin gelişimi incelendiğinde, yüksek motor performansının yanı sıra ekonomik yakıt tüketimi ve düşük miktarda egzoz gazı emisyon salınımını hedefleyen araştırma ve geliştirme çalışmaları görülmektedir.

Benzinli motorlar benzin yakıtıyla çalışacak halde imal edilmelerine rağmen, yakıt dönüşüm sistemleri ile alternatif yakıtlarla da çalıştırılabilmektedir. Günümüzde benzinli motorlara yaygın olarak LPG yakıt sistemi dönüşümleri yapılmakla birlikte son yıllarda CNG yakıt sistemi dönüşümleri de uygulanmaya başlanmıştır. Alternatif yakıt sistemlerine ve alternatif yakıtın kullanımına geçişte; taşıt kullanıcılarının dikkatini çekecek olan en önemli husus, taşıt işletme maliyetlerini azaltacak olan yakıt tüketim ekonomisidir. Birçok Avrupa ülkesinde ise bu durum; alternatif yakıtın çevreci ve temiz olmasıyla teşvik edilebilirlik anlamı kazanmaktadır. Avrupa, Asya ve Amerika kıtalarında yer alan birçok gelişmiş ülkede likit petrol gazı(LPG) ve sıkıştırılmış doğalgaz(CNG), taşıt motorlarında yakıt olarak yaygın halde kullanılmaktadır.

Otomotiv sektöründe bu çalışmaların yanı sıra, içten yanmalı motorlara sahip taşıtlarda; alternatif yakıtlarla motorlarda güç üretimi üzerine çalışmalar ağırlıklı olarak sürdürülmektedir. Benzinli motorlarda, günümüz şartlarında kullanılabilirlik açısından en ideal alternatif yakıt olan doğalgaz, en temiz yakıt olma özelliğine de sahiptir. Herhangi bir işleme gerek duyulmaksızın, kayağından çıkarıldığı haliyle kullanılabilir olması ve boru hatlarıyla transferinin yapıyor olması; ürün maliyetini oldukça düşürmektedir, dolayısıyla ekonomik bir yakıttır. Günümüz itibarı ile bilinen rezerv kaynaklarına bakıldığında yaklaşık 52.8 yıllık rezerv ömrünün olduğu görülmektedir [12]. Bu verilere göre doğalgazın rezerv ömrü petrolün rezerv ömründen daha fazladır. Ayrıca dünyanın çeşitli bölgelerindeki rezerv kaynaklarında üretim artışı sağlandığının ve hali hazırda keşfi yapılmamış birçok doğalgaz rezerv kaynağının var olduğu öngörüsü de göz ardı edilmemelidir.

Gerek yanma reaksiyonu sonucu çıkardığı ürünler bakımından, gerekse transferi esnasındaki durumlar itibarı ile çevreci ve temiz bir yakıt olan doğalgazın; zehirsiz olması ve yoğunluğunun havadan düşük olması sebebiyle sızıntı anında zeminde birikme yapmaması tehlikeli bir yakıt olmadığını göstermektedir. CNG'nin tutuşma sıcaklığının 700°C gibi değer ile benzine göre yüksek olması ve havada %4 ile %16 aralığında sınırlı konsantrasyon oranında yanabilir olması; kaçak anında patlama ve tutuşma olasılıklarını oldukça düşük kılmaktadır [8,26,27]. Bu da yine doğrudan güvenli bir yakıt olduğunu göstermektedir. Gaz fazında bir yakıt olup kirletici madde içermediğinden dolayı; yağlama yağını kirletmez ve yağlama yağı performansının artmasını sağlar. Yanma reaksiyonu sonucunda artık bırakmadığından dolayı silindir, piston, supap ve yanma odası

yüzeylerinde; is ve kurum gibi kirlenmelere neden olmamaktadır [7,36]. Başta bujiler ve egzoz sistemi donanımları olmak üzere, motorların işletme ömrünü uzatmakta ve taşıtın bakım maliyetlerini önemli oranda azaltmaktadır. Benzinle kıyaslandığında; çevreye zararlı olan NO_x, CO, PM ve HC egzoz emisyonlarında önemli oranda düşme sağladığı görülmektedir. CNG yakıtının kullanımı ile motorun gürültü seviyesinin azalması da, sürüş konforuna ve gürültü kirliliğinin azalmasına sağladığı bir başka katkıdır [9,11,37].

Egzoz gazı emisyonlarında önemli oranda azalma sağlayan CNG yakıtının; bir diğer başlıca avantajı ise hem hacimsel tüketim açısından, hem de maddi tüketim açısından ekonomik bir yakıt olmasıdır. Bunu sayısal olarak ifade etmek gerekirse, CNG yakıtının benzinli motorda kullanımında maddi tüketim açısından; benzine göre %45'in üzerinde ve emsal nitelikte bir alternatif yakıt olan LPG'ye göre ise %15'in üzerinde ekonomi sağlamaktadır.

Petrol rezervlerinin yakın gelecekte tükenecek veya büyük ölçüde azalacak olduğuna dair öngörüler değerlendirildiğinde; bundan sonra petrolün yakıt olarak değil de endüstriyel üretimlerde ham madde olarak kullanılması daha verimli bir zemin oluşturacaktır. Bu bağlamda rezerv sıkıntısı söz konusu olan petrol türevli yakıtlara bağımlı kalmamak ve enerji verimliliği sağlamak için taşıt motorlarında alternatif yakıt olarak sıkıştırılmış doğalgaz kullanımına yönelimin artması gerektiği öngörülmektedir.

İçten yanmalı motorlara sahip taşıtlarda doğalgazın sıkıştırılmış formu olan CNG birçok gelişmiş ülkede yaygın olarak kullanılırken, ülkemizde ise ancak sınırlı sayıda taşıtta kullanılmaktadır. Motorlu taşıtlarda yaygın olarak kullanılan benzin, motorin ve likit petrol gazına göre daha ekonomik, daha güvenli ve çok daha çevreci olan sıkıştırılmış doğalgazın aynı zamanda petrol esaslı yakıtlara göre daha fazla rezerv kaynağına sahip olması nedeniyle yakın gelecekte en fazla tercih edilen yakıt olacağı düşünülmektedir. Benzinli motorların en yaygın kullanılan motor olmasından ve revize işlemine gerek kalmadan sadece dönüşüm elemanlarının montajlanması suretiyle; CNG'nin benzinli motorlarda yakıt olarak kullanılması önemli bir değerdir.

Yapılan literatür araştırmalarında çok nokta enjeksiyonlu homojen dolgulu benzinli motorlarda CNG yakıtının kullanılması ile ilgili yeterli deneysel çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmada, benzin yakıtıyla çalışan çok nokta enjeksiyonlu, homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motora CNG yakıt dönüşüm sistemi uygulaması yapılmış ve mevcut motor hem doğalgaz hem de benzin yakıtı ile çalışabilir hale

getirilmiştir. Deney motorunda, benzin yakıtının kullanılması durumlarında ve doğalgazın kullanılması durumlarında; motor moment ölçümleri, egzoz gazı emisyon ölçümleri, hava fazlalık katsayısı ölçümleri, yakıt tüketimi ölçümleri, titreşim ölçümleri, gürültü ölçümleri ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerle elde edilen verilere göre efektif motor gücü, karışımların hava/yakıt oranları, özgül yakıt tüketimi, efektif verim, özgül enerji maliyeti hesaplanmıştır. Elde edilen tüm sayısal veriler ve bulgular karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Deneyler farklı motor devir hızı şartlarında ve farklı yükleme durumlarında tekrarlanmıştır. Doğalgaz yakıtının, benzinli motorlarda kullanılması durumunda; motor performansını artırmak için yapılabilecek geliştirme çalışmaları ve uygulanabilirliği araştırılmıştır.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde araştırma konusunun temelini oluşturan homojen dolgulu benzinli motorların üzerinde durulacaktır.

2.1. Taşıt Motorları

Herhangi bir enerji formunu, mekanik enerjiye çeviren makinalar; motor olarak adlandırılmaktadır. Motorlar genel anlamda birer güç üreteçleridir. Yakıt ile havanın reaksiyona sokulması ile sağlanan yanma reaksiyonu sonucunda elde edilen ısı enerjisini, mekanik enerjiye çeviren makinalar ise termik motorlardır. Termik motorlar çeşitli niteliklerine göre sınıflandırılırlar. Tablo 2.1’de termik motorlar sınıflandırılmıştır.

Termik motorlarda meydana çıkarılan ısı enerjisi, motorun silindir içlerinde ya da dışlarında üretilirler; silindir dışında ısı enerjisinin üretildiği motorlar dıştan yanmalı motor, silindir içinde ısı enerjisinin üretildiği motorlar ise içten yanmalı motor olarak gruplandırılmaktadır. Günümüz taşıtlarında yaygın olarak kullanılan güç üretim sistemleri içten yanmalı motorlardır.

Tablo 2.1. Termik Motorların Sınıflandırılması

TERMİK MOTORLAR				
İçten Yanmalı Motorlar	Pistonlu Motorlar	Piston Birleştirmesi	Doğrusal Pistonlu	Sıralı Tip, V Tipi, Boksör Tipi, Yıldız Tipi, W Tipi, H Tipi, Zıt Pistonlu Tip
			Döner Pistonlu	Wankel, Quasiturbine
		Ateşlemesi	Buji Ateşlemeli, Sıkıştırma Ateşlemeli	
		Yakıtı	Benzinli, Dizel, LPG'li, Doğalgazlı, Diğer Yakıtlar	
		Zamanlaması	2 Zamanlı, 4 Zamanlı, 6 Zamanlı	
		Çevrimleri	Sabit Hacim, Sabit Basınç, Karma	
		Silindir Sayısı	Tek Silindirli Motorlar, Çok Silindirli Motorlar	
		Soğutması	Hava Soğutmalı, Su Soğutmalı	
	Tepkili Motorlar	Türbin Desteklemeli	Turbofan, Turbojet, Turboprop, Turboşaft	
		Ram Desteklemeli	Termojet, Pulse jet, Ramjet, Scramjet	
Dıştan Yanmalı Motorlar	Pistonlu Motorlar	Stirling Motoru, Buhar Makinası, Newcomen Makinası		

2.1.1. İçten Yanmalı Motorlar

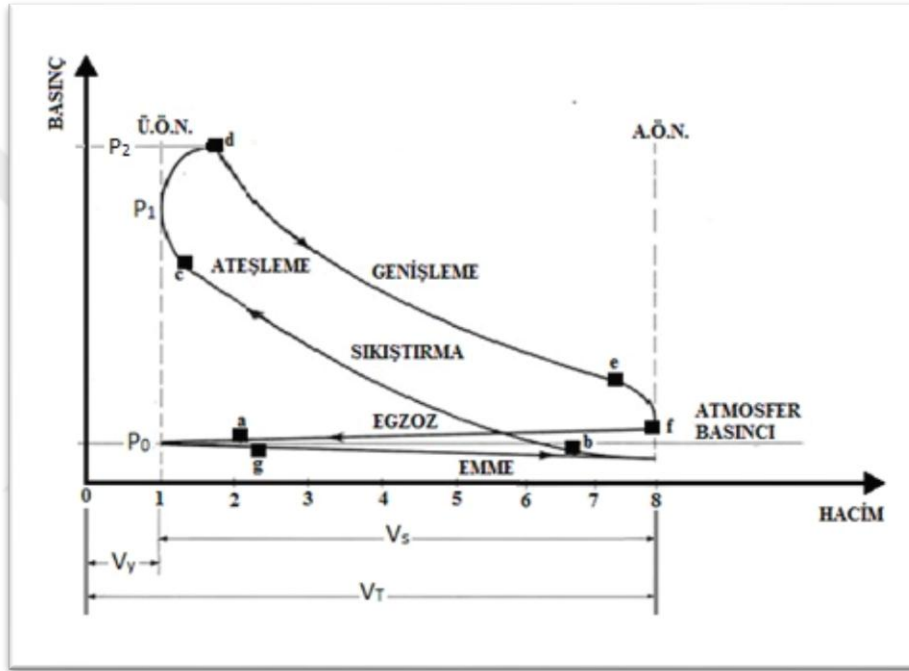
İçten yanmalı motorlarda; ısı enerjisi açığa çıkaran yakıtların hava ile reaksiyona sokulması vasıtasıyla yanma odası içerisinde, yanma reaksiyonu oluşturulur. Taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorlar pistonlu motorlardır, dolayısıyla içten yanmalı pistonlu motorlar incelenmiştir. Yanma reaksiyonu sonucunda açığa çıkan gazlar, silindir içindeki basıncın ve sıcaklığın artmasına neden olur. Bu yanma reaksiyonu sonucunda oluşan gaz basıncının etkisiyle piston harekete geçer ve mekanik hareket başlamış oluşmuş olur. Bu işlemin periyodik olarak devam etmesi için genişleyen gazlar, silindirden çıkartılmalı ve taze dolgu silindire alınarak işlem tekrar edilebilmelidir. Dolgunun yanma odasına alınmasından, atık gazların silindiri terk etmesine kadar gerçekleşen bu olaylar dizisine çevrim denir. Bir evrim boyunca hareket eden pistonlar biyel kolu aracılığı ile krank milini döndürmek suretiyle mekanik hareket enerjisini oluşturur. Her çevrimde krank mili bir tur döner.

Geleneksel kara taşıtlarında kullanılan içten yanmalı motorlar iki çevrim esasına göre çalışmaktadır; bunlar sabit hacim (otto) evrimi ve sabit basınç (diesel) evrimidir. Sabit basınç çevriminde motorin kullanılmaktadır ve sıkıştırma sonucunda ateşleme sağlanarak yanma reaksiyonu oluşturulmaktadır, bundan dolayı sabit basınç çevrimine sahip motorlar sıkıştırma ateşlemeli motorlar veya dizel motorlar olarakta anılmaktadır. Sabit hacim çevriminde ise benzin yakıtı kullanılmak suretiyle buji ateşlemesi sonucunda yanma reaksiyonu oluşturulmaktadır. Dolayısıyla sabit hacim çevrimine sahip motorlar, buji ateşlemeli motorlar veya benzinli motorlar olarakta isimlendirilmektedir.

2.1.1.1. Benzinli (Buji Ateşlemeli) Motorlar

Buji ateşlemeli motorların çalışma prensibini otto çevrimi teşkil etmektedir. Buji ateşlemeli motorların geleneksel yakıtı benzindir. Buji ateşlemeli motorlarda yakıt-hava karışımı emilir, bu karışım sıkıştırılır ve buji vasıtasıyla ateşlenir. Günümüz taşıtlarında, 4 zamanlı benzinli motorlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorlarda, çevrim dört zamandan ibarettir. Bu dört zaman; emme zamanı, sıkıştırma zamanı, yanma(iş) zamanı, egzoz zamanıdır. Emme zamanında; piston aşağıya doğru hareketine başladığında, emme supabı açılır ve taze dolgu silindir içine emilir. Piston strokunun sonunda A.Ö.N' ya ulaştığında emme supabı kapanır ve sıkıştırma zamanı başlar. Sıkıştırma zamanında; piston

Ü.Ö.N' ya doğru yükseldiğinde, silindir içindeki dolgu sıkıştırılır. Dolgunun hacmi küçülür dolayısıyla basınç ve sıcaklık artmış olur. Tutuşma sıcaklığına ulaşmış olan dolguya buji ile ateşleme yapılarak yanma zamanı başlatılır. Yanma neticesinde çok yüksek basınçta gazlar oluşur ve piston bu gazların basıncıyla A.Ö.N' ya doğru kuvvetle itilir. Piston A.Ö.N' ya ulaştığında egzoz supabı açılır. Piston Ü.Ö.N' ya doğru hareketinde silindir içindeki yanma gazlarını silindir dışına atar ve Ü.Ö.N' ya varıldığında çevrim tamamlanmış olur.



Şekil 2.1. Dört Zamanlı Benzinli Motorun Basınç-Hacim Diyagramı

Dört zamanlı bir benzinli motorun, basınç-hacim diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Yanma odası hacmi 1 birim, silindir hacmi ise 8 birim olarak kabul edilmiştir. Dolayısıyla diyagramdan, motorun sıkıştırma oranının 8:1 olduğunu görülmektedir. Çevrim, emme zamanı ile "a" noktasında başlamaktadır. Bu nokta Ü.Ö.N. ile çakışık değildir, çünkü supapların açılması için belirli bir süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Emme zamanında bir vakum etkisi olduğundan dolayı basınç azalmaktadır. Piston Ü.Ö.N.' dan geçip aşağı yönde strok hareketine başladığında silindir içinde vakumlama meydana gelir. Vakum yakıt-hava karışımının silindir içine emilmesini sağlamaktadır. Emme zamanı "b" noktasında sona erer. Piston bu sırada yukarı yönde strok hareketine

başlamıştır ve silindirde sıkıştırma meydana gelmektedir. Sıkıştırma, piston Ü.Ö.N' ya ulaşıncaya kadar devam eder. Basınç; P_1 'den, P_2 'ye yükselirken, hacim azalır. Buji kıvılcımının sıkıştırılmış dolguyu ateşlemesi ile, "c" noktasında karışım oldukça hızlı bir şekilde yanmaya başlar. Yanma Ü.Ö.N.' dan önce başlayıp sonrasında tamamlandığı için hacimde bir miktar değişim oluşmaktadır. Yanmanın tam Ü.Ö.N' da gerçekleştirilememesinin sebebi hava-yakıt karışımının yanması için belirli bir zamana ihtiyaç duyulmasıdır. Yanma sırasında silindir basıncında aniden gelişen ve diyagramda "c-d" arasında gösterildiği gibi bir artış gözlenir. Basıncıdaki bu ani artış pistonun aşağı doğru itilmesi için yeterli baskı kuvvetini sağlar. Piston, A.Ö.N' ya doğru hareket ederken gazlar genleşmeye devam eder. Diyagramdan; "d-e" arasında görüldüğü gibi hacim artar, basınç azalır. Egzoz zamanı A.Ö.N.' dan daha önce, yani "e" noktasında başlar. Piston A.Ö.N.' ya eriştiğinde basınç aniden azalır. Piston, Ü.Ö.N.' ya doğru strok hareketine başladığında egzoz gazları dışarı atılır. Bundan dolayı basınçta düşük bir oranda azalma meydana gelir. Egzoz zamanı "g" noktasında son bulur ve diyagramdan görüldüğü gibi "g" noktası Ü.Ö.N. seviyesinde olmadığı için silindir içine alınan karışım da egzoz gazlarının dışarı atılmasına yardımcı olur.

2.1.1.2. Benzinli Motorlarda Homojen Dolgu Sistemleri

Günümüzde üretilen ve hali hazırda kullanılan benzinli motorların büyük çoğunluğunu homojen dolgulu motorlar oluşturmaktadır. Homojen dolgulu motorlarda hava-yakıt karışımının stokiyometrik oranda olması gerekmektedir. Yanma reaksiyonun başlaması için emilen dolgu, hava-yakıt karışımını homojen bir halde ihtiva etmelidir. Çok noktadan enjeksiyonlu sistemler, homojen yapıda dağılmış bir hava-yakıt karışımını hazırlamak için en ideal püskürtme sistemleridir. Çok noktadan enjeksiyon sistemlerinde karışımın homojenize olması için, yakıt emme supabının arkasına yüksek hassasiyette parçacıklar halinde püskürtülmelidir. Yakıtın enjekte edilme süresi, motorun devir hızına bağımlı olarak değişmektedir. Yüksek devirlerde, emme süresi kısalmaktadır. Dolayısıyla emme supabı kapalı konumda iken püskürtme işlemine başlanır ve supap açık kaldığı müddetçe püskürtme işlemi devam eder. Buradan anlaşılacağı gibi emme supabı kapalı iken püskürtme işleminin başlamasından dolayı, buharlaşma manifold içerisinde başlayacak ve hava-yakıt karışımının daha homojen yapıda olması sağlanacaktır. Benzinli motorlarda ideal karışımın hazırlanması ve dolgunun silindir içerisine optimum şartlarda

alınmasını sağlamak için homojen dolgulu sıkıştırılmalı ateşlemeli (HCCI) motorlar geliştirilmiştir. Günümüzde Mercedes, BMW, Audi, Volkswagen, Opel, Honda, Mazda, Hyundai, Mitsubishi, Bosch ve Delphi gibi otomotiv endüstrisi üreticileri; homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorları geliştirmişlerdir [53].

Otomotiv sektöründeki bazı üreticiler ise geliştirmiş oldukları homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorları daha da geliştirmek için çalışmalarını sürdürmektedir [54].

Buji ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli motorların ortak avantajlarına sahip olan homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli(HCCI) motorlar, geleneksel buji ateşlemeli(SI) motorlara göre NO_x emisyonlarında azalma ve %10 ile %30 arasında yakıt ekonomisi sağlamaktadır. HCCI motorların öne çıkan özelliği düşük egzoz gazı emisyonları ve yüksek yakıt ekonomisi sağlamasıdır. Sıkıştırma ateşlemeli ve buji ateşlemeli motorların ortak özelliklerine sahip olmasından dolayı, her iki motor türü üzerinde değişiklik yapmak suretiyle; HCCI motor dönüşümü sağlamak mümkündür. HCCI motorların yanma durumları kendine özgüdür ve HCCI yanma olarak anılmaktadır. HCCI yanma; optimum düzeyde homojenize olmuş fakir karışımın silindir içinde sıkıştırılarak kendi kendine tutuşturulması ile başlayan yanma reaksiyonu dizisinden oluşmaktadır. HCCI motorlarda; motor yükü, emme havasında debi azalması olmaksızın hava/yakıt oranının kontrolü ile sağlanır. Bu kontrolü sağlayan değişken supap zamanlamasıdır. Fakat HCCI motorlarda, HCCI yanma ile çalışma aralığı kısıtlıdır. Çoğunlukla motorun sadece kısmi yüklerinde çalışabilmektedir. Homojen haldeki fakir karışımdan oluşan dolgunun sıkıştırılması sonucunda yanma odasındaki dolgunun tamamı eş zamanlı olarak kendi kendine tutuşabilir. Bu durumda zengin karışım bölgeleri engellenir. Fakir karışım ile silindir içindeki lokal sıcaklıklar; geleneksel buji ateşlemeli homojen dolgulu motorlardaki alev cephesinin önünde oluşur. HCCI yanmasında alev yayılımı meydana gelmeden önce, alev cephesinin önünde dolgunun tamamı yanar. Bu durumun sonucu olarak termal azot oksit emisyonlarının oluşumu azaltılır [55].

Yanma sonucunda ortaya çıkan enerjinin oluşum hızını uygun değer yelpazesinde tutmak için motor daha az yakıt ve daha fazla hava ile çalıştırılmalıdır. Dolgunun içerisindeki yakıt miktarının daha az olması, egzoz zamanında ortaya çıkan yanmış gazların sıcaklığını düşürmektedir. Bu durumda adyabatik süreçlerine yaklaşılr, yani kapalı çevrimdeki ısı kayıpları azalır. Isı kaybındaki azalmalara bağlı olarak motorun indike ısı veriminde artışı sağlanır. Bu noktada bir dizel motorun karakteristiklerine

yaklaşım söz konusudur. Ayrıca homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yanma prosesi, hem dizel hem de benzinli motorlardan farklı olarak karışımın her yerinde homojen bir halde gerçekleşir. Dolayısıyla zengin karışımın yanması süresince gözlemlenen alev yayılımı oluşmadığından egzoz gazı emisyonlarında partikül maddeye neredeyse hiç rastlanmaz.

Homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motorlarda yüksek HC ve CO emisyonları, sınırlı çalıştırma düzeni ve yanma içi gerekli homojen dolgu karışımının kontrol altında tutulması gibi problemler mevcuttur. Homojen dolgu yanma sistemlerinde; yakıt, silindir içerisindeki yarıklara birikir ve yanma reaksiyonuna girmez. Ayrıca homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli(HCCI) motorların egzoz zamanı sonrası açığa çıkardığı egzoz gazlarının sıcaklığı, geleneksel buji ateşlemeli(SI) motorlarındakinden oldukça düşüktür. Bunun sebebi dolgunun daha fakir karışım halinde alınmasıdır. Buradaki yanmış gaz sıcaklıkları genişleme strokunda silindire tekrar giren yanmamış yakıtın tamamını tüketemeyecek kadar düşüktür. Bundan dolayı hem CO hem de HC emisyonları geleneksel buji ateşlemeli motorlardan yüksektir. Bunun yanında motorun düşük yüklenme durumlarındaki egzoz zamanı sonunda açığa çıkan gazların sıcaklıkları, CO emisyonlarının oksidasyon ile CO₂ emisyonlarına dönüşebilmesi için yetersiz kalmaktadır ve yanma verimi hızlıca bozulmaya başlamaktadır. Yanma verimindeki hızlıca başlayan bozulmaların getirdiği kayıplar, tutuşma zorluklarıyla bir araya geldiğinde düşük yüklerde homojen dolgunun sıkıştırma ile ateşlemesini sınırlamaktadır [55,56].

Daha yüksek yüklenme durumlarında motora emilen artırılmış hava miktarı silindir içindeki artık gazların yerini alır ve dolgunun yetersiz yoğunlukta olmasından dolayı yanma hızının yavaşlatır. Ayrıca yüklemenin yüksek oranda olması, sıkıştırma oranının fazlalığında dolayı basınçta fazla olacaktır. Bu fazla basınç motordaki titreşim ve gürültünün artmasına sebep olacaktır ki bu durumlarda basınç artışı kontrol edilemezse motorun hasar görmesi muhtemeldir [57].

HCCI motorlar kısmi yük şartlarının ortalarında HCCI yanmasıyla çalışmasına rağmen tam yük ve çok düşük yük durumlarında HCCI yanmasını gerçekleştirememektedir. Tüm yük ve motor devir hızlarında, HCCI yanmasını gerçekleştirmek için; silindir içi basınç, silindir içi sıcaklık, hava/yakıt oranı ile birlikte dolgunun tam homojenize olması sağlanmalıdır. Bu parametreler emme supabı açılmadan önce, ideal değerlerde sağlandığı durumda; dolgunun sıkıştırma zamanında kendi kendine

tutuşma zamanlaması sağlanacak ve HCCI yanması gerçekleşecektir. Görölmektedir ki HCCI yanmasının başlangıcı; termodinamik şartlara ve silindire emilen dolgunun hava/yakıt oranına bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Geleneksel buji ateşlemeli benzinli motorlarda(SI), benzinin kolaylıkla homojenize olması bir avantajken, benzinin yüksek oktan değeri dezavantaj oluşturmaktadır. Yüksek oktan değerinden dolayı benzinli motorların sıkıştırma oranı, dizel motorlar kadar artırılmamaktadır. Bir dizel motorun sıkıştırma oranına yaklaşılarak HCCI yanmasını sağlamak, geleneksel buji ateşlemeli motorlarda vuruntu problemi başlamaktadır. Fakat HCCI motorlarda, fakir karışımla çalışıldığı için sıkıştırma oranının artırmak mümkün olmaktadır. Mazda'nın SkyActiv-G olarak adlandırdığı homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli teknolojisine sahip motorun birinci jenerasyonunda homojen yapıdaki karışım dolgusunu 14:1 oranında sıkıştırma sağladığını belirtmiştir. Mazda, sürdürmüş olduğu ar-ge çalışmaları sonucunda 18:1 sıkıştırma oranına sahip ikinci jenerasyonu geliştirdiğini ve birinci jenerasyona göre %30 daha fazla enerji verimliliği, CO₂ emisyonunda 80g/km'ye düşme sağladığını açıklamaktadır [58].

2.1.1.3. Buji Ateşlemeli Homojen Dolgulu Benzinli Motorlar

İçten yanmalı buji ateşlemeli motorlarda, silindir içerisine alınan yakıt; yakılmak suretiyle ısı enerjisi ve ısı enerjisiyle de mekanik enerji oluşturulur. Taşıtı tahrik edebilmek için üretilmesi gerekli olan mekanik enerji, bu motorlarda yanma reaksiyonu ile mümkündür. Yanma reaksiyonun oluşması için yakıtın ve havanın tepkimeye sokulması gerekir. Yakıt ve havadan oluşan ve silindir içine emilen karışım, dolgu olarak adlandırılır. Dolgu yakılırken, bu reaksiyondan; yüksek verim alınması, tüketim değerlerinin ekonomik olması ve yanma reaksiyonu ürünü olarak çevreye salınacak olan zararlı gazların en asgari seviyede olması beklenir. Bunları sağlayan bir yanma; tam yanma veya ideal yanma olarak anılır. İdeal yanma için ideal karışım oranı sağlanmalıdır.

Yanma odasına alınan dolgunun, tam yanmasındaki belirleyici faktör hava fazlalık katsayısıdır. Hava fazlalık katsayısının formülü, denklem 2.1.'de verilmiştir.

$$\text{Hava Fazlalık Katsayısı} = \lambda = \frac{AFR_{Gerçek}}{AFR_{Teorik}} = \frac{(m_{hava}/m_{yakıt})_{gerçek}}{(m_{hava}/m_{yakıt})_{teorik}} \quad (2.1)$$

İdeal bir karışım; $\lambda=1$ olduğu durumda sağlanır. Benzinli motorlarda, 1kg benzin ile 14,7 kg havanın karışımı; ideal karışım olarak değerlendirilir. İdeal karışımın yakıldığı bir yanma reaksiyonunda tam yanma sağlanır ve yanma sonucunda oluşan zararlı gazların neredeyse tamamı katalizör tarafından çevreye uyumlu gazlara dönüştürülebilir. Çünkü böyle bir yanma reaksiyonunda yakıtta verilen gerçek hava miktarı tam olarak stokiyometrik hava ihtiyacına denktir. Eğer eksik hava alınırsa, yakıtın bir kısmı yanmayacaktır ve yanmayan hidrokarbonlar; çevreye daha fazla zararı dokunacak olan yüksek emisyonu sebep olacaktır. Ayrıca yanmayarak egzozdan atılan hidrokarbonlar, enerji kaybıdır; bu kayıp, tüketim ekonomisini olumsuz yönde etkileyecektir [1,2].

Buji ateşlemeli motorlarda silindir içerisinde hava ile yakıt birlikte emilmektedir ve yine hava-yakıt karışımı birlikte sıkıştırılmaktadır. Dolayısıyla yanmaya hazır hale gelmiş olan hava-yakıt karışımı fazla sıkıştırılırsa; yanma odasındaki basınç ve sıcaklık, kritik limitin üzerine çıkacaktır ve dolgu kendiliğinden tutuşmaya zorlanacaktır. Bu durum ise vuruntuya sebep olacaktır. Tüm bunlardan dolayıdır ki, buji ateşlemeli motorlarda sıkıştırma oranı sınırlandırılmıştır [3].

Homojen dolgudan kasıt, yanma odası içerisinde sıkıştırılmış olan dolgunun; her bölgede eşit oranda hava-yakıt karışımını ihtiva etmesidir. Homojen dolgulu buji ateşlemeli motorlarda; dolgu içerisindeki yakıtın derişim oranı, silindire emilen karışımın her yerinde aynıdır.

Benzinli motorlar fakir karışım ile çalıştırılmamaktadır ve dolayısıyla homojen dolgulu motorlarda; yanma odasında sıkıştırılan dolgunun hava-yakıt karışım oranı her zaman aynıdır [3,4,5].

Homojen dolgulu motorlarda; yakıt mümkün olduğu kadar erken püskürtülerek karışımın oluşması için maksimum zaman sağlanmaya çalışılır. Bu sebepten dolayı yakıt emme strokunda püskürtülür. Böylece emilen hava, hızlı buharlaşmaya ve karışımın iyi homojenize olmasına yardımcı olur [5].

Günümüzde üretilen ve hali hazırda kullanılan benzinli motorların büyük çoğunluğunu homojen dolgulu motorlar oluşturmaktadır. Homojen dolgulu motorlarda hava-yakıt karışımının stokiyometrik oranda olması gerekmektedir. Yanma reaksiyonun başlaması için emilen dolgu, hava-yakıt karışımını homojen bir halde ihtiva etmelidir. Çok noktadan enjeksiyonlu sistemler, homojen yapıda bir dolgu hazırlamak için en ideal püskürtme sistemleridir. Çok noktadan enjeksiyon sistemlerinde karışımın homojenize

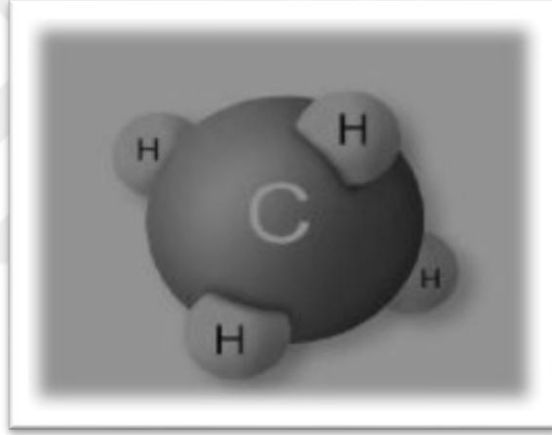
olması için, yakıt yüksek hassasiyette parçacıklar halinde püskürtülmelidir. Yakıtın enjekte edilme süresi, motorun devir hızına bağımlı olarak değişmektedir. Yüksek devirlerde, emme süresi kısalmaktadır. Dolayısıyla emme supabı kapalı konumda iken püskürtme işlemine başlanır ve supap açık kaldığı müddetçe püskürtme işlemi devam eder. Buradan anlaşılacağı gibi emme supabı kapalı iken püskürtme işleminin başlamasından dolayı, buharlaşma manifold içerisinde başlayacak ve hava-yakıt karışımının daha homojen yapıda olması sağlanacaktır.



3. DOĞALGAZ

3.1. Doğalgazın Tanımı

Doğalgaz, fosil kaynaklı olan ve yakıt olarak kullanılan yanıcı bir gazdır. Doğalgazın kimyasal yapısının büyük bölümünü metan(CH_4) oluşturmaktadır ve metan'ın, bilinen en basit hidrokarbon yapısı olması, doğalgazın yanma verimini artıran en büyük etkidir. Yerkabuğunun altında, belirli jeolojik oluşumlar ile doğal olarak oluşmaktadır. Yeraltında yalnız başına veya petrol ile birlikte bulunabilir. Yanıcı, renksiz ve kokusuz olmasıyla birlikte havadan hafiftir. Şekil 3.1'de metan'ın kimyasal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Metan (CH_4)'in Kimyasal Yapısı

Yeryüzünde, milyonlarca yıl önce yaşamış olan canlı artıklarının zamanla yerkabuğunun derinliklerine gömülüp kimyasal reaksiyona uğraması sonucunda oluşmaktadır. Organik madde olarak sınıflandırılan canlı atıkları, doğal olarak oluşan süreçler sonucunda göl, deniz ve okyanuslarla taşınıp, dibe çökerek çamur ve kumla kaplanmak suretiyle kayalaşırlar. Bu organik maddeler derinlere gömüldükten sonra; basınç, sıcaklık ve mikro organizmalar vasıtasıyla kömür, petrol ve doğalgaza dönüşürler.

Petrolde olduğu gibi doğalgazda kayaçların mikroskobik gözeneklerinde bulunur ve kayaç içerisinden akarak üretim kuyularına ulaşır. Doğalgaz, yüzeyde ayrıştırılarak içerisinde bulunan ağır hidrokarbonlar uzaklaştırılır [6].

Doğalgaz, saf halinde iken renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Güvenlik amacıyla merkaptanla kokulandırılmaktadır. Petrol, kömür ve diğer fosil yakıtlar ise kimyasal olarak daha karmaşık yapıdadırlar ve daha yüksek oranlarda karbon, kükürt ve nitrojen içerirler. Doğalgazın bileşenleri de, tıpkı ham petrol gibi, çıkarıldığı bölgelere göre farklılıklar göstermektedir [7].

Doğalgaz, doğadan ham olarak temin edilir ve her hangi bir işlemde geçirilmeksizin yakıt olarak kullanılır. Doğalgazın yeraltındaki bileşenlerinin, yine yeraltındaki ham petrolünde bileşenleri olduğu bilinmektedir. Geçmiş dönemlerde petrol üretimi esnasında ortaya çıkan ve yararsız bir atık olarak görülen doğalgazın, petrol üretim tesislerinden yakılarak uzaklaştırıldığı bilinmektedir. Fakat günümüzde oldukça değerli ve stratejik bir enerji kaynağı haline almıştır. Ekonomik bir yakıttır. Yanma sonucu çevreye verdiği zarar diğer yakıtlara göre çok daha azdır. Ayrıca boru hatları ile nakledilip, depolanmadığından dolayı depolama maliyeti de yoktur [14]. Başlıca kullanım alanları; endüstriyel olarak çeşitli mamullerin üretildiği sanayi tesisleri, konutlar ve ulaşım araçlarıdır.

Herhangi bir rafineri veya kimyasal bir işleme tabi tutulmaksızın, motorlu taşıtlarda alternatif bir yakıt olarak kullanılabilen doğalgaz; hidrojen dışındaki, motorlu taşıtlarda kullanılan diğer tüm yakıtlardan daha düşük emisyon değerlerine sahiptir. Dolayısıyla CNG, hidrojenden sonra en temiz yanan alternatif yakıttır. Hatta elektrikli taşıtlar sınıfında değerlendirilen bazı hibrit otomobillerden dahi daha düşük emisyon düzeyine sahiptir [14].

Depolama gerektirmez, boru hatlarıyla kullanıldığı yere transferi sağlanır. Depo edilmediğinden dolayı patlama riski genel olarak yok denilecek kadar azdır. Tesisatlar da ise basınç düşük olduğundan dolayı patlama esnasında oluşabilecek parça tesiri yoktur. Havadan hafif olması sebebiyle sızıntı anında yükselerek atmosfere karışacağından yangın tehlikesi de oldukça düşüktür. LPG gibi zeminde birikme yapmaz ve olası tehlikelere sebep olmaz. Kömür, fueloil ve diğer fosil yakıtlarda olduğu gibi yanma reaksiyonu sonucunda çevreye; is, kurum, kül gibi partiküler atıklar bırakmaz [14].

3.2. Doğalgazın Kimyasal Yapısı ve Bileşenleri

Doğalgaz; çoğunluğu metan(CH_4), etan(C_2H_6), propan(C_3H_8) gibi hafif moleküler ağırlıklı hidrokarbonlardan oluşan bir karışımdır. Doymuş bir hidrokarbon olan metan, genel anlamda doğalgazın molar olarak %90'lık kısmını oluşturmaktadır. Doğalgaz dünyanın birçok farklı bölgesindeki kaynaklardan çıkarılmaktadır ve her kaynaktan çıkarılan doğalgazın kimyasal bileşenleri aynı oranda değildir.

Tablo 3.1. Bazı Ülkelerde Çıkarılan Doğalgazlara Ait Bileşen Oranları [7].

Ülke	Bileşikler (Hacimsel %)								
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12}	CO_2	N_2	He	H_2S
A.B.D.	73,2	6,1	3,2	1,6	0,6	0,3	14,3	0,7	-
Eski S.S.C.B.	94,8	2,7	0,8	0,4	0,3	0,2	0,8	-	-
Cezayir	79,6	7,4	2,7	1,4	3,6	0,2	5,1	-	-
İran	81,4	11,9	3,4	0,5	0,2	2,1	-	-	0,2
İtalya	99,5	-	0,1	-	-	-	-	0,4	-
İngiliz Kuzey Denizi	83,8	6,0	-	2,0	1,0	1,7	4,5	-	-

Doğalgazı oluşturan hidrokarbonların yanı sıra hekzan türevli parafinler, bütan ve türevleri, pentan ve türevleri, karbondioksit, hidrojen, nitrojen, oksijen gibi bileşenlerde doğalgazın yapısında bulunmaktadır. Her rezerv kaynağından çıkan doğalgazın kimyasal bileşen oranları farklıdır [7]. Dolayısıyla bu bileşenlerin mol yüzdeleri sabit bir değer olarak ifade edilemez, ancak her bileşenin yüzde mol oranı çıkarıldığı rezerv kaynağına ait olan karakteristik analizleri ile sayısal olarak ifade edilirler. Tablo 3.1'de bazı ülkelerde çıkarılan doğalgaza ait bileşen oranları verilmiştir. Tablo3.1'deki verilere göre yüzde molar olarak en yüksek metan oranının İtalya'da çıkarılan doğalgazda olduğu belirtilmiştir.

Union Gas'ın web sitesinden alınan bilgilere göre hazırlanmış olan Tablo 3.2'de doğalgazın bileşenleri ve mol yüzdeleri verilmiştir [8].

Tablo 3.2. Doğalgazın Bileşenleri ve Mol Yüzdeleri

Doğalgazı Oluşturan Bileşenler	Bileşenin Karakteristik Analizi (Mol%)	Bileşenin Maksimum ve Minimum Aralığı (Mol%)
Metan	95.0	87.0 - 97.0
Etan	3.2	1.5 - 7.0
Propan	0.2	0.1 - 1.5
İzo-Bütan	0.03	0.01 - 0.3
n-Bütan	0.03	0.01 - 0.3
İzo-Pentan	0.01	Eser Miktar - 0.04
n-Pentan	0.01	Eser Miktar - 0.04
Hekzan Türevi Parafinler	0.01	Eser Miktar - 0.06
Nitrojen	1.0	0.2 - 5.5
Karbondioksit	0.5	0.1 - 1.0
Oksijen	0.02	0.01 - 0.1
Hidrojen	Eser Miktar	Eser Miktar - 0.02

Doğalgazı oluşturan gaz fazındaki elementlerin hepsi, doğalgazı yanma anlamında destekleyici nitelikte değildir. Dolayısıyla bu gaz elementlerin bazıları doğalgazın yanma gücünü azaltmaktadır. Karbondioksit yanıcı bir gaz değildir, dolayısıyla bu gazın doğalgazı yanma anlamında desteklediği söylenilemez. Karbondioksit, doğalgazın içerisinde çok az miktarda bulunuyor olmasına rağmen bazı kaynaklardan çıkarılırken kuyu çıkışında bir takım kimyasal işlemlerle ayrıştırılır; çünkü bu ayrıştırma işlemi az da olsa, daha yüksek ısı enerjisi açığa çıkarabilecek bir doğalgaz elde etmeyi sağlamaktadır [9].

Doğalgazın kimyasal yapısı kalitesini belirlemektedir. Ve genel anlamda üç sınıfta sınıflandırılmaktadır; ekşi gaz, tatlı gaz, ıslak gazdır. Bazı rezerv kaynaklarından çıkarılan doğalgazlarda hidrojen sülfür(H_2S) rastlanır. Kimyasal bileşeninde hidrojen sülfür ihtiva eden gazlar ekşi gaz olarak tanımlanır. Hidrojen sülfür içermeyen ve rafine gaz olarak kabul edilenler tatlı gaz olarak tanımlanmaktadır. Islak gaz ise yapısında doğal olarak sıvı hidrokarbonlar içeren doğalgazdır. Hidrojen sülfür içeren bir doğalgaz kokusu ile ayrıt edilebilir, çürük yumurta kokusuna benzer rahatsızlık verici bir kokuya sahiptir. Ayrıca rafine niteliğinde olan yani kokusuz doğalgazlara da sülfür ihtiva eden bileşenler eklenerek koku kazandırılır ve bu koku vasıtasıyla kaçakların fark edilmesi sağlanır. Aynı zamanda zehirleyici ve korozif niteliklere sahip olan hidrojen sülfür kimyasal muamele ile doğalgazdan uzaklaştırılır. Bu ayrıştırma işlemleri ile de önemli miktarda sülfür elementi

elde edilir. Hidrojen sülfür içeren doğalgaz, rafine doğalgaza göre önemli oranda daha az metan içermektedir [8,10].

Tablo 3.3. Türkiye’de Kullanılan Doğalgazın Garanti Edilen ve Fiili Özellikleri [7].

Bileşikler	CH ₄ (min.)	C ₂ H ₆ (mak.)	C ₃ H ₈ (mak.)	C ₄ H ₁₀ (mak.)	C ₅ H ₁₂ (mak.)	CO ₂ (mak.)	N ₂ (mak.)	O ₂ (mak.)
Garanti Edilen Değerler (Hacimsel %)	85	7	3	2	1	3	2,6	0,002
Fiili Değerler (Hacimsel %)	98,86	0,211	0,043	0,017	0,033	0,0350	0,829	-
Üst Isıl Değer, Maksimum =39190 kJ/m ³ Üst Isıl Değer, Ortalama =37680 kJ/m ³ Üst Isıl Değer, Minimum =36636 kJ/m ³ Yoğunluk= $\rho = 0,74 \text{ kg/m}^3$ (m ³ , 15°C sıcaklık ve 1013 mbar mutlak basınçtaki 1 m ³ gazın hacmine tekabül eder.)								

Tablo 3.3’te, Türkiye’de kullanılan doğalgazın garanti edilen bileşen oranları ve fiili değerleri verilmiştir.

3.3. Doğalgazın Rezerv Kaynakları

2015 yılına ilişkin verilere göre, dünya doğalgaz rezervleri % 0,5’lik bir azalma ile 186,9 trilyon m³ olarak belirlenmiştir. Dünya doğalgaz rezervlerine bakıldığında; % 42,9’u Orta Doğu’da, % 28,7’si Avrasya’da, % 8,4’ü Asya-Pasifikte, %7,5 Afrika’da % 6,9’u Kuzey Amerika’da, %4,1 Orta ve Güney Amerika’da, %1,5 Avrupa’da, bulunmaktadır. OECD ülkelerinin doğalgaz rezervi 19,6 trilyon m³ olup toplam rezervin % 10,5’ini oluşturmaktadır [12].

Genel olarak doğalgaz rezerv keşfi oranında bir azalma dikkat çekmektedir. Fakat bu azalma petrol rezervi keşiflerindeki kadar çarpıcı değildir. 2011 yılından itibaren gerçekleşen keşiflerin arasında doğalgazın oranı %51 ile %76 arasındadır. En yüksek oran olan %76, 2015 yılında gerçekleşmiştir [12].

3.4. Dünyadaki Doğalgaz Rezervinin Ömrü

2015 yılı için mevcut rezerv miktarı (186,9 trilyon m³), yıllık mevcut üretime (3,54 trilyon m³) bölüldüğünde, küresel rezerv ömrünün 52,8 yıl olduğu hesaplanmaktadır [12]. Daha önce petrol rezervlerinin ömrüne ilişkin yapılan değerlendirmelerin, doğalgaz rezerv ömürleri için de aynı şekilde dikkate alınmasında yarar olduğu düşünülmektedir. Çünkü veriler varlığı bilinen rezervler için geçerlidir, bunların yanı sıra varlığı tespit edilmemiş rezervlerin var olduğu da mutlak bir değerdir.

3.5. Dünyada ve Türkiye’de Doğalgaz Depolama Faaliyetleri

2015 yılının sonunda dünya doğalgaz depolama kapasitesi 413 milyar m³ olarak kaydedilmiştir. İlgili kapasiteyi oluşturan depolama tesislerinin büyük çoğunluğu eski petrol ve doğalgaz sahalarından depolamaya elverişli olanlardır. Önümüzdeki dönemde gelişmekte olan Asya ülkeleri ve Orta Doğu’da da doğalgaz depolama kapasitesinin artması beklenmektedir. Cedigaz verilerine göre 2035 yılına kadar, LNG ticaretinin doğalgaz ticaretinin yarısından fazlasını oluşturacağı beklenmektedir [12,52].

Doğalgaz ithal eden ülkeler; olası durumlarda oluşacak doğalgaz taleplerini karşılayabilmek ve çeşitli dönemlerde oluşabilecek talep esnekliklerini absorbe edebilmek amacıyla kaynak çeşidini artırma yoluna gitmektedir. Türkiye’de de bu amaçlar doğrultusunda Marmara Ereğlisi’nde LNG İthal Terminali yapılmıştır. 1994 yılında işletmeye alınan terminalin sürekli enjeksiyon kapasitesi 685.000 m³/saattir [52].

Doğalgazın yaygın olarak kullanılan bir diğer formu CNG’dir. Bu form doğalgazın sıkıştırılmış formudur. Sıkıştırılmış formdaki doğalgazın depolanma faaliyetlerine tesis bazında fazla rastlanılmamaktadır. Çünkü birim hacime depolanan sıvılaştırılmış doğalgazın enerji yoğunluğu, aynı birim hacime depolanan sıkıştırılmış doğalgazın enerji yoğunluğundan daha fazladır. Dolayısıyla aynı birim hacimde daha fazla enerji ihtiva eden LNG’nin depolanması, CNG’nin depolanmasından çok daha avantajlıdır. Öte taraftan bakıldığında CNG’nin depolanmasına gerek yoktur çünkü boru hatlarından gelen doğalgaz sıkıştırma ünitesinde doğrudan sıkıştırılıp küçük hacimli kullanım depolarına basılmaktadır. Görüldüğü gibi CNG’nin depo edilmesi küçük hacimli depolarda uygulama alanı bulmaktadır. LNG sıvı fazında, CNG gaz fazında bir doğalgaz formudur; LNG tesis

bazında depo edilirken, CNG'nin tesis bazında depo edilmesini daha avantajlı kılan sebeptir.

3.6. Doğalgazın Taşıt Motorlarında Kullanılması

Ülkemizin enerji ihtiyacının büyük bir bölümü, fosil yakıtlar grubunun en önemli üç türü olan; petrol türevli yakıtlar (benzin, motorin, LPG, gaz yağı, jet yakıtı, fuel-oil ve benzerleri), kömür ve doğalgaz gibi enerji kaynaklarından karşılanmaktadır. Ülkemizdeki motorlu taşıtların büyük çoğunluğunda güç üretme sistemi olarak içten yanmalı motorlar kullanılmaktadır. Bu içten yanmalı motorların büyük çoğunluğunda petrol türevli yakıtlar kullanılmaktadır. Dolayısıyla enerji ihtiyacının karşılanması ve motorlu taşıtların kullanılması petrole bağımlıdır. Bu bağımlılığı azaltmak suretiyle canlıların çevreyle olan dengesinin korunması ve var olan petrol rezervlerinin daha verimli kullanılabilmesi için alternatif enerji kaynaklarına yönelim bir gereksinim haline gelmiştir [7,13].

Plastik esaslı malzemelerin hammaddesinin petrol olduğu bilinmektedir. Yine sanayide kullanılan çeşitli yağların petrol esaslı üretildiği bilinmektedir. Dolayısıyla petrolün sadece yakıt olarak değil aynı zamanda bir endüstriyel gereksinim olduğu da göz ardı edilmemelidir. Bu ve benzeri sebeplerden dolayı, petrol rezervleri verimli kullanılmalıdır.

Otomotiv sektörünün hızla gelişmesi ve yeni enerji kaynaklarının kullanıldığı taşıt motorlarının gündeme gelmesi alternatif enerji kaynakları arayışının hızlandırmıştır. CNG (sıkıştırılmış doğalgaz) 'nin kolay bulunması, ekonomik olması, geleneksel yakıtlara göre egzoz emisyonlarının düşük olması ve oktan sayılarının yüksek olması nedeniyle içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımı son yıllarda oldukça cazip hale gelmiştir. Gelişmiş birçok ülkede taşıt motorlarında CNG alternatif yakıt olarak yaygın bir vaziyette kullanılmaktadır. CNG'nin yaygın olarak kullanıldığı başlıca ülkeler; Arjantin, İtalya, Pakistan, Brezilya, ABD, Ukrayna, Mısır, Çin, Venezuela, Almanya, Kanada, Hindistan, Rusya olarak gösterilebilir. Diğer ülkelerde ise kullanımların gün geçtikçe yaygınlaştığı görülmektedir [13,14,15].

Benzine alternatif sayılan günümüz yakıtları; sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) sıkıştırılmış doğalgaz (CNG), sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG), metanol, etanol, hidrojen dir. Metanol ve etanol günümüzde yaygın olarak uygulama bulamamaktadır. Hidrojen yakıtı konusunda, günümüzde birçok çalışma yapıldığı bilinmektedir. Fakat sıvılaştırılmış petrol

gazı ve sıkıştırılmış doğalgaz, günümüzde motorlu taşıtlarda kullanılan ve gelecekte de uzun bir süre kullanılması ön görülen başlıca alternatif kaynaklardır.

CNG ve LPG'nin çevreye daha az zarar vermesinden dolayı birçok Avrupa ülkesinde taşıt kullanıcılarını dönüşüm sistemlerine teşvik edici çalışmalar ve uygulamalar yapılmaktadır. Çünkü canlı sağlığının daha da önem kazanmış olduğu günümüzde emisyon gazlarının zararlarıyla mücadele gün geçtikçe hız kazanmaktadır. Ülkemizde de hava kirliliğinin insan sağlığı üzerindeki zararlarını araştıran birçok çalışma yapılmakta ve yapılan çalışmalarda motorlu taşıtların egzoz gazlarının, insan sağlığına büyük ölçüde zarar verdiği ortaya konulmaktadır. Ülkemizdeki taşıtlarda yaygın olarak kullanılan iki geleneksel yakıt benzin ve motorindir. Benzinin ve motorinin yakıldığında önemli oranda partikül madde açığa çıkardığı bilinmektedir. Partikül maddelerin fiziksel yapısı ve kimyasal kompozisyonu, canlı sağlığı açısından oldukça risklidir. Birçok farklı bileşenden oluşmuş olan partikül maddeler akciğerdeki nemle birleşerek aside dönüşmektedir. Partikül maddelerde bulunan bazı bileşenler akciğere kadar ulaşır, kanın içindeki karbon dioksitin oksijene dönüşmesini yavaşlatmakta, bu da nefes darlığına sebep olmaktadır. Partikül maddelerin sağlık üzerine etkileri akut olanlardan daha çok kroniktir. Benzin ve motorin gibi yanma sonucu yüksek oranda partikül madde açığa çıkaran yakıtların yerine doğalgaz kullanılmasıyla partikül madde emisyonunda %90'ların üzerinde bir azalma sağlanacağı bilinmektedir. Yine azot oksit emisyonlarının en önemli kaynağının motorlu taşıtlardan salınan egzoz gazları olduğu bilinmektedir ve bu gazlar atmosferin doğal çevrimine girerek, nitrik asit (HNO_3) oluşumuyla sonuçlanan zincirleme reaksiyonları tamamlarlar. Azot oksitlerin atmosferdeki derişimine bağlı olarak; uzun süre maruz kalındığında, akciğerlerde birçok etkisi olduğu ve akciğer dokusunda yapısal değişikliklere yol açabildiği saptanmıştır. Ülkemizde, motorlu taşıtlarda çoğunlukla kullanılan motorin ve benzinin yerine doğalgaz yakıtının kullanılması halinde; solunum sistemine önemli oranda zarar veren azot oksit (NO_x) emisyonlarının %90 seviyelerinde azalacağı bilinmektedir [16,17].

Yine aynı şekilde otomotiv ana sanayi üreticileri daha az emisyon salınımı yapan motorlar geliştirmek için yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde bulunmaktadır. Egzoz emisyonları için uygulanan EURO normları örnek olarak gösterilebilir. Bazı ülkelerde LPG kullanımını teşvik edici kararlar alınmaktadır. Oysa CNG'nin emisyon salınımı LPG'nin emisyon salınımına oranla daha düşüktür. LPG için verilen teşviklerin

CNG içinde verilmesi durumunda, CNG çok daha yaygın ve tercih edilen yakıt halini alacaktır. İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak doğalgazın kullanılması durumunda; azaltılması için yoğun çalışmalar yapılan, doğaya ve canlılara zarar veren egzoz emisyonlarından doğan birçok problemin ortadan kalkacağı öngörülmektedir [16].

Türkiye, dünyanın en büyük doğalgaz kaynaklarının çoğuna boru hatları ile bağlıdır. Bu açıdan doğalgazın arz güvenliği yüksektir.

Günümüzde doğalgazı yakıt olarak kullanan birçok taşıt üretilmekte ve taşıt üreticilerinin bu konuda yapmış olduğu yoğun Ar-Ge çalışmaları her geçen gün artmaktadır. Günümüzde doğalgazı yakıt olarak kullanan taşıtlara; otomobiller, hafif ticari araçlar, otobüsler, kamyonlar, çekiciler, temizlik araçları, tekneler, feribotlar, deniz taksileri, motosikletler, apron araçları, iş makinaları, trenler, helikopterler, uçaklar, tanklar, roket arabalar örnek gösterilebilmektedir [9,18].

3.7. Doğalgaz'ın Taşıtlarda Kullanımı ve Formları

Doğalgazın taşıtlarda kullanımı 1930'lu yıllara dayanmaktadır. Ancak o yıllarda sürekli olarak hazırda bulunmaması ve kolay nakil edilememesi sebebiyle son yıllara kadar alternatif bir enerji kaynağı olarak görülemediği. Çünkü motorlu taşıtlarda bir yakıt olarak kullanılması pek olası değildi, o yıllarda ancak sabit tesis motorlarında kullanılabilmekteydi. Dünyada petrol türevli yakıtların rezervlerinin azalıyor olması, petrol türevli yakıtların yanması sonucunda salınan zararlı egzoz gazlarının çevreye ve canlılara zarar veriyor olması, petrol türevli yakıtların ekonomik olmaması sebebiyle otomotiv sektöründe alternatif yakıt arayışına gidilmiştir. Gaz fazında olan yakıtların; hava-yakıt karışımının oluşturulması, dağıtımı, ateşlenmesi, yanmanın kontrolünde zorluk göstermemeleri ve emisyon değerlerinin düşük olması nedeniyle gaz fazındaki yakıtlar ideal birer alternatif yakıt olarak bilinmektedir. Gelinek teknoloji ile doğalgazın iletim borularıyla dünyanın neredeyse her yerine nakledilebilir hal kazanmasıyla birlikte; kolay ulaşılabilir, daima temin edilebilir olmasının yanı sıra düşük egzoz emisyon salınımları ve ekonomik olması sebebiyle önem kazanmıştır. Ayrıca doğalgazın önem kazanmasındaki bir diğer etkende dolun istasyonu bazında depolama gereksiniminden doğacak güçlükleri barındırmamasıydı. Dünya genelinde doğalgazla çalışan taşıtların sayısı; günümüzde on milyonlarla ifade edilirken, doğalgazın yaygın kullanımının ilerleyen yıllarda daha fazla ivme kazanarak artması öngörülmektedir [13,19,20].

Doğalgazın taşıtlarda kullanıldığı ilk örneklere bakıldığında, depolama zorlukları görülmektedir. Sıkıştırılmadan, atmosfer basıncında depolanarak kullanılmıştır. Dolayısıyla birim hacimde daha az enerji depolanmıştır. Sıkıştırılmadan depolanan doğalgazla, taşıtın yapacağı menzil kısa olduğundan dolayı; sadece kısa mesafelerde kullanılma zorunluluğu ile karşılaşmıştır. Şekil 3.2’de doğalgazla çalışan ilk taşıtlardan bir örnek gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Doğalgazlı İlk Araçlardan Bir Örnek [20].

Doğalgaz, günümüzdeki taşıtlarda iki farklı formda kullanılmaktadır; buradaki formdan kasıt depolanma şeklidir. Çünkü doğalgazın hacimsel bazdaki enerjisi düşüktür, bundan dolayı sıkıştırılarak birim hacimde daha fazla doğalgaz sığdırılmak suretiyle depolanır. Bu da iki farklı metot ile yapılır; ya belirli basınç altında sıkıştırılarak gaz fazında depo edilir ya da belirli sıcaklığa kadar soğutulularak sıvı faza geçirilir ve sıvı fazda depo edilir.

3.7.1. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (LNG)

Atmosfer basıncında olan doğalgaz, -162°C 'a kadar soğutulduğunda yoğunlaşarak sıvı faza geçmektedir. Doğalgazın bu sıvı fazdaki formu, sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG-Liquified Natural Gas) olarak adlandırılmaktadır. LNG, kokusuz, renksiz ve zehirli

olmayan, sıvı fazda bir yakıttır. Sıvılaştırılmış doğalgaz yine sıvı fazındaki haliyle taşınmakta ve depolanmaktadır. Tüketime hem gaz fazında hem de sıvı fazında sunulabilmektedir. Fakat kullanılırken, depolama basıncında kullanılmaz; basıncı düşürülerek kullanılır. LNG ile hacimsel olarak yüksek miktardaki doğalgaz, basınç altında hacmi yaklaşık 600 kez küçültülerek sıvı halde depolanabilmektedir. Bu özellik, doğalgazın boru hatlarıyla taşınmasının teknik ve ekonomik anlamda mümkün olmadığı yerlere, gemi, kamyon ve tankerlerle nakliyesini uygun hale getirmektedir [9,22].

3.7.2. Sıkıştırılmış Doğalgaz (CNG)

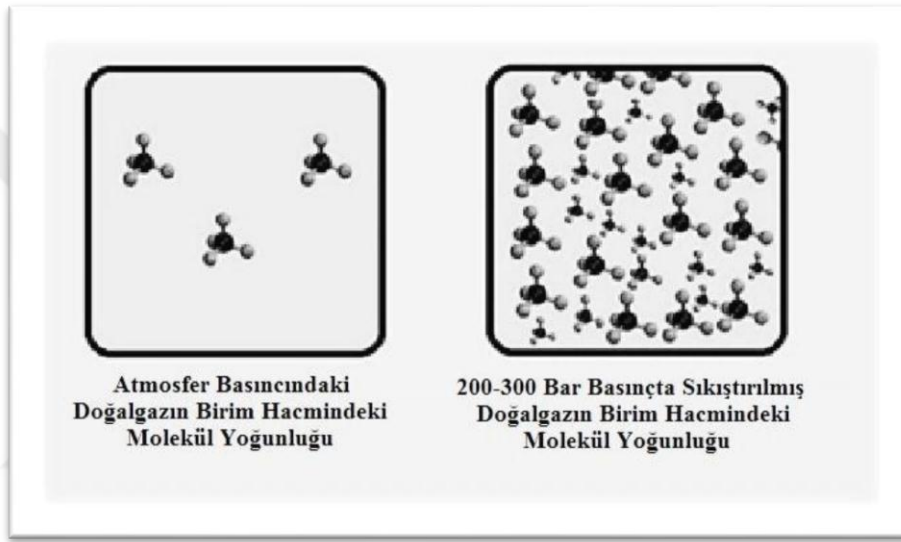
Doğalgazın, yaklaşık 200-250 bar basınç altında sıkıştırılmasıyla elde edilen formudur. CNG, gaz formundadır; doğalgazdan tek farkı sıkıştırılmış olmasıdır. Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG-Compressed Natural Gas)olarak adlandırılmaktadır. Literatürde genel olarak doğalgazın 200 bar basınç altında ve 15°C’de sıkıştırılmış halinin CNG olarak adlandırıldığı yer almaktadır. İletim şebekesi sisteminden gaz olarak temin edilir ya da LNG terminallerinden sıvılaştırılmış doğalgazın gaz formuna dönüştürmesiyle tedarik edilir ve sıkıştırılarak CNG formuna getirilir. Ayrıca kokusuz, renksiz ve zehirli olmayan gaz fazında bir yakıttır. Yüksek basınç altında gaz fazında taşınmakta ve depolanmaktadır. Basıncının düşürülmesiyle yine gaz fazında tüketime sunulmaktadır. Burada basıncın yükseltilerek depo edilmesinin amacı birim hacimde daha fazla doğalgaz depo edebilmektir [9,23,24]. CNG sistemleri ve regülatörleri genellikle maksimum 300 bar basınç dayanımında imal edilmektedir. Dolayısıyla CNG’nin üst sıkıştırma limitinin 300 bar basınçta olduğu söylenebilir.

15° sıcaklık şartlarında, 200-300 bar basınç altında sıkıştırılmış 1 birim hacim CNG; yine 15°C sıcaklık şartında atmosfer basıncına kadar genişletildiğinde, takriben 200-300 birim hacim doğalgaz elde edilir. Sıcaklık, sıkıştırma basıncını etkilemektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte hacim genişlemesi meydana gelmesi beklenir, fakat depolar sabit hacimli olduğundan dolayı sıkıştırılmış doğalgaz hacimsel olarak genişleyemez ve sıkıştırma basıncı artar. Dolayısıyla mevsimsel şartlar da CNG’nin sıkıştırma basıncını etkilemektedir.

4. SIKIŞTIRILMIŞ DOĞALGAZ (CNG)

4.1. CNG'nin Tanımlanması, Nicelikleri ve Nitelikleri

Birim hacimdeki enerji yoğunluğu artırılmak üzere 200-250 bar basınç aralığında sıkıştırılmış doğalgaz, CNG olarak isimlendirilir ve yine bu basınç altında depolanır. Atmosfer basıncındaki doğalgaz ile sıkıştırılmış doğalgazın molekül yoğunlukları Şekil 4.1'de temsili olarak modellenmiştir.



Şekil 4.1. Doğalgazın ve Sıkıştırılmış Doğalgazın (CNG) Molekül Yoğunluklarının Temsili Olarak Modellenmesi

Tablo 4.1. CNG Yakıtının Karakteristiği [26].

CNG Yakıtının Karakteristiği	Değeri
Atmosferik Basıncındaki Yoğunluğu (kg/m^3)	0.68
Hava ile Birlikte Yanabilirlik Limiti (%)	4 – 14
Oktan Değeri	130
Havada Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	700
Atmosfer Basıncında Kaynama Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	-162
Kütlesel Hava/Yakıt Oranı	17.24
Sürtünme ile Kimyasal Reaksiyon Verebilirliği	Vermez
Depolama Basıncı (MPa)	20.6
Hava-Yakıt Karışım Kalitesi	İyi
CO-HC-NO _x Emisyon Atığı Düzeyi	Çok Düşük
Alev Hızı (m/s)	0.63

Sıkıştırılmış doğalgazın karakteristik özellikleri Tablo 4.1’de verilmiştir. Bu tablolarda verilen sayısal veriler; sabit olmamakla birlikte, doğalgazın kimyasal yapısını oluşturan bileşenlere göre değişiklik gösterebilir. CNG’nin sıkıştırılmamış haldeki temel formu olan doğalgazın yoğunluğu genellikle 0,68-0,75 (kg/m³) civarlarındadır. 20°C sıcaklıktaki, 200 bar basınçla sıkıştırılmış doğalgazın yoğunluğu çoğunlukla 176 (kg/m³) civarlarındadır. Hava ile yanabilmesi için karışımın birim hacminde belirli limit aralığında doğalgaz olması gerekir. Bu limit aralığı, çoğunlukla %4 ile %15 arasındadır. Oktan değeri bileşen oranlarına bağlı olarak değişmekle birlikte benzine oranla daha yüksektir. Havada kendiliğinden tutuşma sıcaklığı genel olarak 680-730°C aralığındadır. Soğutulursa sıvı faza geçmektedir ve -162°C kaynama noktasıdır, kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklarda gaz fazındadır. Kütlesel hava/yakıt oranı çoğunlukla 15.8:1 ile 17.2:1 aralığındadır. Doğalgaz genellikle 200-240 bar basınç altında sıkıştırılarak CNG formuna getirilir ve depolanır. Isıl değeri, benzinden daha yüksektir.

Tablo 4.2. CNG Yakıtının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri [27].

CNG Yakıtının Özellikleri	Değeri
Yoğunluk (kg/m ³)	0.72
Tutuşma Limitleri (Hava içinde % hacmi)	4.3 – 15
Tutuşma Limitleri (Ø)	0.4 – 1.6
Havada Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı (°C)	723
Minimum Yanma Enerjisi (MJ)	0.28
Alev Hızı (m/s)	0.38
Adyabatik Alev Sıcaklığı (°K)	2214
Söndürme Mesafesi (mm)	2.1
Stokiyometrik Yakıt/Hava Karışım Oranı	0.069
Stokiyometrik Hacim Kesri (%)	9.48
En Düşük Isıl Değeri (MJ/kg)	45.8
Yanma Isısı (MJ/kg _{hava})	2.9

Tablo 4.2’de sıkıştırılmış doğalgazın fiziksel ve kimyasal özellikleri verilmiştir. Bu veriler sabit olmamakla birlikte, doğalgazı oluşturan bileşenlerin kompozisyon oranlarına göre değişim göstermektedir.

4.2. Sıkıştırılmış Doğalgaz Kullanımında Güvenlik

CNG'li araçların yakıt depoları, benzinli araçların yakıt depolarına göre fiziksel zararlara daha mukavim ve tank yapımında kullanılan kompozit maddeler nedeniyle kimyasal etkilere karşı da korunaklı yapıdadırlar [24].

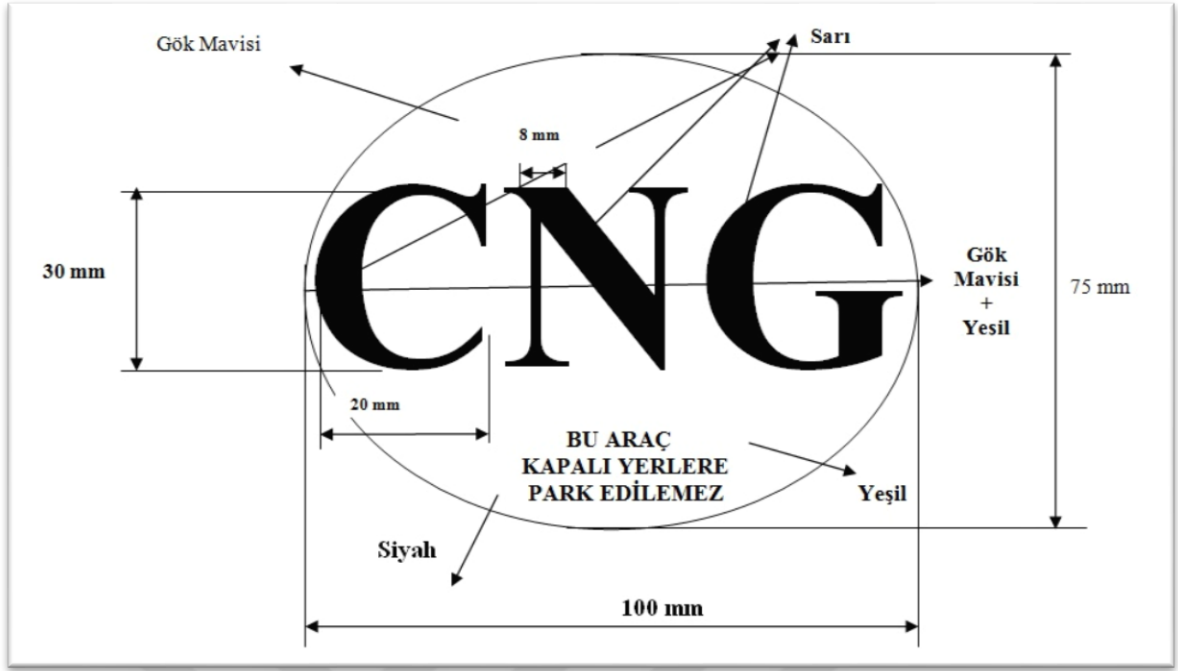
Benzinin tutuşma sıcaklığı 228-471°C iken CNG'nin tutuşma sıcaklığı 540-650 °C'dir. Benzine göre, yüksek tutuşma sıcaklığı nedeniyle güvenlik açısından avantaj sağlamaktadır. Fiziksel özellikleri itibariyle doğalgaz daha zor tutuşmaktadır [8,29,48].

Doğalgazın yakıt dolun ve kullanım süreçlerinde buharlaşma oranının çok düşük, hatta sıfıra yakın olması gazın sızma ihtimalini ortadan kaldırmaktadır. Depo tankının delinmesi durumunda; doğalgaz, havadan hafif bir gaz olması nedeniyle zeminde birikmez, patlayıcı, yanıcı veya zehirleyici bir ortam oluşturmaz. Ayrıca serbest haldeki hava ile %4 –%15 arasında hacimsel bir karışım oluşmadan doğalgazın tutuşması veya patlaması mümkün değildir. Yüksek tutuşma sıcaklığı ve düşük yanma aralığı nedeniyle doğalgaz diğer sıvı yakıtlarla karşılaştırıldığında kaza anında güvenlik açısından en güvenilir yakıttır [24,32,34,36].

4.3. CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Motorlu Taşıtlardaki Emniyet Unsurları

CNG yakıt dönüşüm sistemlerinin imalat, montaj ve kullanım proseslerinde uyulması zorunlu olan bir takım kurallar ve uygulamalar bulunmaktadır. Bunlar maddeler halinde sıralanırsa:

- Doğalgaz montajında kullanılan elemanların ECER-67-01 ve TSE standartlarına uygun olmalıdır.
- Doğalgaz tankın üzerinde bulunan multivalfin, tankın %80'e kadar doldurulmasına izin verecek şekilde ayarı yapılmamıştır.
- Doğalgaz iletim boruları, 1mm kalınlığında çelik boru ve üzeri PVC ile kaplı olmalıdır.
- Doğalgazlı araçlar kapalı alanlara park edilmemelidir.
- Eğer taşıt uzun süre kullanılmayacaksa; depo üzerinde bulunan multivalfin giriş ve çıkış vanaları kapatılmalıdır.
- Taşıtın CNG'li olduğunu belirten uyarıcı etiketler mutlaka aracın ön ve arka camına yapıştırılmalıdır [9,49,50]. CNG'li Taşıt Uyarı Etiketi Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. CNG'li Taşıt Uyarı Etiketi [50].

4.4. Sıkıştırılmış Doğalgaz (CNG) Dönüşümünün Avantaj ve Dezavantajları

4.4.1. Avantajları

- Sıkıştırılmış doğalgazın atmosfer basıncı altındaki normu olan doğalgaz doğadan çıkarıldığı gibi kullanılabilir, diğer yakıtlar gibi işlenmesine gerek yoktur dolayısıyla CNG yakıtının maliyeti ucuzdur.
- Diğer yakıtlar gibi karayolu veya denizyolu taşımacılığı gibi lojistik yöntemleriyle taşınmayıp boru hatlarıyla nakledildiği için; CNG yakıtının lojistik masrafı yoktur.
- Lojistik metotlarıyla taşınmadığı için nakli sırasında, nakli yapan taşıtların doğaya salacağı zararlı egzoz emisyonları yoktur. Ayrıca lojistik metotlarla taşınmadığından dolayı olası kazalarda yakıtın dökülüp çevreyi kirletmesi veya doğa facialarına neden olması gibi bir durum söz konusu değildir. Nakillerinde olası bir sızıntı olması halinde; havadan daha düşük yoğunluğundan dolayı yükselerek derhal ortamı terk eder.
- CNG yakıtı kullanan taşıtlar; egzozlarından, partikül salımını yapmadığı için canlı sağlığını tehdit etmezler.

- Taşıtın periyodik bakım zamanını uzatmaktadır [35].
- Motorun gürültü seviyesini azaltmaktadır.
- Sıkıştırılmış doğalgaz; gaz fazında bir yakıt olup, yapısında kirletici maddeleri içermediği için ve yağlama yağına karışmadığı için yağ ömrünü uzamaktadır. Ayrıca yağlama performansını artırır.
- Yanma sonunda artık bırakmadığı için bujilerin ömrünün, normal ömrünün 2 katı kadar artmasını sağlamaktadır.
- Hacimsel tüketim oranı olarak benzinden daha tasarrufludur.
- Birim fiyatı bazında değerlendirildiğinde, benzine oranla çok daha ucuz bir yakıttır.
- Silindir, piston, supap yüzeylerinde ve yanma odasında is, kurum veya karbon artıkları bırakmaz.
- Egzoz sistemi daha uzun ömürlü olur.
- Güvenli ve temiz bir yakıttır. Herhangi bir kaza anında havadan hafif olduğu için çabucak dağılır, zeminde birikme yapmaz. Kaçak anında tutuşma veya patlamaya neden olma ihtimali çok düşüktür; diğer yakıtlardan farklı olarak havada sadece sınırlı derişim aralığında (%4 – %16) yanabilir.
- Egzoz emisyonları, diğer yakıtlara göre önemli oranda düşüktür.

4.4.2. Dezavantajları

- Dolum istasyonları yaygın değildir ve istasyonların kurulum maliyetleri yüksektir.
- Büyük hacimli yakıt tüpleri fazla yer kaplar ve taşıtın bagaj hacmini küçültür.
- Dönüşüm için taşıtlarda ekstra maliyet oluşturur.
- Motor performansının azalmasına neden olur.
- Hem depolama hem de düşük enerji yoğunluğundan dolayı benzin ve motorin ile aynı depolama hacmine sahip sıkıştırılmış doğalgaz kullanılan taşıtların kat edebilecekleri menzil daha azdır.
- Kapalı alanlara, kapalı otopark sınıfında olan katlı ve yer altı otoparklarına; CNG'li taşıtların park etmesi bazı Avrupa ülkelerinde serbest iken bu durum ülkemizde yasaklanmıştır [49,51].

5. SIKIŞTIRILMIŞ DOĞALGAZ'IN MODELLENMESİ VE YANMASI

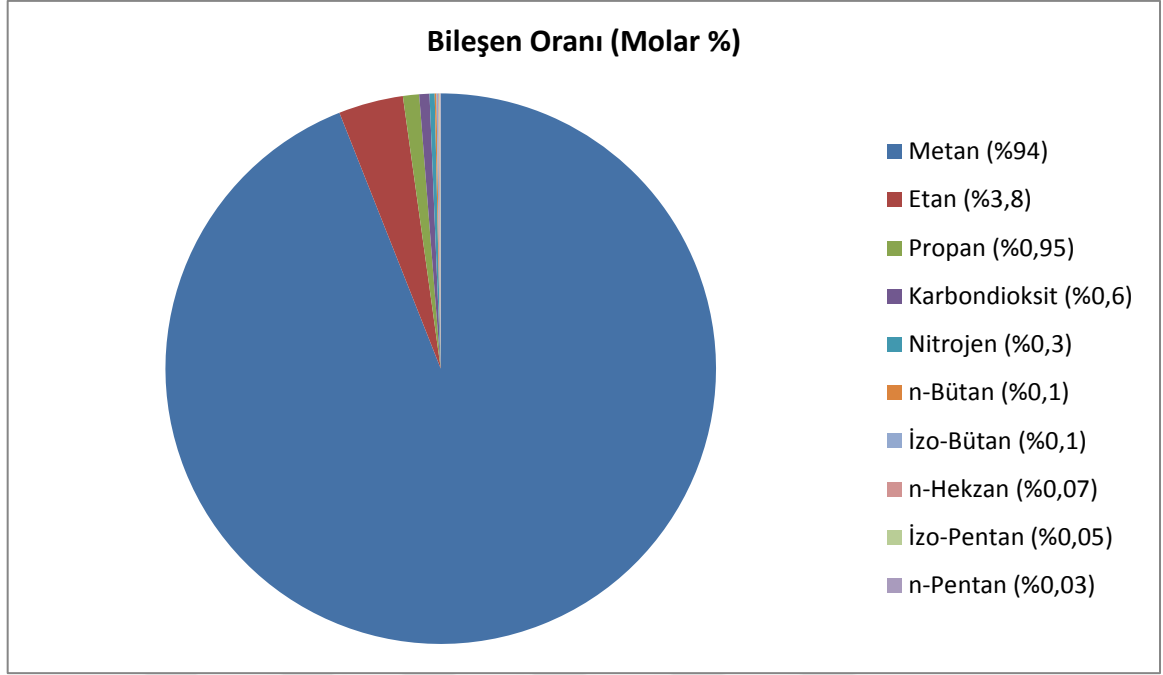
5.1. Sıkıştırılmış Doğalgazın Modellenmesi

Sıkıştırıldığı basınç, sıcaklık ve karışım bileşenlerine ait molar yüzdeleri belirleyerek bir doğalgaz kompozisyonu oluşturulmuştur. Bu vasıta ile verilen değere göre, belirlenen CNG kompozisyonunun; yoğunluğu, molar kütlesi, molar hacmi, sıkıştırma faktörü, basınç-yoğunluk diyagramı, kompozisyondaki bileşen oranlarının grafiği tespit edilmiştir. Ayrıca modellenmesi yapılan sıkıştırılmış doğalgazın ideal yanma denklemi oluşturulmuştur. Modellemeye esas olan veriler, Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Modellenen Sıkıştırılmış Doğalgazın Kompozisyonu ve Modelleme Koşulları

<i>Modelleme Koşulları</i>	<i>CNG Bileşen Kompozisyonu</i>		
	Bileşen Adı	Bileşen	Bileşen
Basınç = 200 bar = 20 MPa Sıcaklık = 15°C	Metan	CH ₄	94%
	Etan	C ₂ H ₆	3.8 %
	Propan	C ₃ H ₈	0.95 %
	Karbondioksit	CO ₂	0.6 %
	Nitrojen	N ₂	0.3 %
	n-Bütan	C ₄ H ₁₀	0.1 %
	İzo-Bütan	C ₄ H ₁₀	0.1 %
	n-Hekzan	C ₆ H ₁₄	0.07 %
	İzo-Pentan	C ₅ H ₁₂	0.05 %
	n-Pentan	C ₅ H ₁₂	0.03 %

Şekil 5.1'de modellenmesi yapılan sıkıştırılmış doğalgaza ait bileşenler oranları % molar olarak grafik halinde gösterilmiştir.



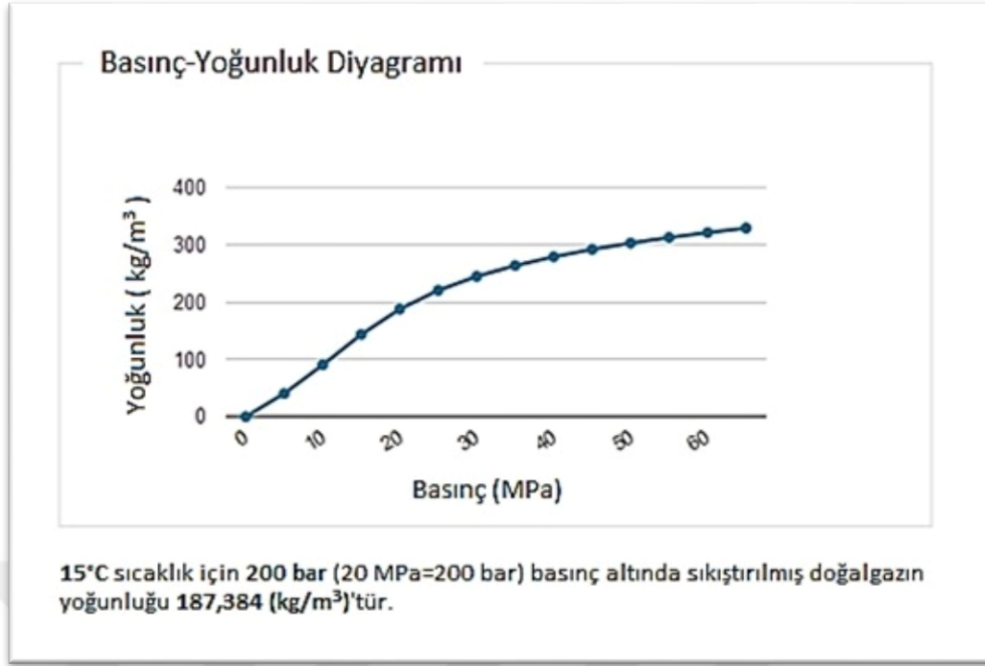
Şekil 5.1. Modellenen Doğalgazın Bileşen Oranlarının Grafiksiz Gösterimi

Kompozisyon yapısı oluşturulmak üzere bileşen oranları belirlenerek modellemesi yapılan doğalgaza ait özellikler tablo 5.2’de gösterilmektedir.

Tablo 5.2. Modellenen Sıkıştırılmış Doğalgazın Nicel Özellikleri

Nicel Özellikler ve Değerleri	
Sıcaklık (°C)	15
Basınç (MPa)	20
Yoğunluk ^a (kg/m ³)	187.384
Sıkıştırma Faktörü ^a (-)	0.7673
Molar Kütle ^b (kg/kmol)	17.2244
Molar Hacim ^a (kmol/m ³)	10.87898
a.) Yoğunluk, sıkıştırma faktörü ve molar hacim; 20 MPa basınç ve 15°C sıcaklık şartları için verilmiştir.	
b.) Molar kütle, sabittir; sıkıştırma basıncına ve sıcaklığa bağlı olarak değişmemektedir.	

Modellemesi yapılan sıkıştırılmış doğalgazın basınca bağlı yoğunluğundaki değişimi gösteren; Basınç-yoğunluk diyagramı, Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Modellenen Doğalgazın Basınç-Yoğunluk Diyagramı

Dolayısıyla bu modellemeden elde edilen sonuçlara göre denklem 5.1, denklem 5.2 ve denklem 5.3'te verildiği gibi;

$$\rho_{CNG,15^{\circ}C,200 \text{ bar}} = 187,384 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (5.1)$$

$$(1000 \text{ lt})_{CNG,15^{\circ}C,200 \text{ bar}} = (187,384 \text{ kg})_{CNG,15^{\circ}C,200 \text{ bar}} \quad (5.2)$$

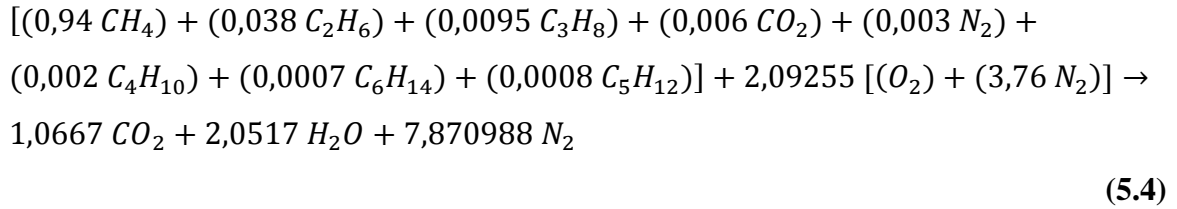
$$(1 \text{ kg})_{CNG,15^{\circ}C,200 \text{ bar}} = (5,336 \text{ lt})_{CNG,15^{\circ}C,200 \text{ bar}} \quad (5.3)$$

15°C sıcaklıkta ve 200 bar basınç altında sıkıştırılmış doğalgazın; 1 kilogramı, 5,336 litredir.

Bu modellemenin hazırlanmasında unitrove.com web sitesinden yararlanılmıştır ve AGA8-92DC detaylı karakterizasyon denklemi kullanılarak doğalgazın yoğunluğu hesaplanmıştır [28].

5.2. Modellemesi Yapılan Sıkıştırılmış Doğalgaz Yakıtının Yanması

Havanın; 1 mol O_2 ile 3,76 mol N_2 'nin bileşiminden oluştuğunun kabul edilirse; modellemesi yapılan doğalgazın karışımındaki bileşen değerlerine istinaden; teorik tam yanma denklemi, denklem 5.4'te verilmiştir.



Tam yanma için gerekli olan teorik havanın mol miktarı, denklem 5.5'te verilmiştir.

$$2,0925 O_2 + 7,8679 N_2 = 9,9604 \text{ kmol}_{Hava} \quad (5.5)$$

Teorik tam yanma için, Hava-Yakıt Molar oranı, denklem 5.6'da verilmiştir.

$$AFR_{Teorik} = \frac{n_{Hava}}{n_{Yakit}} = \frac{9,9604 \text{ kmol}}{1 \text{ kmol}} = 9,9604 : 1 \quad (5.6)$$

Modellemeye göre doğalgazın molar kütle, denklem 5.7'de verilmiştir.

$$m_{Doğalgaz} = 17,2244 \text{ kg/kmol} \quad (5.7)$$

Havanın molar kütle, denklem 5.8'de hesaplanmıştır.

$$m_{hava} = \frac{(n_{O_2} * m_{O_2}) + 3,76(n_{N_2} * m_{N_2})}{n_{O_2} + 3,76(n_{N_2})} = \frac{(2 * 15,9994) + 3,76(2 * 14,0067)}{2 + 3,76(2)} = 28,8506 \text{ kg/kmol} \quad (5.8)$$

Reaksiyona göre tam yanma için gereken doğalgaz kütle, denklem 5.9'da hesaplanmıştır.

$$m_{r,Doğal Gaz} = n_{Doğalgaz} * m_{Doğalgaz} = 1 [\text{kmol}] * 17,2244 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right] = 17,2244 [\text{kg}] \quad (5.9)$$

Reaksiyona göre tam yanma için gereken hava kütlesi, denklem 5.10'da hesaplanmıştır.

$$m_{r,Hava} = n_{hava} * m_{hava} = 9,9604 [kmol] * 28,8506 \left[\frac{kg}{kmol} \right] = 287,363 [kg] \quad (5.10)$$

Reaksiyona göre modellemesi yapılan doğalgazın tam yanması için, teorik hava/doğalgaz kütleli oranı; denklem 5.11'de verilmiştir.

$$AFR_{Teorik} = \frac{m_{r,Hava}}{m_{r,Doğalgaz}} = \frac{287,363 [kg]}{17,2244 [kg]} = 16,6834:1 \quad (5.11)$$

Modellemesi yapılan doğalgazın tam yanma denklemine göre teorik hava/yakıt oranı 16,68:1 bulunmuştur. Bu değer benzinin tam yanması için gereken teorik hava/yakıt oranı ile karşılaştırıldığında; doğalgazın tam yanması için benzine göre daha fazla havaya ihtiyaç duyduğu görülmektedir.

6. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

6.1. Benzinli Motorlar İçin CNG Yakıtının Kullanılabilirliğinin İrdelenmesi

Benzinli motorlarda CNG'nin kullanılabilirliğini irdelemeden önce; doğalgaz ile benzinin bazı özelliklerini karşılaştırmak doğru olacaktır. Tablo 6.1'de, doğalgaz ve benzin için fiziksel özelliklerin karşılaştırılması; Tablo 6.2'de ise doğalgaz ve benzinin kimyasal bileşenlerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 6.1. Benzin ve Doğalgazın Fiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılması [29].

Özellik	Benzin	Doğalgaz
Havadaki Difüzyon Katsayısı (cm^2/sn)*	0.05	0.16
Sabit Basıncıta Özgül Isı ($\text{J/g}^\circ\text{K}$)*	1.20	2.22
Havadaki Tutuşma Limitler (% Hacim)	1.0-7.6	5.3-15.0
Havadaki Tutuşma Enerjisi (mJ)	0.24	0.29
Tutuşma Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	228-471	540
Havadaki Alev Sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)**	2197	1960**
Patlama Enerjisi (g TNT/kJ)*	0.25	0.19
Alev Yayma Yeteneği (%)	34-43	25-33

*Normal sıcaklık ve basınçtaki değerlerdir.
** Doğalgazın havadaki alev sıcaklığı düzeltilmiş değerdir [8].

Tablo 6.2. Doğalgaz ve Petrolün Kimyasal Bileşenlerinin Karşılaştırılması [22].

Bileşen	Doğalgazdaki Mol Kesri	Petroldeki Mol Kesri
Metan (CH_4)	0.9	0.44
Etan (C_2H_6)	0.05	0.04
Propan (C_3H_8)	0.03	0.04
Bütan (C_4H_{10})	0.01	0.03
Pentan (C_5H_{12})	0.01	0.02
Hekzan (C_6H_{14}) ve Daha Ağır Alkanlar	< 0.01	0.43

Motorlu taşıtlarda kullanılabilmesi öngörülen bir yakıtın; birim fiyatlarının ucuz olması, arz güvenliğinin olması, taşıt motorunda köklü revizyon gerektirmeyecek ve motor performansında önemli kayıp oluşturmayacak nitelikte olması gerekir. CNG yakıtı;

alternatif bir yakıt olarak kullanılabilmesi için gereken tüm kriterleri sağlamaktadır. Dolayısıyla buji ateşlemeli motorlar için ideal bir yakıt olduğu söylenebilir. Benzin yakıtının kullanıldığı buji ateşlemeli motora, ikinci bir yakıt sistemi olarak CNG dönüşüm kitinin montajlanmasıyla; taşıtın çift yakıtlı hale gelmesi sağlanmaktadır [13,30,31].

Oktan sayısı, buji ateşlemeli motorlarda yakılacak yakıtlardan istenilen en önemli niceliklerdendir. Doğalgazın, oktan sayısının yüksek olması; buji ateşlemeli motorlar için uygun yakıt olma niteliğini taşımaktadır. CNG yakıtının oktan değeri 120-130 arasındadır. Ayrıca doğalgazın, ısı değeri benzine göre yüksek olması da bir avantaj sağlamaktadır. Doğalgaz benzine oranla daha yüksek hava fazlalık katsayısı değerlerinde tutuşma olanağına sahip olduğu belirtilmektedir[60]. Böylece motorun fakir karışımla çalıştırılıp, yakıt ekonomisi ve egzoz gazları emisyonu açısından yarar sağlanması da mümkün olmaktadır [3,9,32].

CNG yakıtı, benzinden daha yüksek ısı değere sahiptir. Fakat CNG yakıtının volumetrik verimi benzinin volumetrik verimine oranla daha düşük olmasından dolayı, doğalgaz kullanımında benzin kullanımına oranla performans daha düşüktür [60]. Doğalgazda yanma havası oranı diğer yakıtlara göre daha fazladır. Stokiyometrik karışım içindeki yakıtın hacimsel oranının düşük oluşu nedeniyle, motorun birim hacmindeki stokiyometrik karışımın ısı değeri; benzine göre %10 mertebesinde daha az olmaktadır. Ayrıca laminar alev hızının da benzin-hava karışımına göre düşük olması, performans açısından olumsuz etkiler geliştirmektedir. Ancak doğalgazın motor performansı üzerindeki bu olumsuz etkisi; sahip olduğu yüksek oktan sayısı avantajlı kullanılarak, motorun sıkıştırma oranının artırılması sonucunda giderilebilmektedir. Doğalgazın difüzyon katsayısının benzine oranla iki kat fazla olması, hava ile daha kolay ve hızlı karışması, çift yakıtlı motorlarda kullanımı açısından yarar sağlamaktadır. Bu özelliği nedeniyle doğalgaz, benzinli motorlarda temel değişiklik yapılmadan sadece CNG yakıt dönüşüm sistemi donanımlarının montajlanması suretiyle kullanılabilir [9,33].

Doğalgazın korozif (aşındırıcı) özellikleri yoktur. Fakat bazen dünyada değişik bölgelerde elde edilen doğalgaz içerisinde nem olabilmekte ve bu gazlar literatürde ıslak gaz olarak tabir edilmektedir. İçerisinde nem olan yani ıslak gaz olarak tabir edilen doğalgazın yakıt olarak kullanılması durumunda; motorda korozyona neden olabilmektedir [10].

CNG yakıtının kullanımı, benzin ve motorin kullanımına göre daha düşük bakım maliyeti oluşturmaktadır. Benzin ve motorin gibi yağ içeren bir yakıt olmadığından dolayı, silindir yüzeylerinde mumlaşma yapan artıklar oluşmaz. Sıkıştırılmış doğalgaz; gaz fazında bir yakıt olup, silindir içinde yağlama yağıyla karışma potansiyeli göstermediğinden ve sıkıştırılmış doğalgaz kullanımında silindir içlerinin temiz kalmasından dolayı; daha seyrek, yağ ve yağ filtresi değişimi gerektirmektedir. Benzinli araçların bujilerinde rastlanılan; buji uçlarında kurum ve yağ birikintilerine doğalgaz ile çalıştırılan motorlarda rastlamak pek olası değildir. Dolayısıyla, bujiler daha geç değiştirilmektedir. Ayrıca CNG yakıtının kullanıldığı taşıtlarda, egzoz sistemi donanımları daha uzun ömürlü olmaktadır. Bunlar da doğrudan taşıtın işletme maliyetlerini azaltmaktadır [7,36].

Doğalgaz ile çalışan bir motordan yüksek performans ve düşük emisyon almak için belirleyici faktör sıkıştırma oranıdır ve dolayısıyla bunu tam olarak sağlamak için motorun tasarım süreci önem taşımaktadır. Sıkıştırma oranı her motor için farklı olabilmektedir. Benzinli motorlarda sıkıştırma oranının sınırlandırıldığı noktanın vuruntu sınırı ile paralel olduğu bilinmektedir ve doğalgazın yüksek oktan sayısına sahip olması sıkıştırma oranının arttırılabilmesini sağlamaktadır. Yüksek oktan sayısı; vuruntunun ortadan kalkması, daha uzun buji ömrü, yağlama yağının daha fazla kullanımı ve soğuk havalarda şartlarında motorun daha iyi çalışmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla doğalgaz ile çalıştırılacak bir motorda sıkıştırma oranının yüksek tutulması önemlidir. Sıkıştırma oranının arttırılması daha fazla termik verim sağlar, bu da doğrudan yakıt tüketiminde azalma sağlamaktadır [3, 9,59].

Ayrıca doğalgazın ısı değeri, benzine oranla daha fazladır. 1 litre benzin ile 0.9 m^3 doğalgazın enerjisi eşdeğerdir [14]. 2017 yılı Temmuz ayı birim fiyatlarına bakıldığında 1 m^3 doğalgazın birim fiyatı, 1 litre benzinin birim fiyatına oranla yaklaşık olarak %56 daha ucuzdur. Birim başına enerji değerlerin parasal karşılıkları karşılaştırıldığında; doğalgazın, benzine oranla %58 daha ekonomik bir yakıt olduğu görülmektedir.

6.2. Benzinli Motorlarda CNG Yakıtı Kullanımının Motor Performansına ve Egzoz Gazı Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması

Motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın, doğalgazın benzin motorlarında kullanılması durumunda; motor gücünde ortalama olarak %7'lik kayıp meydana geldiği yapılan çalışmalarda belirtilmiştir. Özcan (2010)'ın yapmış olduğu

çalışmaya bakıldığında; benzinli bir motorda CNG yakıtı kullanıldığında, benzine göre motor gücünde % 7,65 oranında azalma tespit edilmiştir. Çetinkaya(2004)'nın yapmış olduğu çalışma sonucunda benzinli bir motorda, doğalgaz kullanılması halinde; maksimum motor gücünde %6 kadar azalma görüldüğü belirtilmiştir. Sıkıştırma oranını artırılması ile motorda benzin yerine doğalgaz yakılması sonucu oluşacak güç kayıplarının üstesinden gelinebilir [3,7,9,37].

Çetinkaya(2004) yapmış olduğu çalışmada benzinli bir motorda, doğalgaz kullanılması halinde; maksimum motor momentinde %3 kadar azalma görüldüğünü belirtmiştir. Ayrıca çalışmasında tespit ettiği motor gücündeki ve motor momentindeki azalmaların; doğalgazın yanma hızının, benzine oranla daha düşük olmasından kaynaklanabileceğini belirtmiştir [7,37].

CNG yakıtı kullanılarak çalıştırılacak motorların hava/yakıt oranı, motorun çalışma şartları ile birlikte CNG yakıtının özelliklerine göre ayarlanırsa, CNG yakıtı kullanımında karşılaşılan motor gücü ve moment kayıpları tekrar kazanılabileceği; Semin(2008) tarafından belirtilmektedir [21].

Doğalgaz daha hafif moleküler yapıya sahiptir ve silindire giren havanın %10'unu teşkil etmektedir. Hava miktarının azaltılması genellikle güç kaybına neden olurken, sıkıştırma oranının artırılması bu güç kaybını azaltabilir. Doğalgazın yanması sonucu oluşan maksimum basınç ve sıcaklık benzin motorundan daha düşük olduğundan, sıkıştırma oranının artırılması sonucu artacak olan basınç ve sıcaklıklar tehlikeli boyutlara ulaşmayıp, ancak benzin motorundaki değerlere gelecektir. Özcan(2010)'ın yapmış olduğu çalışmaya bakıldığında; silindir basınç değişiminin CNG kullanımında, benzine göre % 7,26 oranında bir azalma gösterdiği belirtilmiştir. Yine aynı çalışmada; CNG kullanımında sıcaklık değişiminde, benzine göre % 4,90 azalma meydana geldiğini belirtmiştir [9,37].

Taşıt motorlarında alternatif bir yakıt olarak doğalgaz kullanımının esas amacı yanma sonucunda salınan zararlı emisyonların azaltılmasıdır. Doğalgaz, kimyasal bileşimi nedeniyle geleneksel taşıt yakıtlarından çok daha temiz yanmaktadır [22].

Yakıt olarak doğalgaz kullanımı, hidrokarbon, karbonmonoksit, azot oksit, kükürt ve partiküllerde önemli oranda düşüş sağlanmaktadır. Karbondioksit emisyonlarının sera etkisiyle küresel ısınmaya yol açması nedeniyle; karbondioksit emisyonlarının oluşumunu sağlayan, karbon atomlarının kullanılan yakıt içerisinde olmaması veya düşük oranda olması istenmektedir. Sıkıştırılmış doğalgazın, karbon ve hidrojen oranının benzindeki

orana göre daha az olması; karbondioksit emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Doğalgazlı taşıtların, geleneksel yakıtlı taşıtlardan % 90 oranında daha az azot oksit ve % 20 oranında daha az karbondioksit ürettiği görülmektedir. Ayrıca partiküllerde %99 dolaylarında azalma sağladığı belirtilmektedir. Doğalgazın yakıt olarak kullanıldığı motorlarda, sera etkisi yapıcı gaz ve toksik madde salma oranı benzinli bir motora göre düşüktür. Sera etkisi yapıcı gazların, doğalgaz kullanımıyla azalma oranı %20'ler ile ifade edilmektedir. Diğer alternatif yakıtların ihtiva ettiği aldehit veya diğer hava toksinleri, doğalgazda bulunmamaktadır [24,36,38,39].

Motorlu taşıtlara yakıt dolumu yapılırken veya yakıtı kullanırken açığa çıkan buharlaşma emisyonu; doğalgazda oldukça düşüktür ve hatta çoğu zaman yoktur. Bu durum toplam hidrokarbon emisyonunun en az % 50 oranda azalması demektir [24].

İçten yanmalı motorlarda, yakıt olarak doğalgazın kullanılması durumunda yanma sonu sıcaklığı düşmektedir. Yanma sonu sıcaklığın düşmesi azot oksit (NO_x) emisyonlarında azalma sağlamaktadır. Özcan(2010)'ın yapmış olduğu çalışmaya bakıldığında buji ateşlemeli bir motorda, sıkıştırılmış doğalgaz kullanıldığında; benzin yakıtının kullanımına göre azot oksit emisyonunda ortalama olarak % 91,96 oranında azalma tespit edildiği belirtilmiştir. Aynı çalışmada; CO_2 emisyonlarının benzinde % 12,80 oranında belirtilirken, sıkıştırılmış doğalgazda ise % 9,3 oranında olduğu belirtilmiştir. Bu da CO_2 emisyonunda yaklaşık olarak %28'lik bir azalma sağlandığını göstermektedir. Yine aynı çalışmada; CO emisyonları ise benzinde % 0,26 oranında belirtilirken, sıkıştırılmış doğalgazda % 0,25 oranında olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla doğalgazın düşük emisyon değerlerine sahip yakıt olduğu, diğer yakıtlara göre, çevreye çok daha az zarar verdiği görülmektedir [7,9,11,37].

Çetinkaya(2004), yapmış olduğu çalışma benzinli bir motorda, doğalgaz kullanılması halinde; CO emisyonlarında %83 kadar azalma, CO_2 emisyonlarında ise %10 kadar azalma görüldüğünü belirtmiştir. Çetinkaya, yine aynı çalışmasında; doğalgazla çalışma durumunda benzinle çalışma durumuna oranla HC emisyonunun %88 kadar azaldığını belirtmektedir. Tüm bu verilerle birlikte sonuç olarak doğalgazın, egzoz emisyonları bakımından; benzin ve dizel yakıtı olan motorinden daha üstün özelliklere sahip olduğunu belirtmiştir [7].

Bunun yanında doğalgazın kullanımı, motorlu taşıtların gürültü düzeyinde azalmalar sağlamaktadır. Özcan(2010)'ın yapmış olduğu çalışmada buji ateşlemeli bir motorun

gürültü şiddetinin KMA'ya göre değişimini incelemiştir. Bu çalışmada gürültü şiddetinin; benzin yakıtı kullanılırken 89,97 dB(A) olduğunu, doğalgaz kullanıldığında ise 89,67 dB(A) olduğunu belirtmiştir. Bu durum doğalgazın yüksek oktan sayısına sahip olması ile açıklanmıştır [37].

Özcan (2010)'ın yapmış olduğu çalışma sonucunda belirttiği sonuçlara bakıldığında; CNG yakıtı kullanıldığında özgül yakıt tüketiminde, benzine göre ortalama olarak % 17,64 oranında bir azalma olduğu görülmektedir [37].

6.3. Sıkıştırma Oranının Artırılmasında Oluşan Etkilerin, CNG Yakıtı Kullanılması Durumu İçin İrdelenmesi

Benzinli motorlarda yakıt olarak, sıkıştırılmış doğalgazın kullanılması ile ilgili literatür taramaları sonucunda bir takım bulgular elde edilmiştir. CNG yakıtının, benzinli motorlarda kullanılması; egzoz emisyonlarının azalmasını, motor ömrünün uzamasını, daha gürültüsüz olması nedeniyle daha konforlu sürüşü ve bakım-işletme maliyetlerinin azalmasını yanı sıra, yakıt tüketiminde önemli ölçüde maddi ekonomi sağlamaktadır. CNG yakıtının benzinli motorlarda kullanılmasının getirdiği tek negatif unsur motor performansındaki azalmadır.

Benzinli motorlarda sıkıştırma oranının artırılmasıyla, motor momenti ve motor gücü artmakta, performans karakteristiklerinde de iyileşme olmaktadır [40]. Fakat benzinli motorlarda sıkıştırma oranını sınırlayan parametre vuruntu sınırındır. Sıkıştırma basıncının artırılmasıyla oluşan basınç ve sıcaklık artışı ile yanma hızının önemli oranda artması ise yakıtın kendi kendine tutuşması için gerekli olan enerjinin azalmasına sebep olacaktır. Bunun sonucu olarak ta vuruntuya neden olabilecektir. CNG yakıtının, yüksek oktan sayısına sahip olmasından dolayı tutuşma sıcaklığı daha yüksektir, dolayısıyla tutuşma için gereken enerji ihtiyacı benzin yakıtına göre daha yüksektir. Sıkıştırma oranı artırıldığı takdirde; CNG yakıt olarak kullanılır ise, CNG'nin yüksek oranda oktan ihtiva etmesinden dolayı ancak buji kıvılcımı ile yanma olayı başlayacaktır; dolayısıyla erken tutuşma ve erken tutuşmanın sonucunda gelişmesi beklenen vuruntu, meydana gelmeyecektir [41]. Doğalgazla yanma şartında, vuruntu sınırı daha yüksek olan basınç ve sıcaklık şartlarına taşınacaktır.

Sıkıştırma oranı arttıkça silindir içindeki sıcaklık ve basınç artmaktadır, dolayısıyla yanma hızı da artacaktır. Sıkıştırma oranının artırılması, 6.1'deki denklemden görüldüğü

gibi yanma odası hacminin azalmasıyla mümkündür. Hacim azaldığından dolayı basınç artacaktır ve basıncın artmasıyla birlikte silindir içi sıcaklıkta artış gösterecektir. Benzinli motorlarda, CNG kullanılması halinde silindir içi basıncın ve sıcaklığın düştüğü bilinmektedir. Dolayısıyla sıkıştırma oranının artırılması durumunda meydana gelecek olan silindir içi basınç ve sıcaklık artışı, CNG yakıtının kullanılması ile absorbe edilebilecektir [41- 43].

$$\text{Sıkıştırma Oranı} = \frac{V_S + V_Y}{V_Y} \quad (6.1)$$

Sıkıştırma oranındaki artışa bağımlı olarak silindir içi basınç artacaktır. Basınç artışı ile birlikte yanma hızını artıran ve yanma süresini kısaltan, bir diğer faktör ise sıkıştırma zamanı sonucunda; sıkıştırılan hava-yakıt karışımının derişiminde meydana gelen artıştır. CNG'nin difüzyon katsayısının benzine göre 2 kat daha fazlasından dolayı sıkıştırma oranı artırılrsa dahi, sıkıştırılmış doğalgazın yakıt olarak kullandığı takdirde karışımın derişiminde önemli oranda artış meydana gelmeyecektir [44,45].

Sıkıştırma oranı artırıldığı takdirde sıkıştırma zamanı sonrasında oluşan yanma zamanındaki genişleme oranı da artacağından dolayı egzoz gazı sıcaklığı ve egzozdan atılan enerji miktarı azalacaktır. Sıkıştırma oranının artırılması, sıkıştırma zamanı sonundaki sıcaklığı artırırken; yanma ve egzoz zamanları sonundaki sıcaklığı da azaltmaktadır. Dolayısıyla çevrim boyunca farklı zamanlarda oluşan sıcaklıklar arasındaki değer farkı artacaktır [42]. Buji ateşlemeli bir motorun mevcut sıkıştırma oranının artırılması, teorik olarak yanma odası hacminin daraltılmasıyla sağlanacaktır. Daraltılan yanma odası hacmi, yanma esnasında yüzey alanının hacme oranını artıracığından dolayı ısı transferi artacak ve daha fazla ısı kaybına neden olacaktır [41,42,46, 47]. CNG yakıtının kullanılması halinde, silindir içi sıcaklıkta düşme olacağından; sıkıştırma oranının artırılmasının sonucu olan yanma zamanındaki ısı artışı ve sıkıştırma zamanı sonundaki sıcaklık azalmasından doğacak olan çevrim boyunca oluşacak sıcaklık farkları absorbe edilebilir.

Sıkıştırma oranının artırılması için yanma odası hacminin küçültüleceği düşünülürse; denklem 6.2'de gösterildiği gibi toplam hacimde azalacaktır. Bu da emme zamanında alınacak hava miktarının azalmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla CNG'nin yakıt olarak

kullanıldığı bir buji ateşlemeli motorda sıkıştırma oranının artırılması ile dolgunun ısı değeri yükselecektir, verim artacaktır [10].

$$V_T = V_S + V_Y \quad (6.2)$$



7. CNG YAKIT DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİ

7.1. Buji Ateşlemeli (Otto) Motorlarda CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri

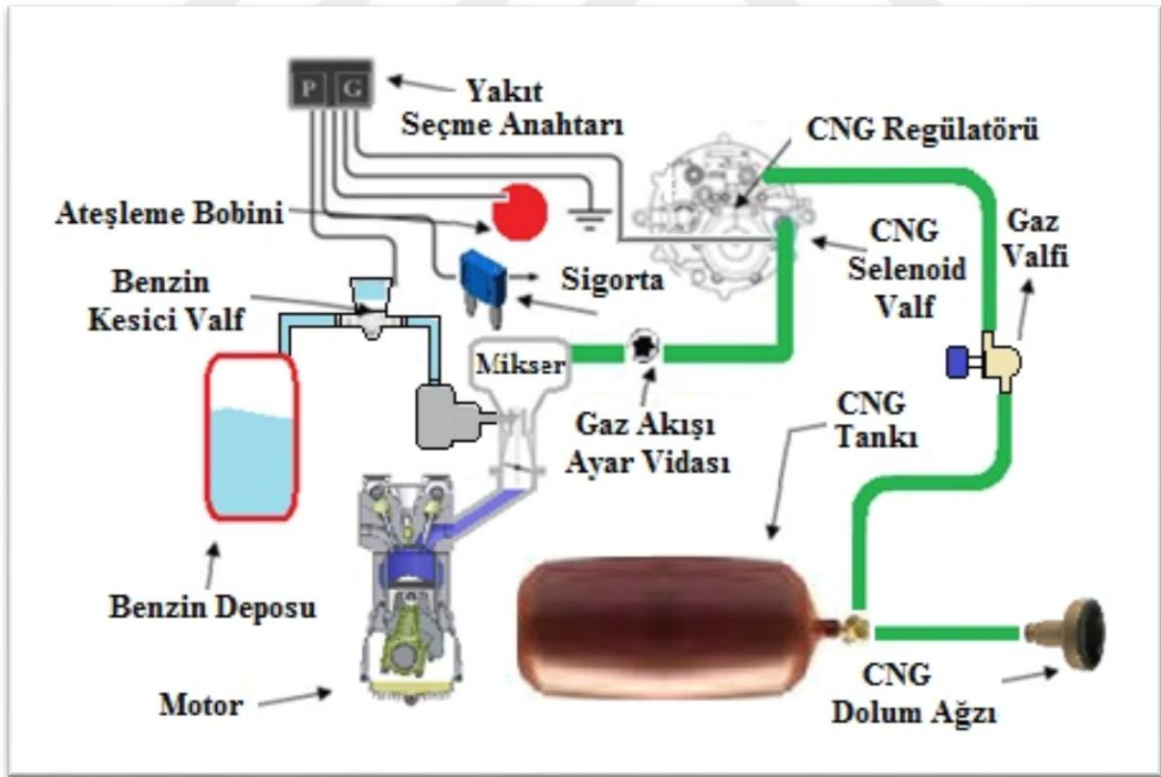
Doğalgaz sahip olduğu yüksek oktan sayısı nedeniyle buji ateşlemeli motorlar için uygun bir yakıttır. Benzine oranla birim kütlelerinin sahip olduğu enerji yoğunluğu daha fazla olmasına rağmen, stokiyometrik oranlardaki karışımın enerji yoğunluğu benzine oranla daha düşüktür. Dolayısıyla aynı motordan benzin ile çalıştırıldığında alınacak olan güç, doğalgaz kullanıldığında düşmektedir. Ayrıca doğalgazın laminer yanma hızının, benzinin lamniner yanma hızına oranla daha düşük olması sebebiyle ısıl verimin olumsuz etkileneceği düşünülmektedir. Ancak doğalgazın tutuşma sınırının, fakir karışımlara doğru gidildikçe; benzine oranla daha geniş olması ısıl verimin bu şartlarda daha yüksek olmasını sağlamaktadır. Doğalgaz yakıtının, petrol esaslı yakıtlara göre birçok avantaj sağladığı, daha çevreci, daha güvenli ve daha ekonomik bir yakıt olduğu ve işletme maliyetlerini düşürdüğü bilinmektedir.

Benzinli motorlarda, doğalgazın yakıt olarak kullanılabilmesi için köklü revizyon işlemine gerek yoktur. Sadece CNG dönüşüm sistemi elemanlarının montajlanması ile dönüşüm gerçekleştirilmektedir. Benzinli motorlarda mevcut olan çalışma prensibi değiştirilmediğinden ve yanma odasında hacimsel değişime gerek duyulmadığından dolayı hem benzin hem de CNG ile çift yakıtlı olarak kullanılabilir. CNG dönüşümü yapılan bir benzinli motor, her iki yakıtta da otto çevrimi prensibine göre çalışmakta ve elektronik ateşleme sistemi mevcut haliyle kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış doğalgazın basıncı regülatörde düşürüldükten sonra emme manifoldunda hava ile karıştırılarak homojen bir dolgu haline gelmesinin ardından çevrimde kullanılır.

Günümüzde kullanılan benzinli motorların yapısına uygun olarak üretimi ve montajı yapılan dört farklı tipte CNG dönüşüm sistemi vardır. Bunlar nesiller halinde ifade edilmektedir; her nesil, kendisinden bir önceki nesile göre daha ileri teknolojiye sahiptir. Taşıt motorlarının sahip olduğu teknolojiye paralel olarak üretilmiş olan tipteki CNG yakıt dönüşüm sistemi seçilerek dönüşüm sağlanır.

7.1.1. Karbüratörlü Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri

Karbüratörlü motorlarda kullanılmaktadır. Katalitik dönüştürücüsü olmayan taşıtlarda bu sistem uygulanmaktadır. Mekanik sistemlerdir, elektronik kontrol ünitesine sahip olmayan taşıtlarda kullanılır, dolayısıyla herhangi bir elektronik sinyal iletişimi ya da bilgi işleme fonksiyonları yoktur. Elektromanyetik CNG açma-kapama valfi sistemi çalıştıran ana elemandır. Genel hatlarıyla; elektromanyetik valf, regülatör ve karışım ünitesinden (mikser) oluşmaktadır. Çift yakıtlı olarak kullanılması istenilen bir motor için, bu sisteme ek olarak benzin hattına ayrıca bir elektromanyetik benzin kesici valf eklenir. Regülatöre alınan CNG'nin genişmesi ile hacim artacak ve sıcaklık düşecektir, dolayısıyla regülatörün donmaması bu noktada oldukça önem arz etmektedir. Motorun soğutma suyunun sıcaklığı ile regülatör ısıtılarak, donması önlenir. Karışım ayarı mikser ünitesi tarafından yapılmaktadır. Regülatörden gelen CNG, mikserde hava ile karışır ve oluşan doğalgaz/hava karışımı motor içine emilmek suretiyle emme zamanı başlamış olur [9]. Şekil 7.1'de karbüratörlü tip CNG yakıt dönüşüm sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



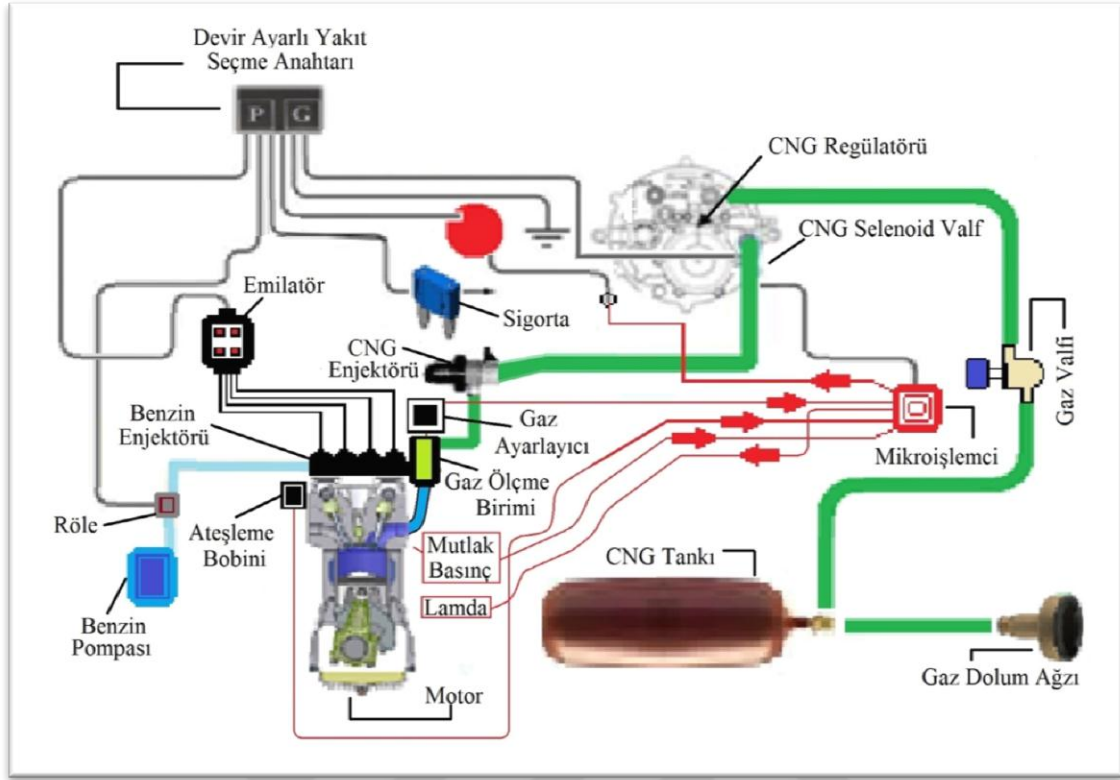
Şekil 7.1. Karbüratörlü Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi

7.1.3. Çok Nokta Enjeksiyonlu Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri

Kapalı devre çok nokta enjeksiyonlu taşıt motorlarında kullanılan, CNG yakıt dönüşüm sistemleridir. Bu sistemde, doğalgaz doğrudan emme manifolduna püskürtülmektedir, herhangi bir karışım ünitesi yoktur. Çok nokta enjeksiyonlu CNG akıt dönüşüm sistemleri; doğalgazı, emme supabı üzerine doğrudan püskürtebilirler. CNG'nin gaz fazında püskürtüldüğü çok nokta enjeksiyonlu sistemlerde, tek nokta enjeksiyonlu sistemlerde karşılaşılan geri tepme (karışımın emme manifoldunda yanmaya başlaması) olayına rastlanmamaktadır [9].

Motor ilk çalıştırmayı benzinle gerçekleştirir. Motor benzinle çalıştıktan sonra bir seçici anahtar yoluyla ikinci yakıt olan doğalgaza geçilir. Ayrıca bu sistemlerde devir ayarlı seçici anahtarda kullanılmaktadır. Anahtar üzerinden ayarlanan motor devir hızına ulaşıldığında sistem otomatik olarak doğalgazla çalışmaya geçer.

Çok nokta enjeksiyonlu CNG dönüşüm sistemlerinde tanktan gelen CNG, iki kademeli basınç regülatöründen geçirilir. Regülatörde; yüksek basınç düşürülerek, kontrol altında tutulur. Bir gaz ayarlama ünitesi ile her bir silindire eşit miktarda doğalgazın gönderilmesi sağlanır. Doğalgaz, her silindirin emme supabının üzerine enjektör vasıtasıyla püskürtülür. Bu sistemler; mikroişlemci kontrolüne sahiptir. Mikroişlemci tarafından veriler alınır ve gaz ayarı yine mikroişlemci tarafından gerçekleştirilir. Dönüşüm sisteminin mikroişlemcisi; çoğunlukla manifold mutlak basıncına ve motor devir hızına göre, verileri işler. Ayrıca mikroişlemcinin kullandığı diğer parametreler ise gaz keleşi pozisyonu, lamda sensöründen alınan veriler, giriş havası sıcaklığı, motor soğutma suyunun sıcaklığı ve regülatörden çıkan gazın sıcaklığıdır. Gaz ölçme birimi üzerine monte edilen ayarlayıcı, mikroişlemci tarafından kontrol edilir. Gaz ölçme birimi üzerindeki dijital ve lineer ayarlayıcı, püskürtülen yakıtın gerçek miktarını ayarlar [9]. Şekil 7.3'te çok nokta enjeksiyonlu tip CNG yakıt dönüşüm sistemi şematik olarak gösterilmiştir.

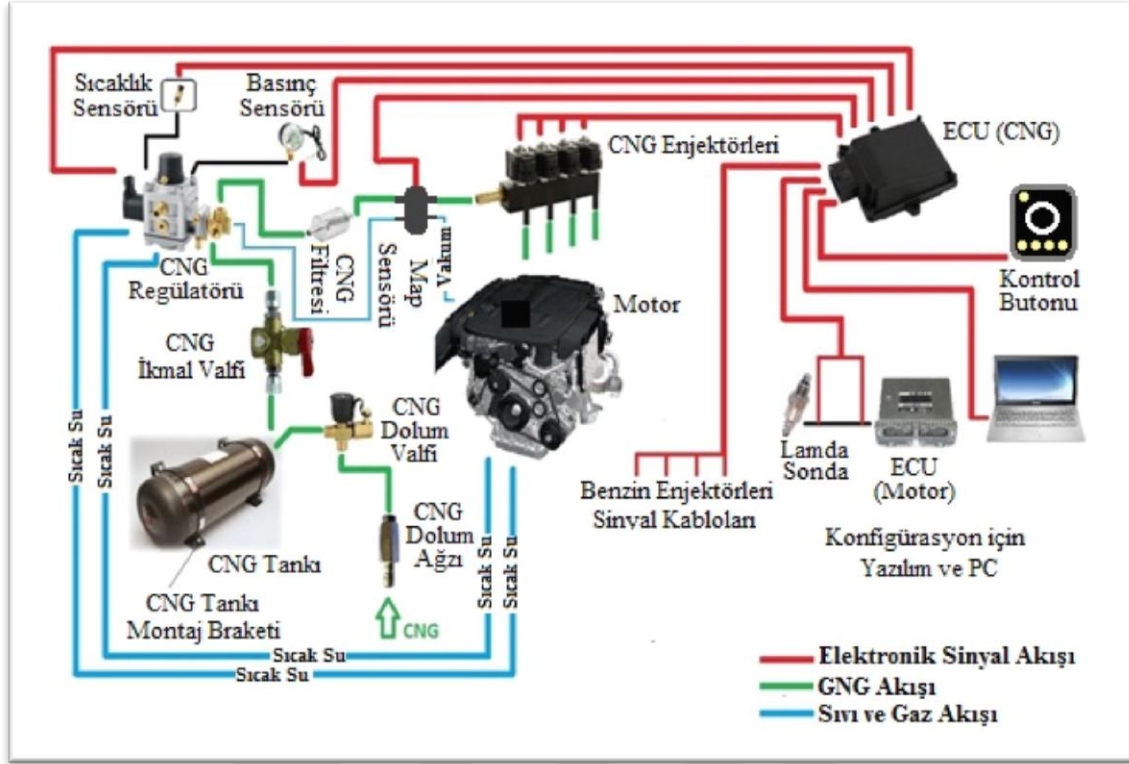


Şekil 7.3. Çok Nokta Enjeksiyonlu Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi

7.1.4. Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemleri

Kapalı devre, stokiyometrik ve fakir yanmalı motorlarda kullanılan CNG dönüşüm sistemidir. Sistem Euro 3 ve Euro 4 emisyon normlarını karşılayabilmektedir. Diğer CNG dönüşüm sistemlerinden farklı olarak; sistemin ECU ünitesi, CNG enjektörlerinin açılma ve püskürtme zamanını her silindirde bağımsız olarak kontrol eder. CNG enjektörleri bir ortak hat üzerinde sıralı olarak dizilmiştir. Özellikle mikserli sistemlerde karşılaşılan olumsuzluklar ve sistemsel performans kayıpları sıralı enjeksiyon CNG dönüşüm sistemlerinde yaşanmamaktadır [9,35].

Çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemleri; modern motorlarda, farklı çalışma şartlarına cevap verebilecek, uyum sağlayabilecek teknolojiye sahiptir. CNG enjektörleri bir konnektör üzerinde sıralı olarak yerleştirilmiştir, yakıt doğrudan her silindirin emme manifolduna püskürtülür. Sistem CNG yakıt dönüşüm sistemi elektronik kontrol ünitesi tarafından kontrol edilmektedir. Dönüşüm sisteminin elektronik kontrol ünitesi; benzin enjektörlerinden alınan sinyalleri kontrol eder ve motorun mevcut kontrol ünitesinde bir değişiklik veya çakışma yapmaz. Şekil 7.4'te çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.4. Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi

7.2. Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Çalışması

Bu bölümde çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sisteminin çalışma prensibi verilmiştir.

Taşıt motorlarında kullanılmak üzere özel olarak imal edilen sıkıştırılmış doğalgaz tankına, CNG dolmuş valfinin açılması suretiyle, çoğunlukla 200-240 bar basınçta sıkıştırılmış doğalgaz; dolmuş ağzından doldurulur. Taşıtın kontağı açıldığında; ikmal valfi, gazın depodan regülatöre akışına olanak verir. CNG tankında depolanan sıkıştırılmış doğalgaz tükendikçe kütlesi azalmakta fakat hacmi sabit kalmaktadır. Bu sebepten dolayı, tank içerisindeki sıkıştırılmış doğalgaz tükendikçe basınç azalmaktadır. Regülatörün sağlıklı çalışabilmesi için regülatör girişindeki sistem basıncı 10 bar'ın altına düşmemesi gerekir. Regülatör giriş basıncı 10 bar'ın altına düştüğünde sistem tank içerisindeki gazın tükenme eşiğinde olduğuna dair ikaz sinyal verir ve ardından regülatörün zarar görmemesi için doğalgaz akışını keser. Doğalgaz akışının kesilmesiyle eş zamanlı olarak, benzin enjektörleri devreye girer ve motor çalışmaya benzinle devam eder. CNG regülatörleri 300 bar basınca dayanıklı malzemelerden imal edilmektedir. CNG regülatörüne gelen yüksek basınçtaki doğalgazın, basıncı düşürülerek enjektörlere gönderilmektedir. Regülatör

içerisine alınan sıkıştırılmış doğalgaz genişletilerek basıncı düşürülür. Gaz genişlemesine bağlı olarak regülatörde soğumalar başlar. Soğuyan regülatörün donmaması, ısıtılması gerekir. Regülatörün ısıtılması için taşıtın soğutma suyu döngüsündeki sıcak sudan yararlanılmaktadır. CNG dönüşüm sisteminin elektronik kontrol ünitesinde belirlenen; sistemin aktif edileceği su sıcaklığına ulaşıldığında, regülatörden düşük basınçtaki gazın çıkışı sağlanır.

Regülatörde, basıncı düşürülen doğalgaz; öncelikle filtreden geçer. Filtre edilen gaz map sensöründen geçerek enjektör rampası girişine gönderilir. Enjektör rampası girişinden alınan doğalgaz, her bir enjektör için belirlenmiş gaz enjektörlerine dağıtılır. Motorun benzin enjektörlerinden alınan sinyallere göre eş zamanlı çalışan gaz enjektörleri, her bir emme manifolduna açılan delik vasıtasıyla, doğalgazı doğrudan manifold içine püskürtür. Bu işlemi, CNG dönüşüm sisteminin elektronik kontrol ünitesi kontrol eder. Sistemin çalışması tek düzenli değildir; sistemin çalışma düzeni (gaz enjektörlerinin aktifleştirilmesi veya pasifleştirilmesi), CNG yakıt dönüşüm sistemi ECU'sunda yapılandırılarak belirlenir. Bu sistemlerde, motor devir sayısını ölçmek için ateşleme bobininden veri bağlantısı gerçekleştirmeye gerek yoktur. Benzin enjektörü sinyal kabloları üzerinden motor devir sayısı ölçülür.

7.3. Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Elemanları

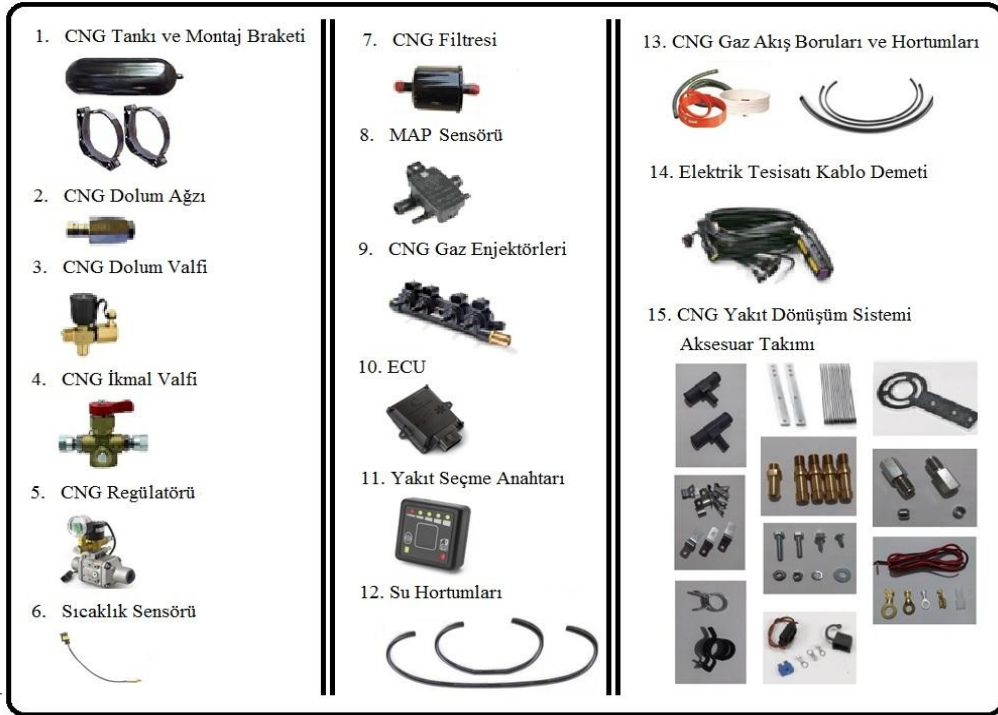
Bu bölümde çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sisteminin elemanları verilmiştir.

CNG yakıt dönüşüm sistemi elemanları, LPG yakıt dönüşüm sistemi elemanlarıyla benzer elemanlardır. Tank, dolun üniteleri, valf sistemleri, regülatör, hortumlar ve borular tamamen farklı olmakla birlikte CNG yakıtına özgün olarak üretilmektedir. LPG yakıt dönüşüm sistemleri düşük basınçla çalıştığı için kullanılan sistem parçaları, CNG yakıt dönüşüm sistemi parçalarına göre daha zayıf yapıdadır. CNG yakıt dönüşüm sistemi elemanlarında; daha dayanıklı malzemelerle, sıkıştırılmış doğalgazın sistem basıncı emniyet altına alınmaktadır.

Günümüzde kullanılan benzinli motorlarının çoğunluğu çok nokta enjeksiyonludur. Çok nokta enjeksiyonlu benzinli motorlarda; gaz yakıt dönüşüm sistemi olarak, genellikle çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip sistemler kullanılmaktadır. Çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG dönüşüm sistemini oluşturan parçalar şunlardır:

1. CNG Tankı ve Montaj Braketi
2. CNG Dolum Ağız
3. CNG Dolum Valfi
4. CNG İkmal Valfi
5. CNG Regülatörü (Solenoid Valf ve Basınç Ölçüm Sensörü ile birlikte)
6. Sıcaklık Sensörü
7. CNG Filtresi
8. MAP (Emme Manifoldu Mutlak Basınç) Sensörü
9. CNG Gaz Enjektörleri
10. ECU (Elektronik Kontrol Ünitesi)
11. Yakıt Seçme Anahtarı
12. Su Hortumları
13. CNG Gaz Akış Boruları ve Hortumları
14. Elektrik Tesisatı Kablo Demeti
15. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Aksesuar Takımı

Çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi elemanlarına ait görseller, Şekil 7.5'te gösterilmektedir.



Şekil 7.5. Çok Nokta Enjeksiyonlu Sıralı Tip CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Elemanları

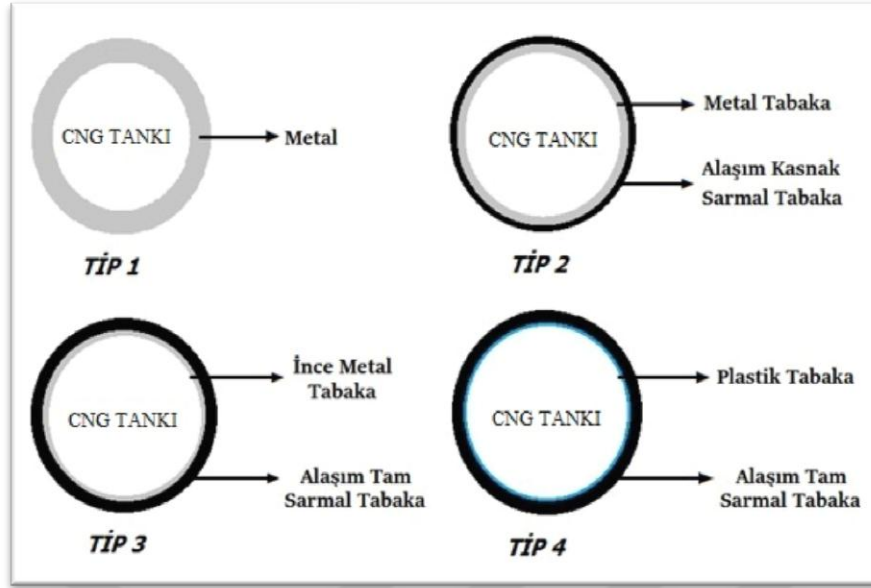
7.3.1. CNG Yakıt Tankları

CNG yakıt tankları; sıkıştırılmış doğalgazın depolandığı, dayanımı yüksek ve ağırlıkları düşük, kaliteli malzemeden imal edilen yakıt sistemi elemanıdır. Doğalgazın taşıtlarda depolanması ekonomik ve teknolojik yönden problemler oluşturmaktadır. Çünkü ister gaz olarak, ister sıvı olarak depolansın doğalgaz yüksek basınç altında depolanmaktadır. Bu da bir yandan depo ağırlığının artmasına, diğer taraftan emniyet açısından bazı problemlere yol açmaktadır. CNG tankı ortalama 80 kg'dır. CNG tanklarının daha hafif teknolojileri bulunmasına rağmen maliyetleri çok yüksek olduğundan ticari olarak kullanımları çok kısıtlıdır. Dolum gerçekleştirilen doğalgaz tanklarının periyodik olarak kalibre edilmesi bir zorunluluktur. Sıkıştırılmış doğalgaz, dolum sırasında 216 bar'lık bir basınca ulaşmaktadır. Uluslararası normlarının getirmiş olduğu standartların çok üstünde bir emniyet sağlamaktadır. Tanklar, 300 bar'lık basınca uygun bir şekilde kalibre edilmiştir ve 450 bar'lık basınca dayanabilmesi için tasarlanmıştır. Depolar maksimum 250 bar basınçta doldurulmalıdır, sistemin çalışması için minimum tank basıncı ise 10-15 bar aralığındadır. 10 ile 15 barın altındaki basınçlarda sistem çalışmaz ve dolayısıyla çift yakıtlı sistemlerde otomatik olarak diğer yakıtı geçirir [9].

Dört tip CNG tankı mevcuttur:

- 1. Tip CNG Tankları: Tamamen Metal CNG Tankları
- 2. Tip CNG Tankları: Alaşım Kasnak Sarmal Çelik CNG Tankları
- 3. Tip CNG Tankları: Alaşım Tam Sarmal İnce Metal CNG Tankları
- 4. Tip CNG Tankları: Alaşım Tam Sarmal Plastik CNG Tankları

Tamamen metal olan tankların en büyük dezavantajları boş tankların ağırlığıdır, 50 lt hacme sahip tamamen metal olan bir tank yaklaşık olarak 50 kg'dır. Bu ağırlık taşıta ek ağırlık getirmektedir. Dolayısıyla daha hafif CNG tankları imal edebilmek için, dört kuşak halinde tank imalatları yapılmıştır. Günümüzde daha hafif CNG tankı imal edebilmek için, birçok imalatçı yoğun Ar-Ge çalışması yapmaktadır. CNG tank tiplerine ait kesit görüntüleri, Şekil 7.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 7.6. CNG Tank Tiplerine Ait Kesitler

7.3.1.1. CNG Tanklarının Özellikleri

TİP- 1: Karbon veya hafif çelikten yapılmış, tamamen metal malzemeden üretilmiştir. 100 litre hacimdeki bir metal tank takriben 100 kg ağırlığındadır.

TİP-2: Kasnak halindeki sarmal, sürekli sarılan iplikle kuvvetlendirilmiş ve sentetik reçine ile kaplanmıştır. Tankın metal malzemesi, silindirik kısmında azaltılır ve bu bölüme cam elyafı veya karbon fiber malzeme sarılır. İç katman, metaldir. 100 litre hacime sahip bir tank, takriben 70 kg'dır.

TİP-3: Tankın dış yüzeyinin tamamı; sürekli sarılan iplikle kuvvetlendirilip, sentetik reçine ile kaplanmıştır. Tankın metal bölümü; çok hafif ve ısıyı hızla yayan bir malzemeden (alüminyum) yapılmış olan dikişsiz ve tamamına karbon fiber sarılı olan tüptür. 100 litre hacime sahip bir tankın ortalama ağırlığı 32-35 kg'dır.

TİP-4: Tankın dış yüzeyinin tamamı; sürekli sarılan iplikle kuvvetlendirilip, sentetik reçine ile kaplanmıştır. Tankın içinde ise plastik malzemeden üretilen tüp kullanılmıştır, plastik tüpün yüzeyi karbon fiber sarılıdır. 100 litre hacme sahip bir tankın ortalama ağırlığı 30-35 kg'dır.

7.3.1.2. CNG Tankları Hakkında Önemli Hususlar

CNG tankları, çevresel etkilerden kaynaklanan kirlenmelere maruz kalabilirler. Yüksek tahribat gücüne sahip asitlerden ve çözeltilerden korunmalıdırlar. Çünkü tamamen metal CNG tankları haricindeki diğer üç CNG tank modelinin de dış yüzeyleri reçine kaplıdır. CNG tanklarında koruyucu mantolamalar mevcut değildir ve gerek görülmemiştir. Kaplamanın yüzeyindeki ince epoksi reçine tabakası uygun bir yüzey koruması sağlar. Fakat sarma iplerden oluşan lif tabaka, şiddetli darbelere bağlı olarak kolaylıkla hasar görebilir. Bu yapısal hasarlar kolaylıkla görülebilir. Ayrıca tanklar; mıcır veya benzeri maddeler yoluyla aşınmaya maruz bırakılmamalıdır. Tankların içine kesinlikle su girmemelidir. Çünkü bu durum tüplerin kullanım ömürlerini olumsuz yönde etkiler. CNG tanklarının, yüksek ısılardan korunması gerekliliği de oldukça önemlidir.

7.3.1.3. CNG Tankı Montaj Braketleri

Braketler; CNG tanklarını, taşıtın uygun bölgelerine sabitlemek için kullanılır. Deponun sarsıntılardan etkilenip tahrip olmaması ve konumlandırıldığı yerde sabit kalması için oldukça önemlidir.

7.3.2. CNG Dolum Ağızı

CNG tankının, gaz giriş hattına montajlanır ve iki türü mevcuttur. NGV1 ve NGV2 olarak adlandırılır. Binek taşıtlarda genellikle NGV1 tipindeki dolum valfleri kullanılır. Sıkıştırılmış doğalgazı, taşıtın CNG deposuna doldurabilmek için dolum ağızı gereklidir. Depo içerisine sıkıştırılmış doğalgazın dolumunu sağlar. Yaygın olarak ağır vasıtalara 12 mm, diğer taşıtlara 6 mm dolum ağızı bağlanmaktadır [9]. Bazı CNG dolum ağızları, filtre donanımlı bir valf ünitesine sahiptir. Dolum ağızı ünitesindeki valf, tek yönlü gazın geçişine müsaade eder; böylece dolum ağızından basılan gazın geri kaçmasını önler. Filtre ise doldurulan gazın filtre edilmesini sağlar.

7.3.3. CNG Dolum Valfi

CNG dolum ağızı ile CNG deposu arasına takılırlar. Ağır vasıta taşıtlarda; tanklardaki gazı boşaltmak gerektiğinde, kullanılabilecek basınç düşürme valfi bulunur. Bu basınç düşürme valfi, CNG deposunun ağızında bulunan multivalfin içindeki aşırı akım valfini

kilitlenmeden; acil durumlarda, gaz boşaltımı için gereklidir. Akış kapasitesi 100 m³/saat kapasitenin altındadır. Giriş supabı ve vanası dolmuş ucuna bağlıdır. Depo içerisinde alınan gaz bu supap ve vanadan geçer. Dolmuş ucu parçanın üzerindeki rekorla bağlanmaktadır. Depo içerisine gaz girişi parça üzerinden alınmaktadır. Giriş supabı bir çeşit emniyet valfidir. Valf kapalı olduğu zaman depodan regülatöre gaz çıkışı yapılamaz. Multivalf üzerinde çıkış supabı vardır. Çıkış supabı sisteme giden gazın emniyetli bir şekilde sisteme akmasını sağlar. Yüksek basınç borusunda meydana gelebilecek kaçak, yırtılma vb. arızalarda çıkış supabı kendini kapatarak sistemi koruma altına almaktadır [9].

7.3.4. CNG İkmal Valfi

CNG ikmal valfleri, CNG yakıt dönüşüm sisteminin yapısına göre birçok valften oluşabilmektedir. Bu valfler, CNG takından, CNG regülatörüne doğalgazın transferi için ikmal hattında bulunan valflerdir.

7.3.5. CNG Regülatörü

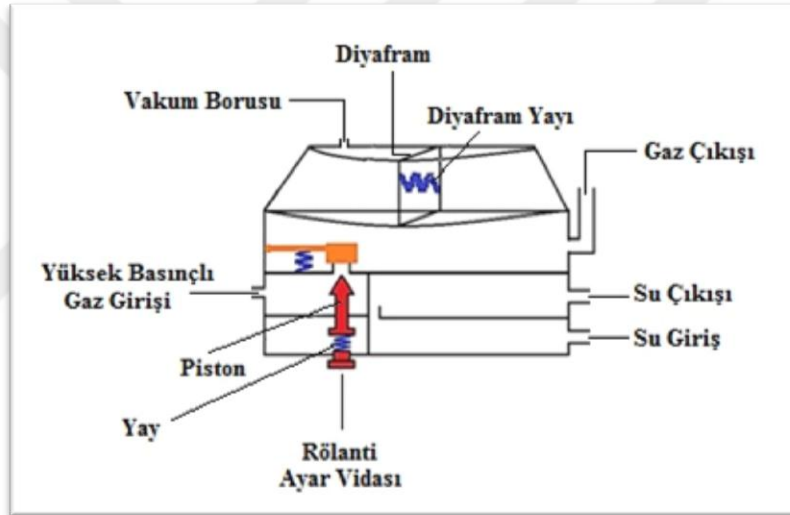
Regülatörler, taşıtın motor bölgesine monte edilirler. Yüksek basınç ile gelen sıkıştırılmış doğalgazın basıncı; regülatörde, motor çalışma basınç aralığına düşürülür ve sabitlenir. CNG regülatörleri, 300 bar giriş basıncına kadar dayanıklıdır. 300 bar'a kadar basınçtaki doğalgazın basıncını sistem basıncına kadar düşürebilmektedir. Pnömatik regülatörler, karbüratörlü motorlarda kullanılır. Elektronik regülatörler karbüratörlü ve enjeksiyonlu motorlarda kullanılır. Turbo regülatörler ise yüksek kapasiteli taşıtlarda kullanılır. Pnömatik, elektronik ve turbo olmak üzere üç farklı modelde üretilir. Sistemin en önemli parçalarından biri olmakla birlikte üç kademeli olarak çalışır. İkinci ve üçüncü kademe arasında bir elektro valf bulunur; bu elektro valf motorun kazara stop etmesi halinde devreye girerek gaz akışını keser. Birinci kademe, yüksek basınç 5 bar'a kadar düşürülür. Birinci kademe odacığında bir emniyet valfi vardır; yüksek basıncın 12 bar'ın altına düşürülemediği durumlarda, atmosfere boşaltmak suretiyle tahliye görevini görür, böylece regülatörü koruma altına alır [34].

Regülatörlerin gaz çıkış basıncı motor gücüne göre ayarlanır. 70 kW'a kadar olan motorlar için çıkış basıncı 0.9 bar olarak belirtilmektedir. 70kW ile 100 kW arasında olan motorlarda çıkış basıncı 1.4 bar olarak belirtilirken, 100 kW'tan daha fazla güç üreten motorlara ise 1.8 bar'lık basınçla gaz iletiminin gerçekleştirildiği belirtilmektedir [34]. Çok

nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi regülatörlerinde, enjektöre gönderilen doğalgazın basıncı genellikle 1.2-1.3 bar aralığındadır.

7.3.5.1. CNG Regülatörlerinin Yapısı

Regülatörün elektronik ve vakumlu olarak iki tipi vardır. Vakumlu regülatörlerin, LPG sisteminde kullanılan regülatörler ile yapı olarak fazla bir farkı yoktur. Elektronik tip regülatörlerde ise gövde ve kapak tamamen kompozit alüminyum malzemeden yapılmıştır. Su ısıtma odası, gaz odasından su/gaz muhafaza koşulu sağlanarak ayrılmıştır. Diyafram, contalar, yaylar, ECE R67.01 standartlarına göre CNG kullanımına uygun materyalden yapılmıştır [9]. CNG yakıt dönüşüm sistemi elektronik regülatörünün kısımlarını belirten görsel, şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7.7 CNG Elektronik Regülatörünün Kısımları

7.3.5.2. CNG Elektronik Regülatörlerinin Özellikleri ve Çalışması

Elektronik regülatörde, motora giden hat kontak ile birlikte çalışır. Gaz hattı açık olsa dahi, elektro valf ile gazın motora akışı kesilir. Gaz akış sisteminde, gaz basınç regülatöründen önce bir yüksek basınç manyetik kapama valfi vardır. Bu valf, motor elektronik kontrol ünitesi tarafından çalıştırılır. ECE R110’a uygun sistemlerde; bu valfin yerine, her gaz tankını açıp kapayan valf vardır. Emniyet tapalı elektromanyetik kapama valfi, akış sınırlayıcı, elle kapama vanası ve patlama plakası, bu valflere entegre edilmiştir. Regülatörün aktif hale geçebilmesi için üzerinde bulunan selenoid valfe gelen akım; tank üzerindeki selenoid valfe gelen akımla aynıdır. Normal pozisyonları kapalıdır. Regülatör

motor soğutma suyunun sıcak devresine bağlanır ve motora giden doğalgazın mümkün olduğu kadar 15°C civarında gitmesi sağlanır. Ancak, motor soğuk olsa dahi doğalgaz, gaz fazında bir yakıt olduğu için dış hava sıcaklığı ne olursa olsun motor çalışır. Kısaca motorun doğalgazla çalışması için, pilot yakıt kullanarak ön ısıtma yapma zorunluluğu yoktur [9].

7.3.6. Sıcaklık Sensörü

Motordan, regülatöre alınan suyun sıcaklık değerini ölçer ve ölçüm değerini ECU'ya iletir. Bu veriler doğrultusunda sistemin devreye geçişi sağlanır ve regülatörün ısı durumu kontrol edilir. Ucunda soket olan bir kablo yapısında olmakla birlikte, diğer ucunda iletim katsayısı yüksek metalden imal edilmiş ve içerisinde ısıl çift barındıran civatadan oluşmaktadır. İçerisinde ısıl çift bulunan civata, regülatör üzerindeki ilgili boşluğa sıkılır ve soketli uç ise ECU'ya bağlı olan elektrik tesisatına soket vasıtasıyla takılır.

7.3.7. CNG Filtresi

Filtre, regülatör gaz çıkına montajlanır ve regülatörden çıkıp enjektöre girecek olan gazı istikamet boyunca filtre eder. Regülatör çıkışına montajlanan filtre, regülatörden çıkan gazı filtre eder. Dolayısıyla filtreden sonra, sırasıyla MAP sensöründen ve gaz enjektörlerinden geçen doğalgaz filtre edilmiş doğalgazdır. CNG filtreleri tek yönlüdür ve gaz akış yönü belirtilmiştir. Filtrenin görevini yapabilmesi için gaz akış yönünde montajlanması gerekir.

7.3.8. MAP Sensörü

Bu sensörün görevi manifold mutlak basıncını ölçerek, verileri işlenmek üzere CNG sistemi elektronik kontrol ünitesine göndermektir. Emme manifoldu tepesinde merkez noktadan açılan bir delikle vakum alınır ve bu vakum borularla MAP sensörü üzerinden regülatör diyaframına iletilir. MAP sensörünün üzerinden aynı zamanda doğalgazın geçişi de sağlanır. Vakum ve gaz üniteleri ayrılmıştır.

7.3.9. CNG Enjektörleri

Genellikle CNG enjektörleri ortak bir hat üzerinde sıralı halde imal edilirler. CNG püskürtme enjektörleri; yeni nesil taşıtlara yapılan CNG yakıt dönüşümünün daha verimli olmasının sağlamak amacıyla geliştirilmişlerdir. Teknolojik yenilik içeren enjektörler, doğalgazın emme zamanında silindir içine püskürtülmesi görevini icra eder. İçlerinden gaz akan enjektör bileşenleri, yüksek debide gaz geçişine dayanım gösterecek şekilde üretilmişlerdir. Kısılma noktasından önce oluşan basınç kayıpları ve çalışma gürültüsü; özel bir akış kılavuzu vasıtasıyla asgari düzeye indirilmiştir. Standart bir tahrik kademesi vasıtasıyla tetiklenebilen selenoidin yüzeyi; içinde yağ barındırmayan doğalgaz ile kullanıldığı için, parçaların aşınmasını önlemek üzere özel olarak kaplanmıştır. Özel tasarımıyla daha önceden geliştirilmiş olan tüm doğalgaz enjeksiyon valflerinden çok daha üstündür. Emme manifoldlarının geometrisine bağımlı olmaksızın, mevcut olan tüm manifold geometrilerine kolaylıkla entegre edilebilmektedir. CNG enjektörlerine; sıkıştırılmış doğalgazın giriş basıncı genellikle 1.2-1.3 bar civarlarındadır.

7.3.10. CNG Sistemi Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU)

Sıralı CNG dönüşüm sistemlerinin çalışmasını sağlayan en önemli elemandır; çünkü motorun sıkıştırılmış doğalgaz ile optimum çalışması için gerekli olan verileri sensörler vasıtasıyla alır ve işlediği veri sonuçlarına göre CNG sistemini yönetir. Taşıtın ECU'suyla birlikte çalışmaktadır. Taşıtın motor devir hızını ve benzin enjektörlerinin çalışma zamanlarını referans alarak çalışır. ECU; CNG enjektörlerine, ayrı tahrik kademeleri vasıtasıyla kumanda eder. ECU'nun görevleri; gaz sıcaklığının verilerini almak, motor soğutma suyunun sıcaklık verilerini almak, MAP sensörü vasıtasıyla manifold mutlak basınç değerini almak, ateşleme zamanı verilerini almak, lamda sensöründen veri almak, gazın akışa geçmesi ya da kesilmesini yönetmek, CNG yakıtının devreye geçiş zamanını ayarlamak, CNG sistemine ait çalışma düzeni parametrelerini ayarlamak, gaz akış hızının düzenlenmesi ve CNG sistem basıncını düzenlenmesidir.

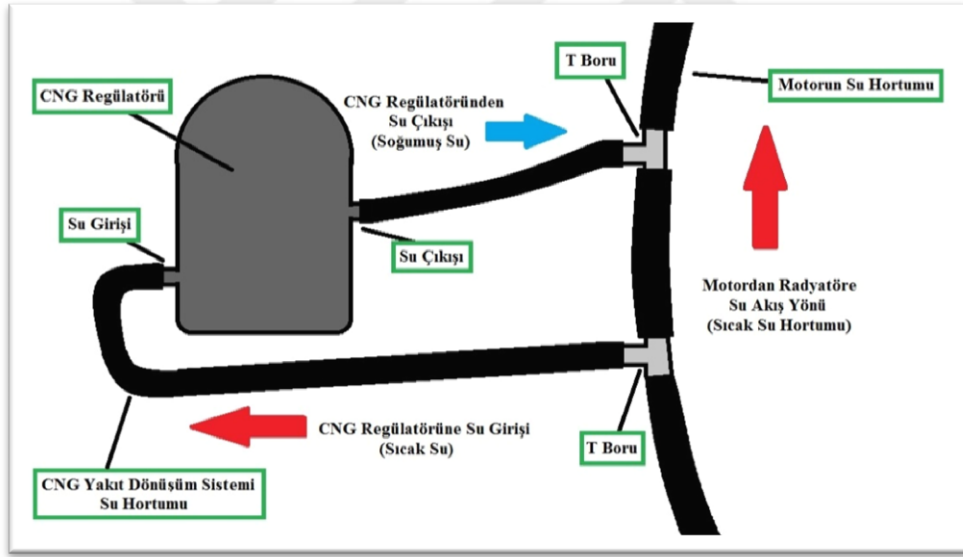
7.3.11. CNG Dönüşüm Sistemi Yakıt Seçme Anahtarı

Yakıt seçme anahtarı; motor çalıştırılırken kullanılacak olan yakıtı seçmek için veya bir başka deyişle CNG sistemini devreye almak ya da devreden çıkarmak için kullanılan

elemandır. Aynı zamanda üzerinde bulundurduğu göstergede, CNG tankında bulunan yakıt miktarını gösterir. Göstere vasıtasıyla, CNG sisteminin aktif/pasif olduğunu da göstermektedir. Yakıt seçici anahtarlar aynı zamanda sesli ikaz özelliğine de sahiptir, tankta bulunan sıkıştırılmış doğalgazın azalması durumun da veya sistemin otomatik olarak benzine geçmesi durumunda ikaz verir.

7.3.12. Su Hortumları

Su hortumları, motorun soğutma suyunu regülatöre ulaştırmada kullanılır. Motordan radyatöre giden sıcak su hortumu arasına T boru takılarak, sıcak suyun regülatöre ulaştırılması sağlanır. Suyun sıcaklığına dayanıklı olması ve esnek olmasından dolayı kauçuk malzemeden imal edilen hortumlar kullanılmaktadır.. Şekil 7.8’de, CNG yakıt dönüşüm sisteminin, su tesisatını oluşturan hortumların bağlantısı, şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7.8. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Su Tesisatı Şeması

7.3.13. CNG Akış Boruları ve Hortumları

Dolum ağzından, CNG tankına nakledilen doğalgaz yüksek basınçlıdır. Ayrıca CNG tankından, CNG regülatörüne nakledilen doğalgaz da yüksek basınçlıdır. Yüksek basınçlı gazların akışı, yüksek basınca dayanımlı özel borular içerisinde geçirilerek sağlanır. Yüksek basınç borularının görevi, yüksek basınçlı gazın dolum ağzından tanka ve tanktan da sisteme ulaşmasını sağlamaktır. Asgari olarak, 300 bar sistem basıncına kadar

dayanıklıdır. Bu borular, güvenlik açısından standartlara uygun özelliklerde ve mukavemette imal edilmektedir.

Regülatörden, enjektör gaz girişine ve enjektör gaz çıkış uçlarından emme manifolduna takılan giriş başlıkları arasına CNG hortumları takılarak; doğalgazın akışı sağlanır. Bu hortumlar, esnek ve 15 bar basınca dayanımlı malzemelerden imal edilmektedir.

7.3.14. Elektrik Tesisatı Kablo Demeti

CNG sisteminin elektronik bağlantılarının ve elektrik akışını sağlar. Soketli kablo demetlerinden oluşmaktadır. Kablo demetinin bir ucundaki soket ECU girişine takılır, diğer ucundaki soketler ise; regülatör, enjektör, map sensörü, yakıt seçme anahtarı soketlerine takılır. Ayrıca kablo demetinin soketsiz olan kabloları da; kontak bağlantısı, ateşleme bobini bağlantısı, benzin enjektörleri bağlantısı gibi soket karşılığı olmayan bağlantıları sağlar.

7.3.15. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Aksesuar Takımı

Bu elemanlar, dönüşüm sistemi montajında kullanılan sarf malzemelerdir. Aksesuar takımını oluşturan elemanlar:

- “T” su boruları,
- Hortum kelepçeleri,
- Plastik tesisat kelepçeleri,
- Sigorta takımları,
- Regülatör ve enjektör braketleri,
- Gaz giriş rekorları,
- Gaz başlıkları,
- Cıvata, pul ve somun takımları,
- Boru tesisatı kelepçeleri,
- Makaron borularıdır.

8. DENEY MATERYALLERİ

8.1. Deneysel Çalışma Süreçleri

Çalışmanın temel esası, homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motorda benzin ve doğalgaz yakıtlarının kullanımı sonucunda elde edilecek olan motor performans test verileri ve egzoz gazı emisyon ölçüm verilerini karşılaştırmak olduğundan dolayı; öncelikle benzinli bir motor deney motoru olarak seçildi. Seçilen deney motoru; 4 zamanlı, sıralı 4 silindirli, çift kam miline sahip 16 supaplı, homojen dolgulu, çok nokta enjeksiyonlu ve elektronik ateşleme sistemine sahip benzinli bir motordur. Deney motoru, bremze tezgâhına bağlanmadan önce yüksüz bir vaziyette çalıştırılarak gerekli bakım proseleri tamamlanıp, motorun çalışma düzeni kontrol edildi.

Deney motorunun bağlanacağı bremze tezgâhı orijinal halinde daha küçük silindir hacmine ve eski teknolojiye sahip bir motoru üzerinde barındırdığı için, öncelikli olarak tezgâh üzerinde bağlı olan motor sökölüp bağlantı için gerekli revizyonlar yapıldı. Bu hazırlık aşamalarında bir su terazisi kullanılarak motorun tezgâha yatay eksende düzgün bağlanabilmesi için motor takozlarının bağlanacağı bağlantı braketleri imal edildi. Braketlerin yapımında kare demir profil malzeme kullanıldı ve kaynak işlemiyle profillerin birleşimi sağlandı.

Motor bremze tezgâhına bağlandıktan sonra; soğutma suyu hortum tesisatları, elektrik tesisatı, yakıt (benzin) hattı tesisatları, hava filtre kutusu montajı, egzoz boru tesisatı bağlanmak suretiyle işlemler sırasıyla tamamlandı. Motorun kontrol paneli, bremze tezgâhının sehpasına montajlandı ve kablo bağlantıları yapıldı. Daha sonra motor çalıştırılıp, tezgah üzerindeki çalışma düzeni ve bremze tezgâhında yüklenmesi test edildi. Benzin yakıtıyla deney motorunun ideal çalışma düzeni sağlandı ve yapılması planlanan tüm deneyler için hazır olduğu tespit edildi. Daha sonra deney motoruna çok nokta enjeksiyonlu sıralı sistem CNG yakıt dönüşüm setinin montajlanması suretiyle bir takım montaj revizyonları yapılarak; deney motoru hem benzin yakıtıyla hem de sıkıştırılmış doğalgaz yakıtı ile seçimli çift yakıtlı olarak çalışır hale getirildi. Sıkıştırılmış doğalgaz; altı adet büyük ebatlı CNG tankının yukarıdan birbirine manifold sistemiyle bağlanması suretiyle oluşturulmuş palet halindeki tüp demetlerinden temin edildi. Endüstriyel tipteki CNG tankları hacimsel olarak büyük boyutlu olduğundan ve yüksek basınçta sıkıştırılmış

doğalgaz ihtiva ettiğinden dolayı atölye dışına konumlandırıldı. CNG tüp demetlerinde depolanan yüksek basınçlı sıkıştırılmış doğalgazın, regülatör vasıtasıyla basınç düşümü sağlanıp atölye içerisine düşük basınç boruları ile doğalgazın iletimi sağlandı.

Deneysel çalışmalar belirli bilimsel sınıflandırmalara göre çalışma esaslarını belirleyen metotlar topluluğundan oluşmaktadır. Deneysel çalışmalar hem araştırma ve geliştirme süreçlerinde hem de mevcut ürün geliştirme süreçlerinde gerek duyulan bir metot olduğu için; çalışmaya başlamadan önce çalışma planını ve parametrelerini belirleyen fizibilite çalışmalarıyla, çalışmanın ana konusunu oluşturacak ya da tamamlayacak olan alt metotlar belirlenir. Her deneysel çalışmanın bir amacı vardır, dolayısıyla deneysel çalışmalarda ölçülen fiziksel büyüklükler çalışmanın amacına ulaşması bakımından yüksek oranda önemlidir ve bu sebeptendir ki deneysel çalışmalar ve yapılan ölçümler mutlak vaziyette hassas çalışma gerektirmektedir. Bu çalışmada da deneysel çalışmanın gerekleri dikkate alınarak; parametreler ve metotlar belirlenmiştir. Benzin ve sıkıştırılmış doğalgazın deney motorunda yakılması halinde; motor performansları, egzoz gazı emisyonları, motor gürültüsü, motor titreşimi, yakıt tüketim değerleri ve sıcaklık ölçümleri alınarak doğrudan değerler veya hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler karşılaştırılmıştır. Fakat bu deneysel çalışmada kullanılan tüp demetlerinin fiziksel büyüklüğünden ve ağırlığından dolayı, her bir deney esnasında yakılan doğalgazın özgül yakıt tüketimi deneysel olarak ölçülememiştir. Ayrıca sıkıştırılmış doğalgaz yakıtının kullanılması halinde motor performansını artırmak için gerekli araştırmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışma ile elde edilen veriler tablolar halinde ve grafikler halinde gösterilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalara ve değerlendirmelere açıklama getirmek adına yorumlamalarda bulunulmuştur.

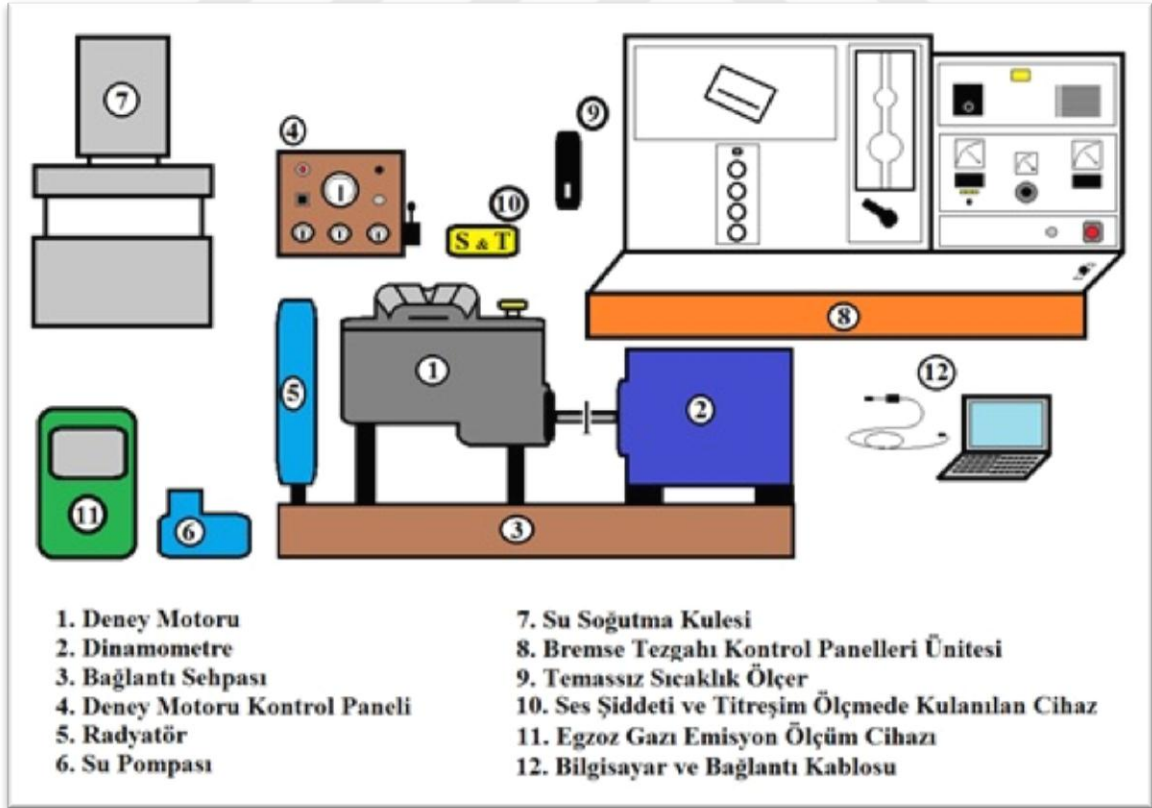
8.2. Deney Seti

Bu deneysel çalışmalarda kullanılan ana materyaller, test donanımları ve yazılımlar; bu çalışmanın deney seti olarak tanımlanmaktadır. Deney setini oluşturan elemanlar, ana maddeler halinde belirtilecek olursa:

- Cussons marka, P8602 model bremze tezgâhı
- Ford Marka, Zetec model, 1600cc silindir hacmine sahip benzinli motor

- Landi Renzo marka, çok nokta enjeksiyonlu sıralı sistem CNG dönüşüm seti
- Landi Renzo gaz yakıt dönüşüm sistemi için arayüz bağlantı donanımı
- Landi Renzo Omegas 3.2 arayüz yazılımı kurulmuş olan Windows işletim sistemine sahip notebook bilgisayar
- Bosch marka, BEA350 model egzoz gazı emisyon test cihazı
- Optris marka, MS-Pro model temassız ölçüm fonksiyonlu termometre
- CHY marka, 502 K/J model ısı çift fonksiyonlu dijital termometre
- Titreşim ölçüm ve ses şiddeti ölçüm yazılımlarının yüklenmiş olduğu Android işletim sistemine ve jiroskop sensörüne sahip LG marka cihaz
- Cryocan marka CNG tüp demeti
- Yüksek ve alçak debili basınç düşürücüler, vanalar ve tesisat elemanları
- Benzin ve sıkıştırılmış doğalgaz'dır.

Deney setinin şematik gösterimi, Şekil 8.1'de verilmiştir.



Şekil 8.1. Deney Setinin Şematik Gösterimi

8.2.1. Motor Bremze Tezgâhı

Motor bremze tezgâhları, hidrolik yüklemeli ve elektrik yüklemeli olarak iki türde imal edilmektedir. Aynı zamanda bremze tezgâhları farklı model ve özelliklerde imal edilerek sahip olduğu donanım dahilinde çeşitli fiziksel büyüklükleri ölçme ve gözleme olanağı sunabilmektedir.

Bu deneysel çalışmada; Cussons Multi Cylinder Engine Test Bed Eddy-Current P8602 modelindeki bremze tezgâhı kullanılmıştır. Dinamometrenin; maksimum yükleme kapasitesi 160 kW, maksimum hızı 8000 [dak⁻¹], maksimum döndürme moment 475 Nm'dir. Bu tezgahın sahip olduğu donanım dahilinde; motor moment ölçümü, yakıt tüketimi ölçümü, hava akışı, soğutma sıvısı akışı, motor devir sayısı, yüzde yük oranı, ortamdaki hava sıcaklığı, sıvı fazdaki yakıt sıcaklığı, yağ giriş sıcaklığı, egzoz manifold sıcaklığı, soğutma sıvısı giriş sıcaklığı, soğutma sıvısı çıkış sıcaklığı, kalorimetreye su giriş sıcaklığı, kalorimetreye egzoz gazı giriş sıcaklığı, kalorimetreden su çıkış sıcaklığı, kalorimetreden egzoz gazı çıkış sıcaklığı gibi fiziksel büyüklükler ölçülebilmektedir.

Deneysel çalışmada kullanılan bremze tezgâhı, öğrenim amacıyla tesis edilmiş ve düzenlenmiştir. Dolayısıyla bir eğitim seti vaziyetinde imal edilen bu bremze tezgâhı; orijinal halinde, üzerinde bir adet 1300cc silindir hacminde benzinli motor bulundurmaktadır. Orijinal halinde üzerinde bulunan motor, bu çalışma için gereken olanakları sağlamadığı için bir takım değişiklikler yapılarak; bremze tezgâhı deneysel çalışmada kullanılabilir hale getirilmiştir. Bremze tezgâhının üreticisi tarafından üzerine bağlanan içten yanmalı benzinli motor, eski teknolojiye sahip olduğu için; bu motor sökülmek suretiyle daha teknolojik ve daha büyük silindir hacmine sahip, daha güçlü bir motorla değiştirilmiştir.

Deneysel çalışmada kullanılan bremze tezgahına ait görseller Şekil 8.2'de gösterilmiştir.



Şekil 8.2. Bremze Tezgahına Ait Görseller

Çalışmada, deney motorunun yüklenmesi hidrolik dinamometre ile yapılmıştır. Dinamometrede bulunan pompa-türbin sistemi; motorun krank mili dönme yönünün tersi yönünde basınçlı su püskürterek, motoru frenlemektedir. Bu esnada oluşan frenleme momenti bir baskül düzeneği vasıtasıyla ölçülüp, tezgâhın üzerindeki dijital ekranda doğrudan moment olarak okunmaktadır. Yükleme işleminde basınçlı su kullanılmaktadır. Basınçlı su ile zorlamamanın sonucunda meydana gelen akışkan sürtünmesi, ısı enerjisi oluşturur. Oluşan ısı enerjisi sonucunda bremze tezgâhında kullanılan su ısınır. Hidrolik dinamometrelerde yükleme ünitesinin düzenli çalışabilmesi için statora giren su sıcaklığının maksimum 60°C olması gerekmektedir [56]. Fakat bu çalışmadaki deneyleri yapabilmek için bremze tezgâhına bağlanan motor daha büyük hacimli ve daha güçlü bir motor olduğundan dolayı tam yükleme durumlarında, su sıcaklığı 60°C 'nin üzerine çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı ısınan suyu soğutmak için; Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü atölyesinde bulunan ve bremze tezgâh suyunu soğutmak üzere tasarlanıp imal edilmiş olan soğutma tankı kullanılmıştır. Dinamometrede yükleme sonucunda ısınan su, bir pompa vasıtasıyla bina dışında bulunan soğutma tankı

kulesine basılır ve kule tepesinde bulunan soğutma fanı ile kule sistemindeki peteklerde soğutulur. Soğutulan su, kuleden durultma havuzuna akıtılıp, durultma havuzundan da depoya doldurulmak suretiyle soğutma işlemi tamamlanır. Bremze tezgâhının suyu, bu döngüde devam ettirilerek kullanılır. Bremze tezgâhı suyunu soğutmada kullanılan su kulesi Şekil 8.3'te gösterilmiştir.



Şekil 8.3. Dinamometre Tezgahı Su Kulesi

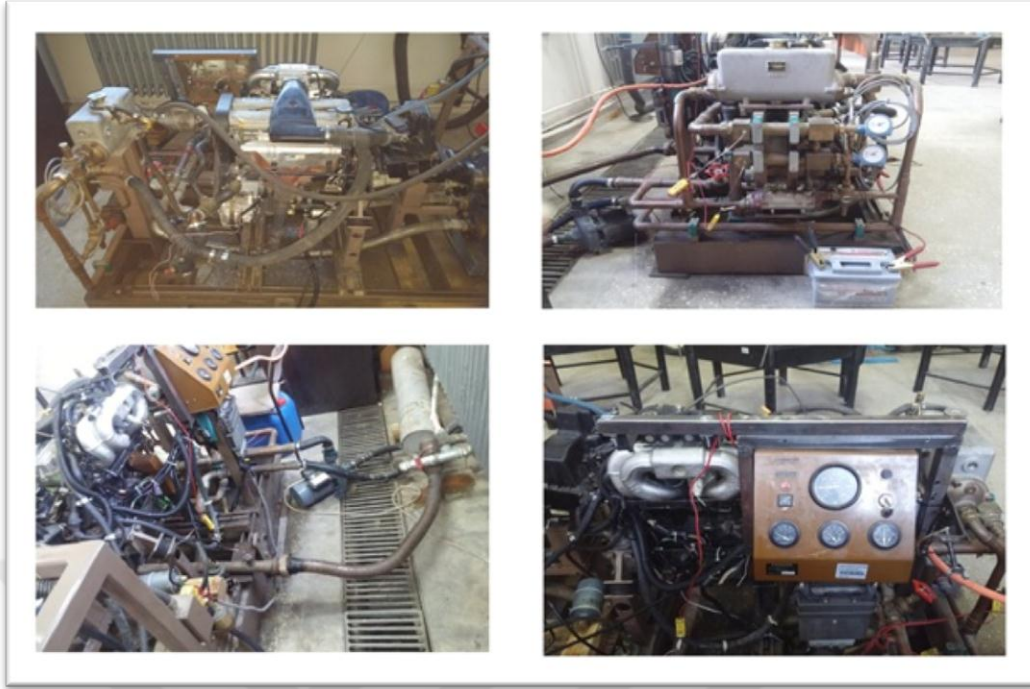
8.2.2. Deney Motoru

Deneylerde; Ford marka, Zetec model 1600 cm³ silindir hacmindeki bir motor, deney motoru olarak kullanılmıştır. Deney motoruna ait bilgiler ve motor üreticisinin belirttiği teknik veriler, Tablo 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.1. Deney Motoruna Ait Özellikler ve Teknik Veriler

<i>Deney Motoruna Ait Teknik Veriler</i>	
Motor Üreticisi	Ford Motor Company
Çevrim Türü ve Zamanı	Otto Çevrimi, 4 Zamanlı
Karışım Dolgu Tipi	Homojen Dolgulu
Yakıt Türü	Benzin
Silindir Çapı (mm)	76
Strok (mm)	88
Silindir Sayısı	4 (Sıralı Tip)
Toplam Silindir Hacmi (cm ³)	1597
Sıkıştırma Oranı	10.3
Motorun Maksimum Gücü	90 HP / 5500 dak ⁻¹
Motorun Maksimum Momenti	134 Nm / 3000 dak ⁻¹
Yakıt Sistemi	Çok Noktadan Enjeksiyonlu
Ateşleme Sistemi	Elektronik Ateşleme
Silindir Başına Düşen Valf Sayısı	4
Motorun Valf Yapısı	DOHC

Deney motorunda soğutma sistem olarak, bremze tezgâhının radyatörü ve soğutma donanımı kullanılmıştır. Deney motorunun; bremze tezgâhına kurulu halindeki görseller, Şekil 8.4’te gösterilmektedir.



Şekil 8.4. Deney Motorunun Bremze Tezgahına Kurulmuş Hali

8.2.3. Notebook Bilgisayar

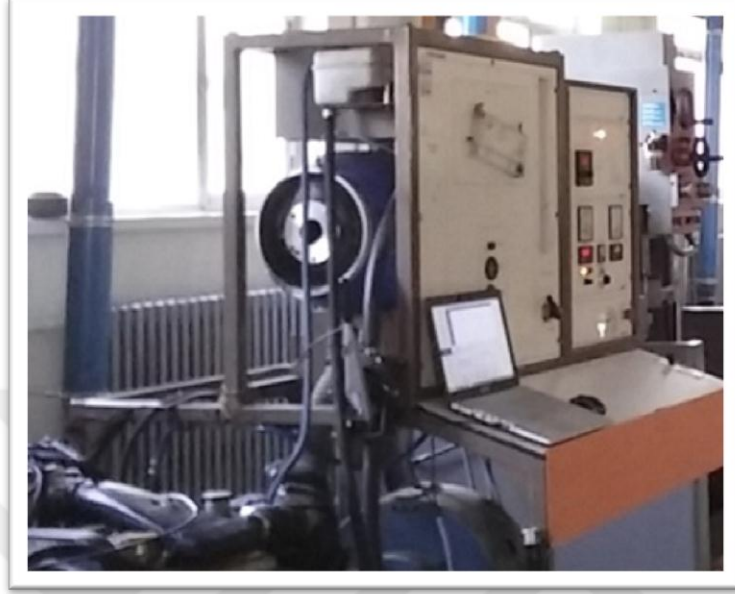
Bu çalışmada, Asus Marka N550JV-CN127H modelindeki bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayara ait bazı bilgiler ve teknik özellikler, Tablo 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.2. Bilgisayara Ait Bilgiler ve Teknik Özellikler

Marka ve Model	Asus N550JV-CN127H
İşlemci	İ7, 2.4 GHz, 4700HQ, 6MB Cache, Turbo Boost(3.4 GHz)
Bellek	16 GB, 1600 MHz
Ekran Kartı	4 GB, Nvidia GeForce GT750M
Hafıza Donanımı	HDD, 1 TB, 5400 RPM
Ekran	15.6 İnç, 1920x1080 P Çözünürlük

Bu deneysel çalışmada; bilgisayara, Landi Renzo Omega 3.2 arayüz yazılımı kurulmuştur. CNG yakıt dönüşüm sisteminin deney motoruna adaptasyonu, sistemin kalibrasyonu ve yapılandırma işlemleri yapılmıştır. Deney motorunda, CNG yakıtı yakılarak motorun çalıştırılması durumunda, sistemin çalışması gözlenmiş ve çeşitli parametreler doğrudan okunabilmiştir. Deneysel çalışma esnasında; CNG yakıt dönüşüm

sisteminin; bilgisayar aracılığıyla Omegas 3.2 arayüz yazılımı üzerinden kontrol edilmesi ve verilerin alınmasına ait görsel, Şekil 8.5'te gösterilmektedir.

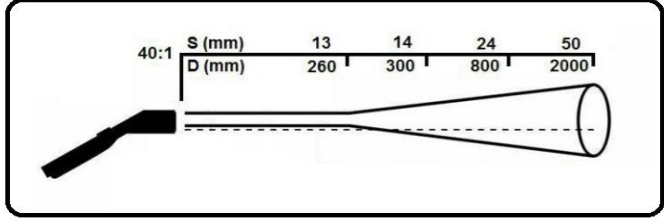


Şekil 8.5. Omegas 3.2 Yazılımı ile Sistem Kontrolü

8.2.4. Temassız Sıcaklık Ölçer Termometre

Bu deneysel çalışmada Optris marka MS-Pro modelindeki temassız sıcaklık ölçer fonksiyonlu termometre kullanılmıştır. Temassız sıcaklık ölçerin teknik özellikleri Tablo 8.3'te verilmiştir.

Tablo 8.3. Temassız Sıcaklık Ölçere Ait Teknik Özellikler

Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-32°C'den 760°C'ye kadar
Sistem Hassasiyeti	-32°C ile -20,1°C arasında $\pm 3^{\circ}\text{C}$
	-20°C ile -0,1°C arasında $\pm 2,5^{\circ}\text{C}$
	0°C ile 19,9°C arasında $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$
	20°C ile 760°C arasında $\pm 1^{\circ}\text{C}$
Optik Çözünürlük (D:S)	[40:1], 13mm (D<260mm) 
Ölçüm Hassasiyeti	0,1 °C
Tepki Süresi (%95)	300 ms
Uygun Ortam Sıcaklığı	0°C ile 50°C aralığında
Görüntüsel (Spektral) Alan	8µm – 14µm
Sıcaklık Ölçme Birimi	°C ve °F Seçimli

Bu deneysel çalışmada yüzey sıcaklıklarını ölçmek amacıyla kullanılan, Optris marka MS-Pro modelindeki temassız sıcaklık ölçere ait görsel Şekil 8.6'da verilmiştir.



Şekil 8.6. Optris Ms-Pro Temassız Sıcaklık Ölçer

8.2.5. Dijital Termometre

Deneysel çalışmalarda CHY marka, 502 K/J model ısı çift fonksiyonlu dijital termometre kullanılmıştır. Dijital termometrenin teknik özellikleri, Tablo 8.4'te verilmiştir.

Tablo 8.4. CHY 502K/J Dijital Termometreye Ait Özellikler

Sıcaklık Ölçüm Aralığı	-200°C'den 1370°C'ye kadar
Ölçüm Hassasiyeti	0.1°C
Sistem Hassasiyeti	% ±0.05
Sıcaklık Sensörü	K/J Tipi Isıl Çift
Sıcaklık Ölçme Birimi	°C ve °F Seçimli

Bu deneysel çalışmada ortam ve egzoz gaz sıcaklığını ölçmek amacıyla kullanılan CHY marka 502K/J modelindeki ısı çift donanımlı dijital termometreye ait görsel Şekil 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8.7. CHY 502K/J Isıl Çift Donanımlı Dijital Termometre

8.2.6. Landi Renzo Omegas 3.2 Arayüz Yazılımı ve Bağlantı Kablosu

CNG yakıt dönüşümü yapıldıktan sonra sistemde; ECU programlaması, yapılandırma, hata kontrolleri, adaptasyon işlemleri ve kalibrasyon ayarları yapabilmek ve için CNG yakıt dönüşüm sistemi imalatçısı tarafından sunulan Landi Renzo Omegas 3.2 arayüz yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca dönüşüm işlemi gerçekleştirilen motoru CNG yakıtı ile çalıştırma durumundaki bir takım parametreleri görüntülemek mümkündür. Arayüz yazılımının kurulu olduğu bilgisayar ile CNG yakıt dönüşüm sisteminin elektronik kontrol ünitesi arasında, sistem için özel imal edilmiş bir donanım kablosu ile bağlantı kurulup, bu işlemler gerçekleştirilmiştir.

Bu deneysel çalışmada Landi Renzo marka CNG yakıt dönüşüm sistemi kullanıldığından dolayı, üreticinin sunmuş olduğu güncel program olan Landi Renzo Omegas 3.2 arayüz yazılımı kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Omegas 3.2 arayüz yazılımına ait görsel Şekil 8.8’de verilmiştir.



Şekil 8.8. Landi Renzo – Omegas 3.2 Arayüz Yazılımı

Bilgisayar üzerinden, CNG yakıt dönüşüm sistemi elektronik kontrol ünitesine bağlantıyı sağlayan kablo donanımına ait görsel, Şekil 8.9’da gösterilmektedir.



Şekil 8.9. Landi Renzo Gaz Yakıt Dönüşüm Sistemi ECU-PC Arası Bağlantı Kablosu

8.2.7. Egzoz Gazı Emisyon Test Cihazı

Deneysel çalışmada, egzoz gazı emisyonlarının ölçülebilmesi için Bosch marka BEA-350 modelindeki egzoz gazı emisyon test cihazı kullanılmıştır. Bu cihazda; benzin, motorin, likit petrol gazı (LPG) ve sıkıştırılmış doğalgaz (CNG veya SDG) yakıtlarının yanması sonucu oluşan egzoz gazı emisyonları ölçülebilmektedir. Hem benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda hem de doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumlarında; farklı motor devirlerinde ve farklı yükleme koşullarında egzoz gazı emisyon değerleri bu test cihazı ile ölçülmüştür. Bosch BEA-350 egzoz gazı emisyon test cihazı; CO, CO₂, O₂ emisyonlarını hacimsel yüzdelik olarak, HC ve NO emisyonlarını hacimsel ppm olarak ölçmektedir. Ayrıca hava fazlalık katsayı değerini rakamsal olarak ölçmekte, hacimsel yüzde biriminde CO_{cor} (karbonmonoksit doğrulama) ölçümü ve propan faktörü ölçümü yapabilmektedir. Cihazda yapılan ölçümler, yine cihazın kendi yazıcısından çıktı olarak alınabilmektedir. Bu deneysel çalışmada kullanılan; Bosch marka BEA350 egzoz gazı emisyon test cihazına ait görsel, Şekil 8.10'da verilmiştir.



Şekil 8.10. BOSCH BEA350 Egzoz Gazı Emisyon Test Cihazı

8.2.8. CNG Dönüşüm Seti

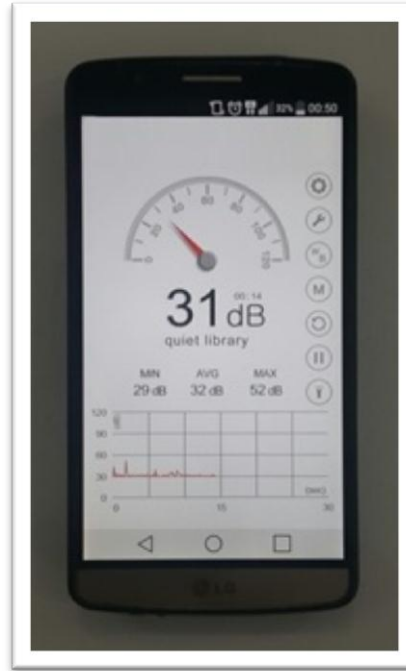
Bu deneysel çalışmada Landi Renzo marka çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi kullanılmıştır. Bu dönüşüm setinin elektronik kontrol ünitesi imalatçı tarafından EVO OBD kontrol ünitesi olarak tanımlanmakta ve kendini kalibre edebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca motorun diyagnostik sistemi ile etkileşim kurup, benzin enjektörlerinin gösterdiği çalışma karakteristiğine bağımlı olarak gaz enjektörlerini çalıştırabilmektedir. Kullanılan regülatör 300 bar'a kadar olan yüksek basınçlı sıkıştırılmış doğalgazı doğrudan alıp; gaz basıncını, enjektör giriş basıncına kadar düşürebilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan, CNG yakıt dönüşüm setini oluşturan elemanlar:

- CNG Regülatörü
- CNG Gaz Enjektörleri
- Elektronik Kontrol Ünitesi (ECU)
- Elektrik Tesisat Kabloları
- Yakıt Seçme Butonu



Şekil 8.12. Titreşim Yoğunluğu Ölçüm Yazılımına Ait Görsel

Yine aynı cihaza “Sound Meter Version 3.2.4” yazılımı kurularak, cihazın mikrofonu kullanılmak suretiyle ses şiddeti ölçümleri yapılmıştır. Ses şiddeti ölçüm yazılımının cihazda kullanımına ait görsel Şekil 8.13’de verilmiştir.



Şekil 8.13. Ses Şiddeti Ölçüm Yazılımına Ait Görsel

8.2.10. Benzin ve Sıkıştırılmış Doğalgaz

Bu deneysel çalışmada, BP Petrolleri A.Ş tarafından üretilen 95 oktan kurşunsuz benzin kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan benzinin bulunduğu depolama tanklarından alınan numunenin, Türk Akreditasyon Kurumu tarafından akredite edilmiş olan laboratuvar analiz sonuçları Tablo 8.5'te verilmiştir.

Tablo 8.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Benzinin Laboratuvar Analiz Sonuçları

Özellik	Özellik Kodu	Birim	Referans Sınır Değerleri		Ölçüm Belirsizliği	Ölçüm Değeri	Deneysel Yöntemi	
			En Az	En Çok				
Yoğunluk	100	kg/l	720	775	0,05	0,7433	TSEN ISO 12185	
Görünüş	120	-	Berrak Parlak		-	C&B	ASTM D04176	
Oksidasyon Kararlılığı	170	Dak	360	-	-	-	-	
Kaynama Noktası	Sonu	302	°C	-	210	0,05	199,9	TS 1232 EN ISO 3405
Damıtma	Kalıntı Oranı	318	% (v/v)	-	2	0,05	1,1	-
Buharlaştırma Yüzdelemleri	Buharlaştırma % (E70)	321	% (v/v)	20,0*	48,0*	0,06	36,8	-
	Buharlaştırma % (E100)	322	% (v/v)	22,0**	50,0**	0,06	66,0	-
	Buharlaştırma % (E150)	323	% (v/v)	46,0*	71,0	0,06	87,2	-
Buhar Basıncı	340	kPa	45,0*	60,0*	0,1	56,6	TS EN 13016-1	
Buhar Kilitlenme İndisleri	360	-	-	-	-	-	-	
Oksijen	410	% (m/m)	-	2,7	-	-	-	
Oksijenli Bileşikler	Metanol	421	% (v/v)	-	3	-	-	
	Etanol	422		-	5	-	-	
	İzo-propil alkol	423		-	10	-	-	
	İzo-bütül alkol	424		-	10	-	-	
	Tersiyer-bütül alkol	425		-	7	-	-	
	Eterler	426		-	15	-	-	
	Diğer Oksijenli Bileşikler	427		-	10	-	-	
Kurşun	530	mg/l	-	5,0	-	-	-	
Kükürt	540	mg/kg	-	10,0	0,1	5,6	TS EN ISO 20846	
Potasyum	580	mg/kg	8,0	20,0	-	-	-	
Mangan	610	mg/kg	10,0	50,0	-	-	-	
Benzen	640	% (v/v)	-	1,0	-	-	-	
Hidrokarbon Tipleri (Olefinler)	730	% (v/v)	-	21,0	-	-	-	
Hidrokarbon Tipleri (Aromatikler)	740	% (v/v)	-	35,0	-	-	-	
Araştırma Oktan Sayısı	800	-	95	97,9	-	-	-	
Motor Oktan Sayısı	810	-	85	-	-	-	-	
Bakır Şerit Korozyonu	910	Derece	1		-	-	-	

*Yaz

**Kış

Deneyselerde kullanılan doğalgaz; Ay-Tek Doğalgaz Firmasından, CNG Tüp demetleri içerisinde temin edilmiştir. Tüp demetlerinin dolununun yapıldığı, CNG dolum istasyonunda bulunan elektronik ölçüm cihazı ile gaz değerleri ölçülmüştür. Dağıtım lisans sahibi işletme tarafından elektronik cihazlardaki ölçüm değerlerinin uygunluğu ve normal olduğu kontrol edilmiştir. Deneyselerde kullanılan doğalgaza ait; bileşen kompozisyonu Tablo 8.6’da, özellikleri ise Tablo 8.7’de verilmiştir.

Tablo 8.6. Deneysel Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Bileşen Kompozisyonu

<i>Deneylerde Kullanılan Doğalgazın Karışım Kompozisyonu</i>		
Bileşen Adı	Bileşen Formülü	Bileşen Yüzdesi
Metan	CH ₄	%91,43698
Etan	C ₂ H ₆	%3,39899
Propan	C ₃ H ₈	%1,02553
İzo-Bütan	C ₄ H ₁₀	%0,18326
n-Bütan	C ₄ H ₁₀	%0,24211
İzo-Pentan	C ₅ H ₁₂	%0,06379
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	%0,05629
n-Hekzan	C ₆ H ₁₄	%0,04715
Nitrojen	N ₂	%3,02255
Karbondioksit	CO ₂	%0,52345

Tablo 8.7. Deneysel Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Özellikleri

<i>Deneylerde Kullanılan Doğalgazın Özellikleri</i>		
Özellik	Birim	Değer
Üst Isıl Değer	(kCal/m ³)	9208,2887
Alt Isıl Değer	(kCal/m ³)	8307,0329
Spesifik Gravite	-	0,60867
Yoğunluk	(kg/m ³)	0,74586
Atmosfer Basıncı	(Bar)	0,90409

8.2.11. CNG Tüp Demeti

Bu çalışmada yapılan deneyler; Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü atölyelerinde yapılmıştır. Anlaşılacağı gibi tüm deney setleri atölyede bulunmakta ve dolayısıyla bu deneysel çalışmanın ancak bir atölye şartlarında yapılması zorunludur. Bu sebepten dolayı sıkıştırılmış doğalgaz ile doldurulacak CNG

tanklarının atölyeye getirilip deneylerin atölyede yapılması gerekmektedir. Fakat Elazığ ilinde, CNG dolum istasyonu bulunmadığından ve tarafımızdan tedarik edilecek olan taşıt tipi CNG tanklarına, başka illerdeki CNG istasyonlarında sıkıştırılmış doğalgaz dolumu yaptırılarak; dolu haldeki CNG tankının atölyeye nakledilmesi için gerekli yasal izinler alınamadığından ve resmi engeller aşılamadığından dolayı endüstriyel tip CNG tankları temin etme yoluna gidilmiştir. Sonuç itibarı ile bu çalışmada palet tip CNG tüp demetleri, depo olarak kullanılmıştır. Palet tipteki CNG tankı, tüp demeti (bundle) olarak anılmaktadır. 6 adet CNG tankının üstten bir manifold aracılığıyla birbirine bağlanmasıyla oluşturulmuş palet yapısındadır. Şekil 8.14'te CNG tüp demeti gösterilmiştir.



Şekil 8.14. CNG Tüp Demeti

Tüplerin gaz çıkışını birbirine bağlayan manifold yapısının çıkışında bir adet vana bulunmaktadır. CNG tüp demeti manifold çıkışındaki vana, Şekil 8.15'te verilmiştir.

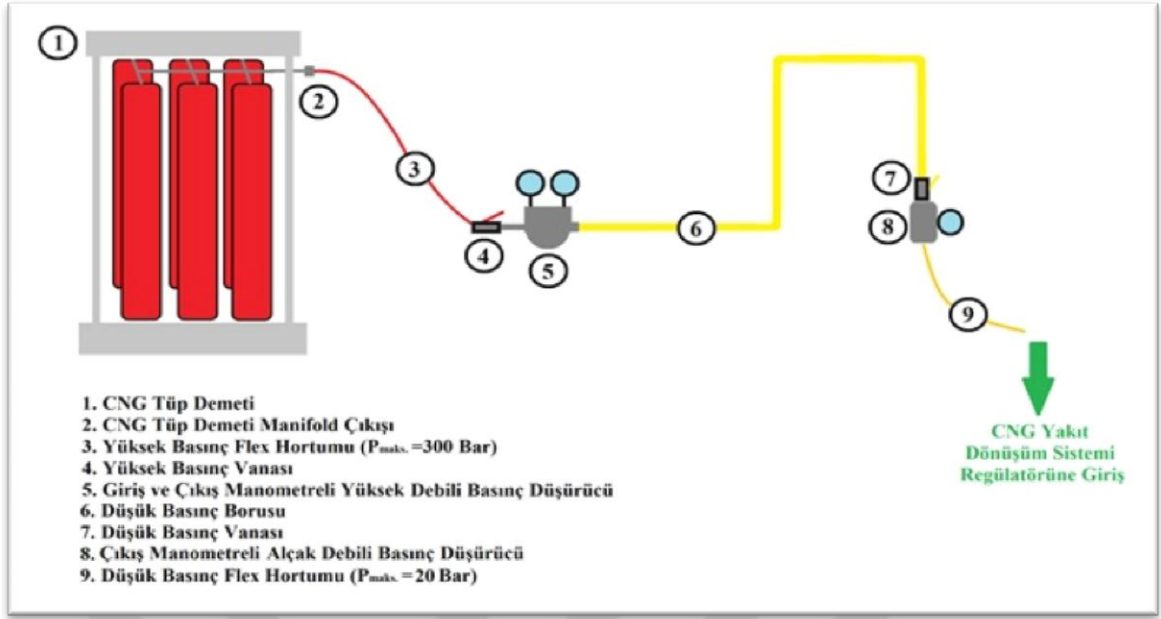


Şekil 8.15. CNG Tüp Demeti Manifold Çıkış Vanası

Tablo 8.8. CNG Tüp Demetine Ait Bilgiler

<i>CNG Tüp Demetine Ait Bilgiler</i>	
Tankın İmal Tarihi	2015
Gaz Cinsi	CNG
İşletme Basıncı	200 BAR
Test Basıncı	300 BAR
Demetteki Tüp Sayısı	6 Adet
Tankların Toplam Su Hacmi	900 LT
Boş Ağırlık	1038 KG
Dolu Ağırlık	1200 KG
Standart	TS EN ISO 10961

Tablo 8.8’de CNG tüp demetine ait bilgiler verilmiştir. Tüp demeti bina dışına konumlandırılıp, zemine sabitlenmiştir. Yüksek basınçlı doğalgazın basıncını düşürerek bina içerisine doğalgazın naklini sağlamak için tesisat çekilmiştir. CNG tesisatı, Şekil 8.16’da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 8.16. CNG Tesisatının Şematik Gösterimi

Tüp demetinin tepesindeki manifold çıkışından 300 bar basınca dayanıklı yüksek basınç flex hortumuyla, yüksek basınçlı sıkıştırılmış doğalgazın çıkışı sağlanmıştır. Yüksek basınç dayanımlı flex hortumun tesisattaki bağlantısı, Şekil 8.17’de gösterilmiştir.



Şekil 8.17. CNG Tesisatındaki Yüksek Basınç Dayanımlı Flex Hortumun Bağlantısı

Flex hortumunun sonuna bir adet yüksek basınç geçiş vanası takılarak gaz geçişi kontrol altına alınmıştır. Yüksek basınçlı sıkıştırılmış doğalgazın, yüksek debili basınç düşürücüde; basıncı düşürülüp, düşük basınç borularıyla bina içerisine gaz iletimi sağlanmıştır. Bina içerisindeki düşük basınç boruları Şekil 8.19’da gösterilmiştir. Kullanılan yüksek debili basınç düşürücünün üzerinde giriş ve çıkış basınçlarını gösteren manometre donanımı bulunmaktadır. Yüksek debili basınç düşürücü gaz armatürüne ait bilgiler ve teknik veriler, Tablo 8.9’da verilmiştir. Şekil 8.18’de ise yüksek debili basınç düşürücü gaz armatürü gösterilmiştir.

Tablo 8.9. Yüksek Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Bilgiler ve Teknik Veriler

<i>Yüksek Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Teknik Bilgiler</i>		
Marka		Kasweld
Giriş Basıncı		0-230 Bar
Çıkış Basıncı		0-10 Bar
Giriş Manometresi	Marka	Wika
	Dış Çap [mm]	50
	Manometre Basınç Aralığı	0-315 Bar
	Çalışma Basıncı	0-230 Bar
	Manometre Hassasiyeti	Cl. 2.5 (%2.5)
Çıkış Manometresi	Marka	Wika
	Dış Çap [mm]	50
	Manometre Basınç Aralığı	0-16 Bar
	Çalışma Basıncı	0-10 Bar
	Manometre Hassasiyeti	Cl. 2.5 (%2.5)



Şekil 8.18. Yüksek Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürü



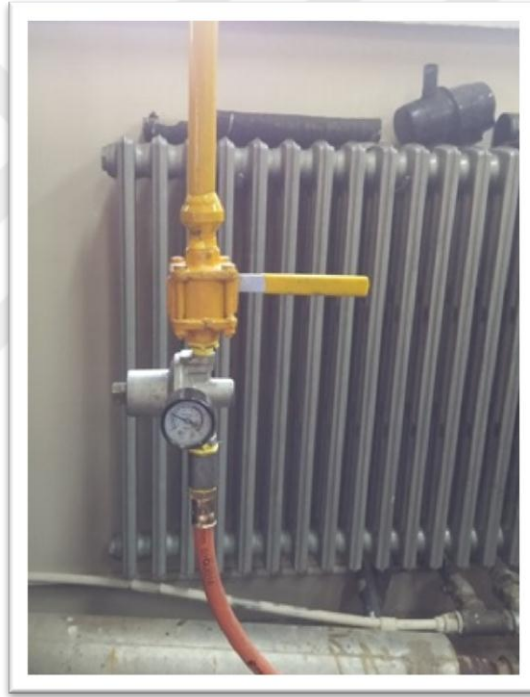
Şekil 8.19. Bina İçerisindeki Düşük Basıncılı Doğalgaz Boruları

Gaz geçişini kontrol edebilmek amacıyla; Şekil 8.19’da gösterilen bina içerisindeki düşük basınç borularının çıkışına, bir vana montajlandı. Vananın çıkışındaki gaz basıncını kontrol altında tutabilmek için güvenlik tedbiri olarak alçak debili basınç düşürücü takıldı. Alçak debili basınç düşürücüye ait bilgiler, Tablo 8.10’da verilmiştir.

Tablo 8.10. Alçak Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Teknik Veriler

<i>Alçak Debili Basınç Düşürücü Gaz Armatürüne Ait Teknik Bilgiler</i>	
Giriş Basınç Aralığı	0-12 Bar
Çıkış Basıncı Çalışma Aralığı	0,5-5 Bar
Manometre Basınç Aralığı	0-14 Bar

Bu basınç düşürücünün çıkışından 20 bar basınca dayanıklı flex hortumla, CNG yakıt dönüşüm sisteminin regülatörüne doğalgazın iletimi sağlandı. Bina içerisindeki tesisat çıkışında kullanılan vana, alçak debili basınç düşürücü ve düşük basınç dayanımlı flex hortum; Şekil 8.20’de gösterilmiştir.



Şekil 8.20. Bina İçi Tesisat Çıkışı

9. YÖNTEM VE METOT

9.1. Deneysel Çalışmadaki Yöntem ve Metot Süreçleri

Bu deneysel çalışmada homojen dolgulu benzinli bir motora CNG yakıt dönüşüm sistemi uygulanmıştır. Deney motoruna; CNG yakıt dönüşüm sisteminin uygulanmasıyla, hem benzin hem de doğalgaz yakıtı ile çalışabilir hale getirilmiştir. Deney motorunda, benzin ve doğalgaz yakıtlarının kullanılması durumlarında bir takım ölçümler ve hesaplamalar yapılarak, her iki yakıtın performans karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Yapılan deneylerde ölçülen ve hesaplanan fiziksel büyüklükler:

- Motor Moment Ölçümü
- Motor Güç Hesaplamaları
- Egzoz Gazı Emisyon Ölçümleri
- Hava Fazlalık Katsayısı Ölçümleri ve Hava Yakıt Oranı Hesaplamaları
- Özgül Yakıt Tüketimi Ölçüm ve Hesaplamaları
- Efektif Verim Hesaplamaları
- Özgül Enerji Maliyeti Hesaplamaları
- Sıcaklık Ölçümleri
- Gürültü Şiddeti Ölçümleri
- Titreşim Yoğunluğu Ölçümleridir.

9.2. Deney Motoruna CNG Yakıt Dönüşüm Sisteminin Uygulaması

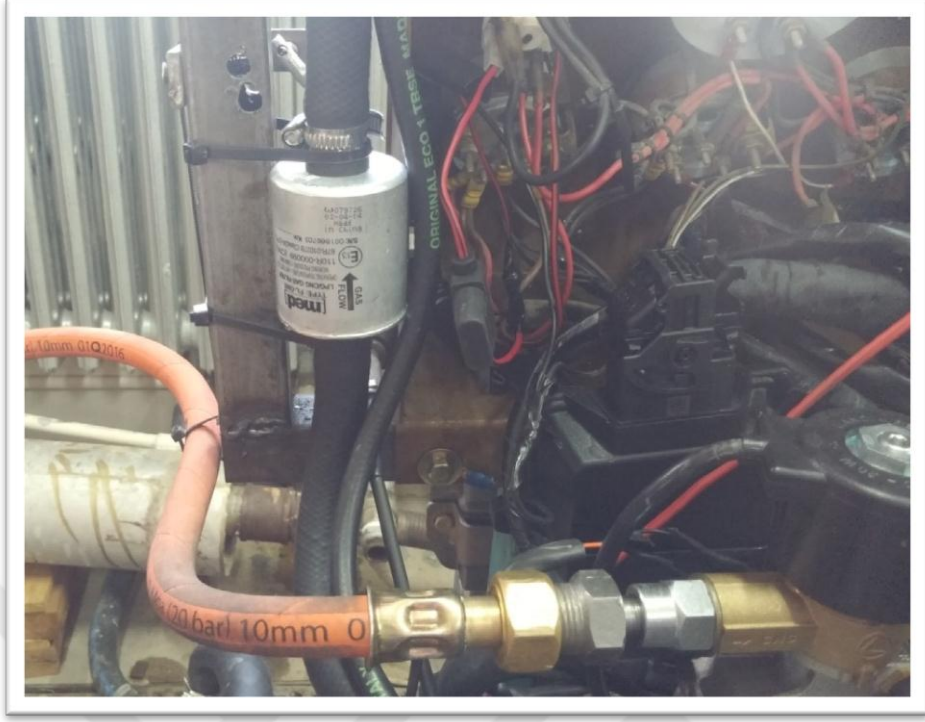
Ford marka, Zetec modelindeki, 1600 cm³ silindir hacminde, 4 zamanlı, 4 silindirli, çok nokta enjeksiyonlu ve elektronik ateşleme sistemine sahip olan deney motorunda; Landi Renzo marka, çok nokta enjeksiyonlu sıralı tip CNG yakıt dönüşüm sistemi kullanılarak doğalgaz ile çalışabilecek duruma getirilmiştir. Şekil 9.1'de, deney motoruna uygulanan CNG yakıt dönüşüm sistemi elemanları ve bağlantı şeması, şematik olarak gösterilmiştir.

giriş ve su çıkışı sağlandı. Deneysel çalışmada, CNG tüp demetleri kullanıldığından dolayı doğalgaz giriş hortumunun rekoru ile CNG yakıt dönüşüm sistemi regülatörünün gaz girişindeki rekor aynı çap ve dişli kalınlığında olmadığı için bağlantıyı sağlamak amacıyla torna tezgâhında bir adet ara bağlantı rekoru imal edildi. Ardından gaz giriş hortumu, regülatörün gaz giriş rekoruna bağlandı ve sızdırmazlık kontrolü yapıldı. Regülatörün gaz çıkışına gaz çıkış hortumları ve vakum girişine ise vakum hortumu bağlanarak regülatörün montajı tamamlandı. Montajı tamamlanmış haldeki regülatör, Şekil 9.2’de gösterilmiştir.



Şekil 9.2. CNG Regülatörünün Bağlantısı

Regülatörden çıkan basıncı düşürülmüş gazı iletecek olan gaz çıkış hortumu, CNG filtresinin girişine takıldı. CNG filtresi, plastik kelepçelerle gösterge panelinin arkasına sabitlendi. Burada CNG filtresinin görevi regülatörden çıkacak gazı filtre edip; kirlere arındırarak, CNG enjektörlerinin zarar görmesini önlemektir. Gaz yakıt filtreleri tek yönlüdür; gaz akış yönüne göre giriş ve çıkış hortumları takılmaktadır. CNG filtresinin montajlanmış hali, Şekil 9.3’te gösterilmiştir.



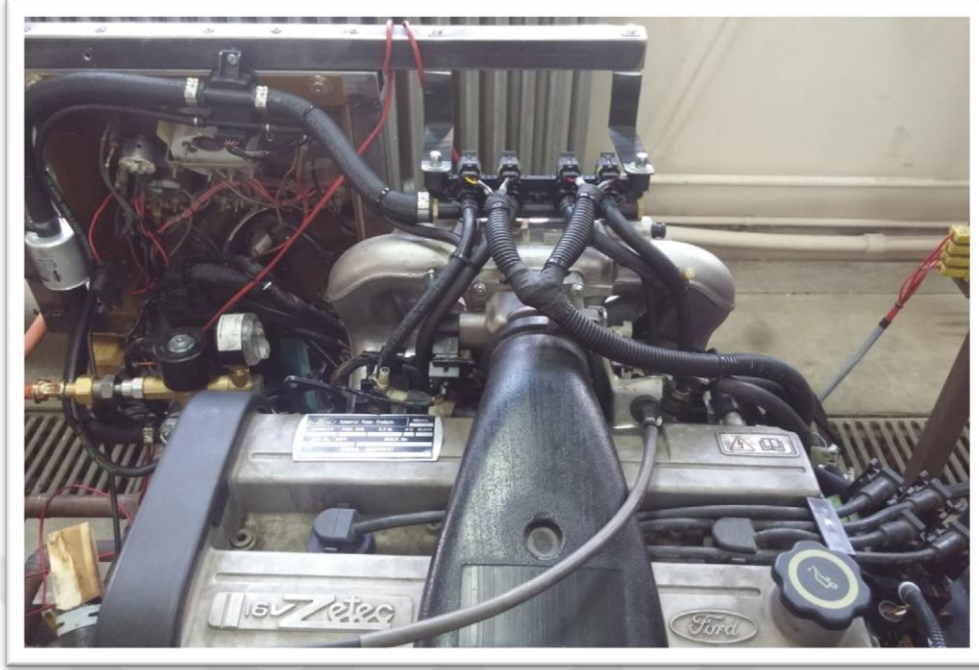
Şekil 9.3. CNG Filtresinin Bağlantısı

MAP sensörü CNG filtre çıkış hortumu, MAP sensörünün gaz girişine takıldı. Map sensörünün gaz çıkışı ise sıralı enjektör grubunun gaz girişine takıldı. Map sensörünün vakum çıkışına, regülatöre bağlanmış olan vakum hortumu bağlandı. Ardından emme manifoldu üzerine ortak bir noktadan delik açıldı ve bu deliğe bir manifold başlığı takıldı. Emme manifoldu ortak noktasına takılan manifold başlığına takılan vakum hortumunun diğer ucu, MAP sensörünün vakum girişine takıldı. MAP sensörü, emme manifoldu mutlak basıncını ölçmektedir ve ölçüm sonucundaki verileri sistemin elektronik kontrol ünitesine göndermektedir. Elektronik kontrol ünitesine gönderilen veriler işlenerek motora emilen hava miktarına göre enjektörlere gönderilmesi gereken gaz miktarı hesaplanır. MAP sensörünün montajlanmış hali, Şekil 9.4'te gösterilmiştir.



Şekil 9.4. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi MAP Sensörünün Bağlantısı

Belirlenen yerlere montajlanan enjektör taşıyıcı elemanların montajı yapıldıktan sonra enjektörler bu elemanların üzerine yerleştirilerek montajlandı. Enjektörlerin konumlandırılacağı yer belirlenirken emme manifolduna en yakın mesafedeki en uygun yer olmasına özen gösterildi. Daha sonra her bir silindire giden emme manifoldu kanallarına birer adet delik açılarak; açılan bu deliklere hortum başlığı montajlandı. Her bir silindire ait olan emme manifoldu kanallarına takılan hortum başlıklarına, CNG hortumları takıldı ve bu hortumların diğer uçları ise; sırasıyla gaz enjektörlerinin püskürtme uçlarına takıldı. Gaz enjektörlerinin montajlanmış hali, Şekil 9.5'te gösterilmiştir.



Şekil 9.5. CNG Enjektörlerinin Bağlantısı

Gösterge paneline, CNG yakıt dönüşüm sistemi kontrol butonu montajlandı ve butonun soket girişine takılan, soketli kablo demetinin tesisat bağlantıları yapıldı. CNG yakıt dönüşüm sistemi kontrol butonunun montajlanmış hali, Şekil 9.6'da gösterilmiştir.



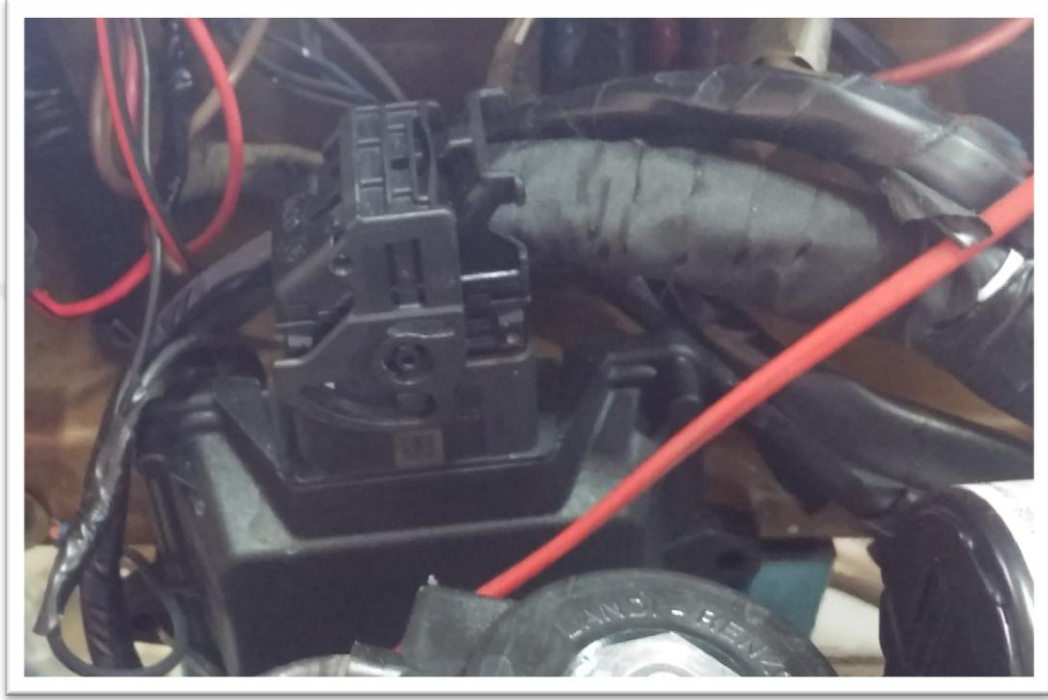
Şekil 9.6. Gösterge Üzerindeki CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Kontrol Butonu

Motor elektrik tesisatından elektrik alınarak, CNG yakıt dönüşüm sistemi elektrik bağlantısı sağlandı ve sisteme elektrik iletimini sağlayan pozitif (+) elektrik kablosu arasına bir adet 15 amper akım sınırına sahip sigorta yerleştirildi. Motorun kontağında paralel bağlantı ile kablo çekilerek sistemin elektrik tesisatına bağlantı sağlandı. Sistem için düzenlenen elektrik bağlantıları, kontak bağlantıları ve sigortaya ait görseller, Şekil 9.7’de gösterilmiştir.



Şekil 9.7. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Sigorta, Kontak ve Elektrik Bağlantıları

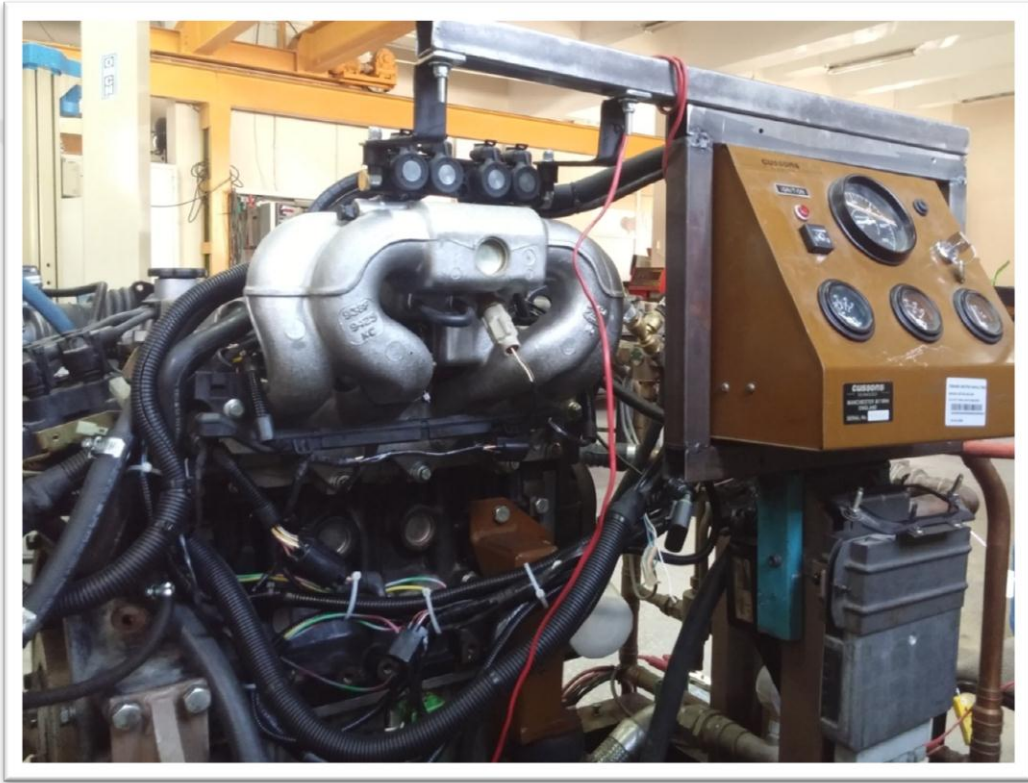
CNG yakıt dönüşüm sistemi elektronik kontrol ünitesi, gösterge panelinin arka yüzeyine montajlandı. Sistemin elektronik kontrol ünitesi soketine, sistemin elektrik tesisatının soketi takıldı. CNG yakıt dönüşüm sistemi elektronik kontrol ünitesinin montajlanmış hali, Şekil 9.8’de gösterilmiştir.



Şekil 9.8. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi ECU Bağlantısı

Dönüşüm sistemine ait tesisatın diğer soketlerinin ve açık uçlarının ise ilgili yerlerle bağlantısı sağlandı. Regülatör üzerindeki soket bağlantısı, MAP sensörü soket bağlantısı, her bir gaz enjektörü soket bağlantıları, kontrol butonu bağlantısı yapıldı. Ardından sistemin elektrik tesisatında bulunan ve benzin enjektörü kablolarına paralel bağlantı yapılması gereken kabloların bağlantıları yapıldı. Benzin enjektörleri kablolarına, CNG sistemi kabloları paralel bağlanırken bağlantı şemasına göre işlem yapıldı. Her kablo sıralı olarak ilgili enjektörün kablosuna paralel bağlanırken; enjektörden sinyal gelişini ve sinyal gönderimini yapan kablolarla, kontrol edilerek bağlandı. Ardından regülatör üzerine montajlanan sıcaklık sensörü kablosunun açık uçları, elektrik tesisatındaki ilgili kablolarla bağlandı. Deney motoruna uygulanan CNG yakıt dönüşüm sistemine ait elektrik tesisatını oluşturan tüm kablolar makaron borular içerisine alınarak tesisatın korunması sağlanmıştır. Gaz yakıt dönüşüm sistemlerinde motorun ateşleme bobini kablolarından sistemin elektrik

tesisatına bağlantı yapılır ve bu vasıtaıyla; yakıt dönüşüm sisteminin motor devrini ölçmesi sağlanır. Fakat bu deneysel çalışmada kullanılan dönüşüm sisteminin elektronik kontrol ünitesi EVO OBD tipinde olduğundan dolayı; motorun ateşleme bobini kablolarından, CNG yakıt dönüşüm sistemi elektrik tesisatına bağlantı yapılmamıştır. Bu sistemde, motor devri; benzin enjektörleri kabloları arasına girilen tesisat bağlantısı aracılığıyla ölçülmektedir. Dönüşüm sistemine ait elektrik tesisatına ait görsel, Şekil 9.9'da gösterilmiştir.

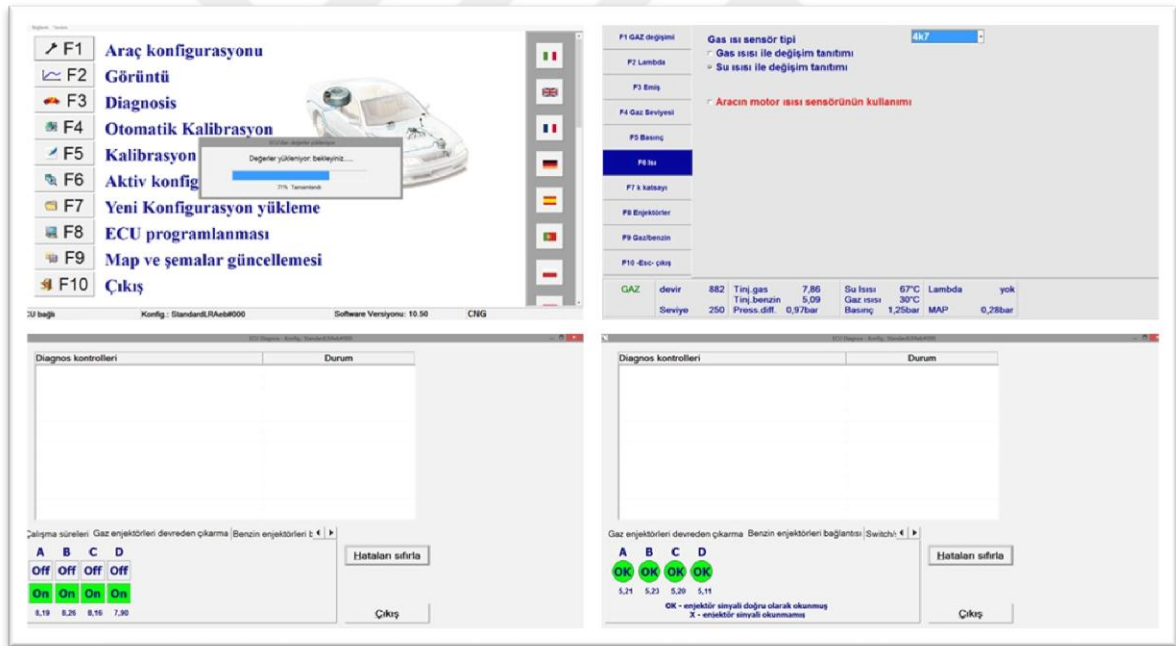


Şekil 9.9. CNG Yakıt Dönüşüm Sistemi Elektrik Tesisatı

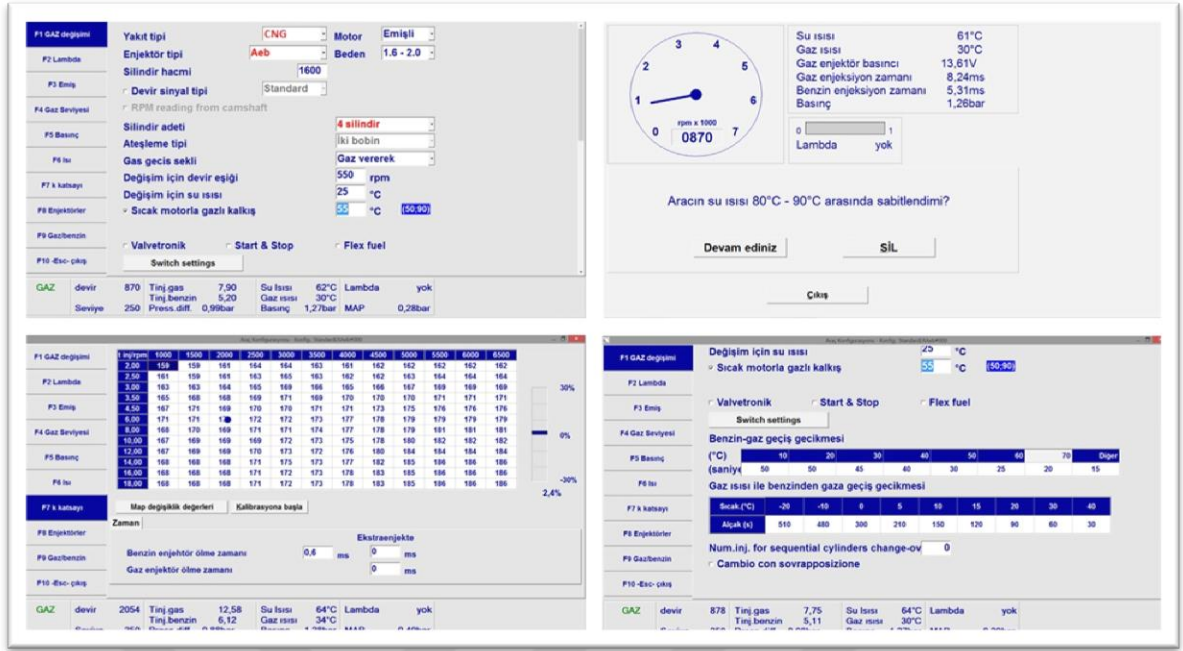
CNG yakıt dönüşüm sisteminin mekanik ve elektrik bağlantıları yapıldıktan sonra sistemin yazılım kurulumu ve kalibrasyon işlemlerine başlandı. Landi Renzo Omega 3.2 arayüz yazılımı kurulmuş olan bir bilgisayar ile Landi Renzo Gaz Yakıt Dönüşüm Sistemleri için imal edilmiş bir bağlantı kablosu kullanılarak, deney motoruna dönüşümü gerçekleştirilen sistemin elektronik kontrol ünitesi arasında bağlantı kuruldu. Sistemin kontrolü sağlandı ve ardından otomatik yazılım kurulumu yapıldı. Daha sonra bilgisayar üzerinden sistemin kontrolü ve kalibrasyon işlemleri gerçekleştirildi. Motor bir süre doğalgaz ile çalıştırılarak; regülatörden enjektörlere kadar uzanan tüm gaz hortumlarının

sızdırmazlığı kontrol edildi. Tüm bu işlemlerin ardından deney motoru hem benzin hem de doğalgaz ile çalışabilir hale getirildi. Yakıt seçme kontrol butonu gaz konumundayken; motor ilk çalışmada benzinle çalışacak ve motordan radyatöre dönen su sıcaklığı 25°C'ye ulaştığında, benzin enjektörleri kapatılıp gaz enjektörlerinin açılması suretiyle doğalgazla çalışacak halde ayarlandı. Yazılım ve bağlantı kablosu kullanılarak, bilgisayar üzerinden yapılan:

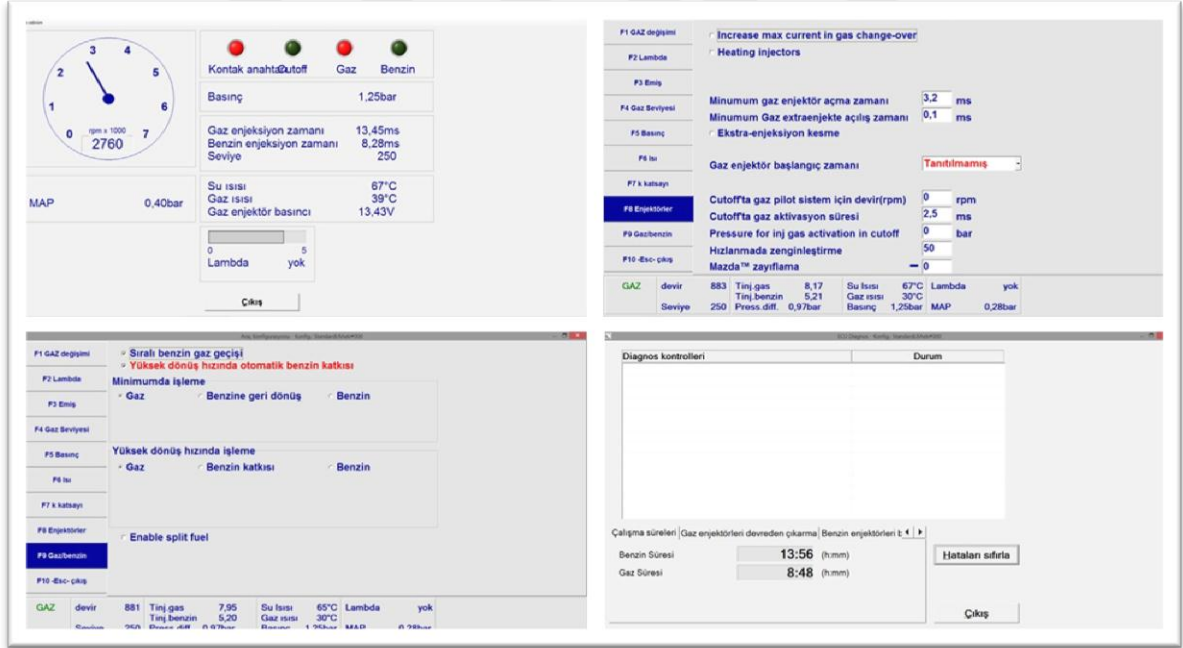
- Kurulum ve diyagnostik (kablo, soket, enjektör bağlantıları) kontrollerine ait işlemler; Şekil 9.10'da,
- Konfigürasyon işlemleri; Şekil 9.11'de,
- Sistemin ayar ve adaptasyonları ile son kontrol işlemleri ise Şekil 9.12'de gösterilmiştir.



Şekil 9.10. Kurulum ve Diyagnostik Kontrol İşlemleri



Şekil 9.11. Konfigürasyon İşlemleri



Şekil 9.12. Sistemin Ayar ve Adaptasyonları ile Son Kontrol İşlemleri

9.3. Motor Momentinin Ölçülmesi

Cussons marka P8602 modelindeki bremse tezgâhına bağlı olan deney motoru hem benzin hem de doğalgaz yakıtları ile çalıştırılıp, yüklenerek moment ölçümleri yapılmıştır. Motorun yüklemesi, bremze tezgâhına ait olan hidrolik kavramalı dinamometre ile yapılmıştır. Hidrolik dinamometreye, pompa ile gönderilen su depodan çekilmektedir. Hidrolik frenlemeli olan bu dinamometre; rotor, stator, moment kolu ve teraziden oluşmaktadır. Bu düzenek dâhilinde; rotor ile stator arasına giren basınçlı su, yine rotor ve stator arasında sıkışarak, deney motorunun dönme yönünün tersi yönünde bir direnç oluşturur. Ters yönde oluşturulan direnç sonucunda deney motoru yüklenmektedir. Yükleme sonucunda statorda oluşan direnç kuvveti, moment kolu ile teraziye aktarılır. Moment kolu sabit olduğundan dolayı; moment değeri, bremze tezgâhının gösterge panelindeki hem dijital ekranda hem de analog kadranda doğrudan okunmaktadır.

Bu deneysel çalışmada, deney motorunun moment ölçümüne; 1500 [dak⁻¹] devirde başlanmıştır. Yapılacak yükleme ile motor devrinin rölanti sınırının altına düşmesini önlemek amacıyla daha alt devirlerde motor yüklenmemiş ve dolayısıyla moment ölçümü gerçekleştirilmemiştir. Daha sonra, devir sayısını 500'lük periyotlarda artırarak 5500 [dak⁻¹] devire kadar yükleme yapılmış ve bu periyotlarda moment ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Yükleme yapılan deney motorunda, rölanti sınırının altına inilmesi veya motorun mukavemet sınırının üzerine çıkılması durumunda; deney motoru hasar görebilecektir. Motor moment ölçümlerinde belirlenen her devir sayısında ölçüm yapıldıktan sonra motor devir sayısı 500'er artırılıp, yükleme miktarı da ulaşılabilen maksimum değere kadar artırılmıştır. Devir sayısı artırımı deney motorunda gerçekleştirilirken, yük artırımı ise dinamometrede gerçekleştirilmektedir. İki farklı makinanın bir birinden bağımsız çalışmasından dolayı; anlık devir düşmesi veya anlık aşırı yükleme durumları gelişebileceği göz önünde bulundurulmuştur. Bu sebepten dolayı olası durumların yaşanması halinde, deney motorunun mukavemet sınırını aşmaması için veya rölanti sınırının altına düşmemesi için 5500 [dak⁻¹] motor devir sayısının üzerindeki devirlerde ve 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısının altındaki devirlerde deney motoru yüklenmemiştir. Motor momentinin ölçümü, Şekil 9.13'te gösterilmiştir.



Şekil 9.13. Motor Momentinin Ölçülmesi

9.4. Motor Gücünün Hesaplanması

Bu çalışmada kullanılan bremze tezgâhının kontrol panelindeki moment gösterge ekranında; dinamometre ile ölçülen deney motorunun momenti doğrudan okunabilmektedir. Bu çalışmada deney motorunun moment ölçüm verilerine göre, motor gücü hesaplanmıştır. Motor gücünün hesaplanmasında kullanılan formül, denklem 9.1’de verilmiştir.

$$P_e = \frac{M_d [Nm] * n [dak^{-1}]}{9549,3} [kW] \quad (9.1)$$

Pe: Efektif Güç [kW]

Md: Motor Momenti [Nm]

n: Devir sayısı [dak⁻¹]

9549: Sabit Değerdir.

9.5. Hava Fazlalık Katsayısının Ölçülmesi

Bremse tezgâhına bağlı olan deney motoru hem benzin hem de doğalgaz yakıtları ile çalıştırılıp; tam gaz açıklığında, tam yükleme şartlarında hava fazlalık katsayısı ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler; Bosch marka BEA350 modelindeki egzoz gazı emisyon test cihazı ile egzoz gazının susturucu çıkışından alınması suretiyle gerçekleştirilmiştir.

9.6. Hava/Yakıt Oranlarının Hesaplanması

Tam yanma denklemi oluşturularak teorik hava/yakıt oranı kütleli olarak hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan Bosch marka BEA350 modelindeki egzoz gazı emisyon test cihazı ile susturucu çıkışından yapılan egzoz gazı emisyon testlerinde ölçülen hava fazlalık katsayısı; hava/yakıt oranını hesaplamada bir parametre olarak kullanılmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan formül; denklem 9.2’de verilmiş olup, denklem 9.3 ve denklem 9.4’te ise hava fazlalık katsayısı formülünün bağımlı olduğu formüller verilmiştir.

$$\lambda = \frac{AFR_{Gerçek}}{AFR_{Teorik}} = \frac{\frac{m_{hava,gerçek}}{m_{yakıt,gerçek}}}{\frac{m_{hava,teorik}}{m_{yakıt,teorik}}} \quad (9.2)$$

Burada;

λ = Hava Fazlalık Katsayısı

$$AFR_{Gerçek} = Gerçek \frac{Hava}{Yakıt} \text{ Oranı} \quad (9.3)$$

$$AFR_{Teorik} = Teorik \frac{Hava}{Yakıt} \text{ Oranı} \quad (9.4)$$

$m_{hava,gerçek}$ = Tüketilen Gerçek Hava Kütlesi [kg]

$m_{yakıt,gerçek}$ = Tüketilen Gerçek Yakıt Kütlesi [kg]

$m_{hava,teorik}$ = Tüketilen Teorik Hava Kütlesi [kg]

$m_{yakıt,teorik}$ = Tüketilen Teorik Yakıt Kütlesi [kg]’dır.

Teorik hava-yakıt oranı kütleli olarak hesaplanıp, hava fazlalık katsayısı test cihazı ile ölçüldüğünden; bu değerler bilinmektedir. Bu değerlere göre gerçek hava-yakıt oranı da kütleli olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar hem benzinle çalışma durumu için hem de doğalgazla çalışma durumu için yapılmıştır.

9.7. Özgül Yakıt Tüketiminin Ölçülmesi

Motorun farklı çalışma şartlarında tükettiği benzin miktarını ölçmek için bremze tezgâhının yakıt tüketimi ölçüm donanımı kullanılmıştır. Bu donanım bir ölçümlemeli pipet tüp yapısındadır. Bremze tezgâhının benzin deposuna doldurulan benzinden pipet tüpe benzin çekildi. 50 ml ve 100 ml referans sınırları belirlenmiş olan bu pipetin içerisine alınan benzinin ne kadar sürede tüketildiği belirlendi. Test süresini belirlemek için 10^{-2} saniye hassasiyetli kronometre kullanılmıştır. Yakıt tüketim ölçümüne başlanmadan önce motorun kararlı rejime ulaşması beklenilmiştir. Motor kararlı rejime ulaşmadan önce; ölçekli pipet tüpün vanası kapatılıp, doğrudan depodan gönderilen benzinle motor çalıştırılmıştır. Motor kararlı rejime ulaştığında ölçekli tüpün vanası açılarak, ölçekli pipet tüpte belirlenen referans sınırlar arasındaki 100 ml benzin bitinceye kadar geçen süre belirlenmiştir. Tüketilen benzinin hacimsel miktarının ölçümüne ait görsel, Şekil 9.14'te verilmiştir.



Şekil 9.14. Tüketilen Benzinin Hacimsel Miktarının Ölçülmesi

Hacimsel tüketim miktarı ölçülen benzinin, kütleli miktarı hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan formül, denklem 9.5'te verilmiştir.

$$m_{Tüketilen, Benzin} = V_{Tüketilen Benzin} * \rho_{Benzin} \quad (9.5)$$

$$m_{Tüketilen, Benzin} = \text{Tüketilen Benzinin Kütleli Miktarı [kg]}$$

$$V_{Tüketilen Benzin} = \text{Tüketilen Benzinin Hacmi [lt]}$$

$$\rho_{Benzin} = \text{Benzinin Yoğunluğu [kg/lt]}$$

Kütleli benzin tüketim miktarı hesaplandıktan sonra, benzinle çalışma durumundaki özgül yakıt tüketim değeri, denklem 9.6'da verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$be [gr/kWh] = \frac{3600 * m_{Tüketilen Benzin} [gr]}{Pe [kW] * \Delta t [sn]} \quad (9.6)$$

Bu deneysel çalışmada palet halinde üstten dağıtıcı manifold ile birleştirilen CNG tüp demetleri kullanıldığından dolayı, tüketilen doğalgazın kütleli veya hacimsel tüketim

miktarı deneysel olarak ölçülemediği. Bu sebepten dolayı deneyler esnasındaki doğalgazın kütleli tüketim miktarı hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan formül; denklem 9.7’de verilmiş olup, denklem 9.8’de ise düzenlenerek sadeleştirilmiştir.

$$m_{T,Benzin} * \left[\frac{1}{\left(\frac{m_Y}{(m_H * \lambda) + m_Y} \right)} \right]_{Benzin} * Hu_{Benzin} = m_{T,Doğalgaz} * \left[\frac{1}{\left(\frac{m_Y}{(m_H * \lambda) + m_Y} \right)} \right]_{Doğalgaz} * Hu_{Doğalgaz} \quad (9.7)$$

$$m_{T,Benzin} * \left[(AFR_{Gerçek})_{Benzin} + 1 \right] * Hu_{Benzin} = m_{T,Doğalgaz} * \left[(AFR_{Gerçek})_{Doğalgaz} + 1 \right] * Hu_{Doğalgaz} \quad (9.8)$$

Bu denkleme göre tüketilen doğalgazın kütleli miktarı bulunduğundan sonra özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır. Her iki yakıtın özgül yakıt tüketimi karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

9.8. Efektif Verimin Hesaplanması

Özgül yakıt tüketim değerleri hesaplandıktan sonra denklem 9.9’daki formül ile her iki yakıt türünün yanması sonucundaki efektif verim hesaplanmıştır.

$$\eta_e = \frac{3600 * 10^3}{Hu * be} \quad (9.9)$$

Burada;

η_e : Efektif Verim

Hu : Tüketilen Yakıtın Alt Isıl Değeri [kJ/kg]

be : Özgül Yakıt Tüketimi [gr/kWh]

3600: Birim Dönüşümü İçin Sabit Katsayı’dır.

9.9. Özgül Enerji Maliyetinin Hesaplanması

Özgül yakıt tüketim değerlerine göre; özgül enerji tüketim maliyeti hesaplanmıştır. Özgül yakıt tüketimiyle birim zamanda birim güç başına tüketilen kütleli yakıt miktarıdır. Doğalgaz ve benzinin birim fiyatlarına göre; birim kütlelerinin fiyatları hesaplanmıştır.

Daha sonra birim ktle fiyatı belirlenen yakıtın, birim zamanda birim güç başına maliyeti hesaplanmıştır.

9.10. Titreşim Yoğunluğunun Ölçülmesi

Bu deneysel çalışmada, CNG yakıt dönüşümü yapılarak hem doğalgaz yakıtıyla hem de benzin yakıtıyla çalıştırılabilir hale getirilen 1600 cc hacimdeki Ford marka Zetec model buji ateşlemeli deney motorunda; hem benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda, hem de doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumlarında motorda oluşan titreşim şiddetleri ölçülerek karşılaştırılmıştır. Motor yüklenmeden ve rölanti devrinde çalıştırılarak, titreşim şiddeti ölçümleri yapılmıştır.

Her iki yakıtında yakılması durumunda mevcut fiziki şartlar korunup, deneyler aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Android tabanlı bir titreşim ölçüm yazılımının yüklendiği cihaz ölçümlerde kullanılmıştır. Cihaz, deney motorunun supap kapağı üzerinde sabit tutulmak suretiyle kalibrasyon ayarları yapıldıktan sonra hem benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda hem de doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumlarında; birer dakikalık periyotlar halinde titreşim yoğunluğu ölçülmüştür.

Deneyselerde kullanılan titreşim ölçüm yazılımı değiştirilmiş mercalli yoğunluk ölçeği (The Modified Mercalli Intensity Scale) prensibine göre çalışmaktadır. Yazılımın yüklendiği cihazda bulunan jiroskop sensörü vasıtasıyla sarsıntıların yönü ve fiziksel büyüklükleri algılanır ve veriler işlendikten sonra titreşimin şiddeti yoğunluk ölçeği üzerinden okunur. Bu yoğunluk ölçeği sarsıntıdan yıkıma kadar olan yoğunluk seviyelerinden oluşmaktadır. Matematiksel bir karşılığı yoktur, fakat titreşimin gerçekte oluşturduğu etkileri ve hissiyatları sayısal olarak ifade etmektedir [61]. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneylerde; aynı parametreler dâhilinde ölçüm yapıldığı ve titreşimin konfor üzerindeki etkilerini belirlemek amaçlandığı için titreşim testlerinde değiştirilmiş mercalli yoğunluk ölçeğinin kullanılması uygun görülmüştür.

9.11. Gürültü Şiddetinin Ölçülmesi

CNG yakıt dönüşümü yapılarak hem doğalgaz yakıtıyla hem de benzin yakıtıyla çalıştırılabilir hale getirilen 1600 cc hacimdeki Ford marka Zetec model buji ateşlemeli

deney motorunda; hem benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda, hem de doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumlarında motorun ürettiği seslerden kaynaklanan gürültü seviyesi ölçülerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Her iki yakıtında yakılması durumunda aynı fiziki şartlarda ve rölanti devrinde motor yüklenmeden; motorun çalışırken oluşturduğu sesin gürültü seviyesi ölçülmüştür. Android işletim sistemine uygun olarak programlanmış bir gürültü ölçüm yazılımının yüklendiği cihaz, ölçümlerde kullanılmıştır. Cihaz, deney motorunun supap kapağına 1 metre mesafede tutularak ses şiddeti ölçülmüştür. Hem benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda hem de doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumlarında; birer dakikalık periyotlar halinde ses şiddetini ölçmek suretiyle gürültü seviyeleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

Gürültü seviyesini ölçmek için deneylerde kullanılan yazılım, 0-120 dB aralığında olan seslerin şiddetini ölçmekte ve yüklendiği cihazın mikrofonu vasıtasıyla sesleri algılamaktadır. Ses dalgalarının oluşturduğu şiddete göre gürültünün seviyesini desibel birimi olarak göstermektedir. Yazılım, yüklendiği cihazın ekranında ölçülen sesin anlık şiddetini, minimum şiddetini, maksimum şiddetini, ortalama şiddetini ve frekansını göstermektedir.

9.12. Egzoz Gazı Emisyonlarının Ölçülmesi

Bu çalışmada deney motorunun egzoz gazı emisyonlarını ölçmek için Bosch marka BEA350 modelindeki egzoz gazı emisyon test cihazı kullanılmıştır. Deney motorunda benzin ve doğalgaz yakıtlarının yakılması ile motorun çalıştırılması durumlarında ve tam yük ve tam gaz açıklığı koşullarında, egzoz gazı emisyon değerleri ölçülmüştür. Her ölçümde, emisyon değerleri ölçüme başlamadan önce çalışmada kullanılan yakıtın cinsi; cihaza parametre verisi olarak girilmiştir. Test cihazına parametre verisi girildikten sonra, cihaz otomatik kalibrasyon gerçekleştirmektedir. Dolayısıyla her ölçümden önce; egzoz gazı emisyon ölçüm probu gaz çıkışına yerleştirilmesinin ardında otomatik kalibrasyon için beklenilmiştir.

Bu çalışmada egzoz gazı emisyon ölçümleri iki farklı yerden ölçülmüştür. Hem manifold çıkışından hem de susturucu çıkışından egzoz gazı emisyon ölçümleri yapılmıştır. Şekil 9.15'te verilen egzoz tesisatı şemasında; manifold çıkışından egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazı emisyonları ölçüm noktası ile susturucu çıkışından egzoz gazı sıcaklığı ve egzoz gazı emisyonu ölçüm noktası gösterilmektedir.

- Tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarında hava fazlalık katsayısı değerleri ölçülmüştür.

Egzoz gazı emisyon ölçümlerine ait görseller, Şekil 9.16'da gösterilmiştir.



Şekil 9.16. Bosch BEA350 Test Cihazı ile Egzoz Gazı Emisyonlarının Ölçülmesi

9.13. Sıcaklık Ölçümleri

Bu çalışmada sıcaklık ölçümleri yapılırken üç farklı materyal kullanılmıştır. Hem bremze tezgâhının sıcaklık ölçme donanımı, hem dijital termometre hem de temassız sıcaklık ölçer kullanılmıştır.

Bu çalışmada temassız sıcaklık ölçer ile yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Deney motorunun benzin ve doğalgaz yakıtları yakılarak çalıştırılması durumlarında ve farklı motor devri, farklı miktarda yükleme ve çalışma koşullarındaki yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Ayrıca CNG tüp demetlerinin içerisinde bulunan sıkıştırılmış doğalgazın yoğunluğunu hesaplamak amacıyla, CNG tüp demetlerinin yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür.

Temassız sıcaklık ölçer ile yapılan ölçümler:

- Her bir silindirin egzoz manifoldu yüzey sıcaklığı
- Egzoz manifoldu birleşme boğazı yüzeyi sıcaklığı
- Motor bloğu yüzey sıcaklığı
- Supap kapağı yüzey sıcaklığı
- Radyatör yüzeyinin sıcaklığı
- Radyatör su giriş noktasındaki yüzey sıcaklığı
- Radyatör su çıkış noktasındaki yüzey sıcaklığı

- Emme manifoldu tepe noktasındaki yüzey sıcaklığı
- Her bir silindire ait emme manifoldu yüzey sıcaklığı
- CNG tüp demetleri yüzey sıcaklıklarıdır.

Bu çalışmada; deneyin yapıldığı ortamın koşullarını belirlemek üzere, ortam sıcaklığı dijital termometre ile ölçülmüştür. Ayrıca bu termometrenin ısı çiftine ait ölçüm ucunu; egzoz gazı boru tesisatında, egzoz manifoldu boğazından 125 cm uzaklık mesafesinde açılan delikten içeri sokmak suretiyle egzoz gazı sıcaklığı ölçülmüştür.

Dijital Termometre ile yapılan ölçümler;

- Ortam sıcaklığı
- Egzoz gazı sıcaklığıdır.

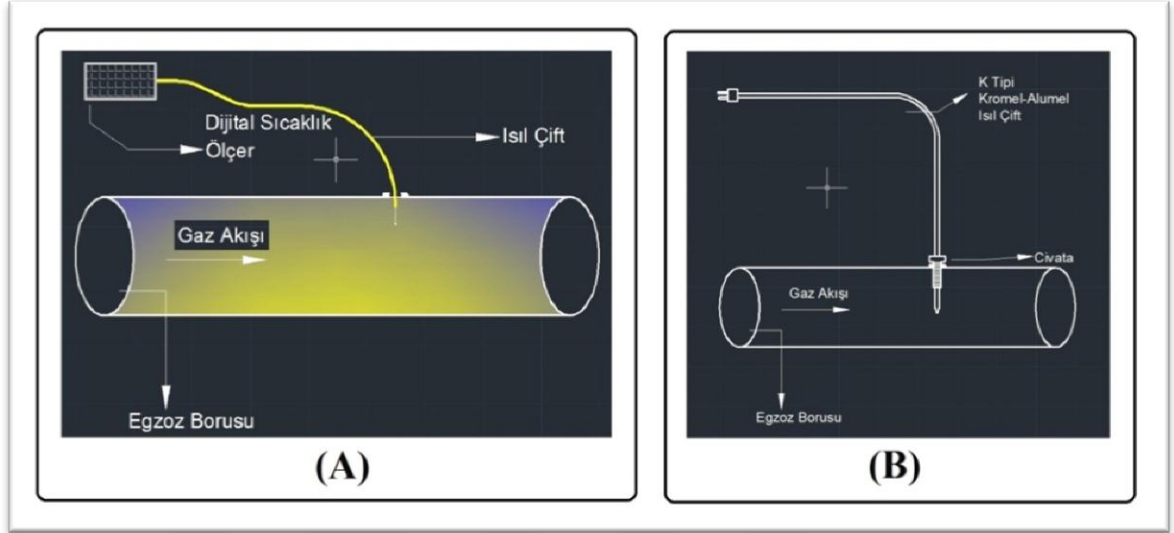
Egzoz gazı sıcaklığının dijital termometre ile ölçümünü gösteren görsel, Şekil 9.17(A)'da gösterilmiştir.

Bremze tezgâhı standını üzerine bulunan dijital göstergeli sıcaklık ölçme cihazından, bu çalışmada çeşitli sıcaklık ölçümlerinde yararlanılmıştır. Standın termal eleman grubunu; K tipi Kromel-Alumel ısı çiftler oluşturmaktadır. Bu standın üzerinde benzin sıcaklığını, radyatöre giren su sıcaklığını ve radyatörden çıkan su sıcaklığını ölçmek için gerekli donanım mevcut olarak bulunmaktadır. Bunların yanı sıra egzoz gazı sıcaklığını ölçmek için ayrıca bir düzenek hazırlanmıştır. Egzoz manifold çıkışından 125 cm mesafede açılan deliğe diş açılmıştır ve aynı diş ölçüsünde bir vidanın merkezi delinerek, bu merkeze bir adet K tipi Kromel-Alumel ısı çift yerleştirilmiştir. Vida egzoz borusundaki dişli deliğe sıkılarak gaz kaçağı önlemiş olarak egzoz gazı sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Bremze tezgâhının sıcaklık ölçme donanımı ile yapılan ölçümler;

- Benzin sıcaklığı
- Radyatöre giren su sıcaklığı
- Radyatörden çıkan su sıcaklığı
- Egzoz gazı sıcaklığıdır.

Egzoz gazı sıcaklığını ölçmek amacıyla; bremze standına bağlı ısıl çift ile oluşturulan düzeneğe ait görsel, Şekil 9.17(B)'de gösterilmektedir.



Şekil 9.17. Egzoz Gazı Sıcaklığı Ölçüm Metotları ve Ölçüm Düzenekleri

10. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde; deney motorunun hem benzin hem de doğalgaz yakıtları ile çalıştırılması durumlarında farklı yükleme şartlarında ve farklı motor devirlerinde yapılan performans ölçümleri ve egzoz gazı emisyon değeri ölçümlerinin sonuçları verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ölçülen ve hesaplanan değerler, tablo ve grafikler halinde gösterilmiştir. Benzin ve doğalgaz yakıtlarının motor performansı ve egzoz gazı emisyonları üzerindeki etkileri karşılaştırılarak tartışılmıştır.

10.1. Motor Performans Testlerinin Değerlendirilmesi

Deney motorunun, benzin ve doğalgaz yakıtlarıyla çalıştırılması durumlarında:

1. Motor momenti
2. Efektif motor gücü
3. Hava fazlalık katsayısı ve hava/yakıt oranları
4. Özgül yakıt tüketimi
5. Efektif verim
6. Özgül yakıt maliyeti
7. Titreşim yoğunluğu
8. Gürültü şiddeti

değerleri; incelenmiş, değerlendirilmiş ve irdelenerek karşılaştırılmıştır.

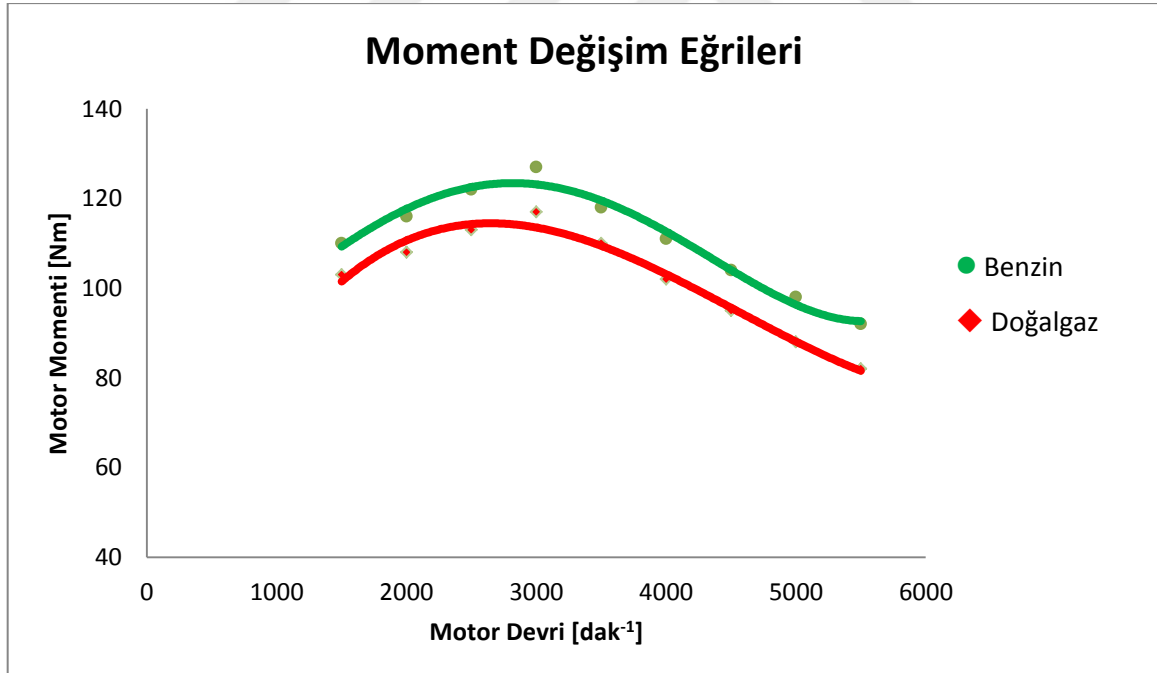
10.1.1. Motor Momentinin Değerlendirilmesi

Tablo 10.1'de, deney motorunun benzin ve doğalgaz yakıtları ile çalıştırılması durumlarındaki; gaz kelebeği tam açıklık konumundayken, motorun tam yükteki moment değişim değerleri verilmiştir.

Tablo 10.1. Motor Devir Sayısına Bağlı Motor Momenti Değişim Değerleri

Motor Devir Sayısı [dak ⁻¹]	Moment Değeri Benzin [Nm]	Moment Değeri Doğalgaz [Nm]
1500	110	103
2000	116	108
2500	122	113
3000	127	117
3500	118	110
4000	111	102
4500	104	95
5000	98	88
5500	92	82

Şekil 10.1’de ise deney motorunun benzin ve doğalgaz yakıtlarıyla çalıştırılması durumunda, tam gaz açıklığında ve tam yükteki; motor momentinin, motor devir sayısına bağımlı olarak değişim eğrileri, grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 10.1. Motor Devir Sayısına Bağlı Moment Değişim Eğrileri

Her iki yakıt türünün kullanılarak motorun çalıştırılması durumunda, düşük motor devirlerinde motor momentini de düşüktür. Her iki yakıt türünün kullanılarak motorun çalıştırılması durumunda da 3000 [dak⁻¹] motor devrine kadar; motor devri arttıkça, motor

momentinin de arttığı görülmektedir. 3000 [dak⁻¹] motor devrine ulaşıldığında, motor momentinin maksimum değere ulaştığı ve 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısının üzerindeki yüksek motor devirlerinde motor momentinin giderek düştüğü görülmektedir. Burada devir sayısındaki artışla birlikte motor momentinin de artması; birim zamandaki çevrim sayısının artmasının bir sonucudur. İçten yanmalı motorlarda motor momentini belirleyen ve değişken olan esas parametre ortalama efektif ortalama basınçtır. İçten yanmalı motorlarda ortalama efektif basıncın maksimum seviyeye ulaştığı motor devirlerinde, motor momenti de maksimum değere ulaşmaktadır. Ortalama efektif basıncın maksimuma ulaştığı motor devrinin altına inildiğine veya üzerine çıkıldığında motor momenti düşmektedir. Ortalama efektif basınç, içten yanmalı bir motorun tasarımına ve yanma reaksiyonunun fonksiyonuna bağlıdır. Buji ateşlemeli motorlarda emme zamanında yanma odasına alınan hava-yakıt karışımından oluşan dolgu, ancak dolgunun kıvılcımla tutuşabilecek enerji seviyesine ulaştığı esnada buji tarafından ateşlenerek tutuşturulabilir. Homojen dolgulu buji ateşlemeli benzinli motorlar, yanma odasına alınan dolgunun stokiyometrik oranda olması koşulunda veya stokiyometrik orandan bir miktar daha fazla hava içeren fakir karışım ile ideal vaziyette çalışmaktadırlar. Çevrimin emme zamanında, yanma odasına alınan dolgunun buji çevresindeki kompozisyon içeriği ve hava-yakıt oranı; dolgunun tutuşma ve yanma hızını belirler. Motor devri arttıkça, motorun emdiği hava debisi artacağından, hava sirkülasyonları da artacaktır. Bu durum yanma hızını artırarak yanma reaksiyonunu iyileştirecektir. Bu sebepten dolayı motor devri arttıkça, motor momentinin de artması beklenen bir sonuçtur. Motor momentinin maksimum değere ulaştığı motor devir sayısının üzerindeki devirlerde, piston hızı da artar. Bu sebeple yanma, genişleme sürecinde de devam eder; sonuç olarak ortalama efektif basınç düşer. Ortalama efektif basıncın düşmesine bağımlı olarak, motor momenti de azalmaktadır.

Tablo 10.1'de ki veriler göz önüne alındığında ve motor devrine bağlı moment eğrilerine bakıldığında, deney motorunda benzin veya doğalgaz yakıtlarının kullanılması durumlarındaki moment değişim karakteristiği benzerlik göstermektedir. Her iki yakıtında kullanılması durumlarında elde edilen verilere göre oluşturulan diyagramlarda; moment değişim eğrilerinin, otto prensibine göre çalışan bir içten yanmalı motor karakteristiğini yansıttığı görülmektedir.

Her iki yakıt türünün kullanılması durumunda da maksimum motor momenti yaklaşık olarak 3000 [dak⁻¹] motor devrinde oluşmaktadır. Benzin yakıtının kullanılması durumunda; doğalgaz yakıtının kullanılması durumuna göre motor moment değerleri daha

büyüktür. Benzinle çalışma durumunda en yüksek motor moment değeri; 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, 127 Nm olarak ölçülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda ise 3000 [dak⁻¹] motor devrinde 117 Nm olarak ölçülmüştür. Ölçülen en düşük motor momenti değerlerine bakıldığında her iki yakıt türünün de yakılması durumunda 5500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçülmüştür. Benzinle çalışmada ölçülen en düşük motor momentinin 92 Nm, doğalgazla çalışmada en düşük motor momentinin ise 82 Nm olduğu görülmektedir. Tüm motor devir sayılarında ölçülen moment değerleri ele alınırsa; doğalgazla çalışma durumunda motor moment değerleri, benzinle çalışmaya göre ortalama olarak %8 oranında azalmıştır. Doğalgaz ile çalışmada, hava-yakıt karışımı gaz fazında alındığından dolayı ve doğalgazın difüzyon hızının benzine oranla daha fazla olmasının sonucu olarak; dolgu, silindir içi sıcaklıktan etkilenmiştir. Bununla birlikte hava-doğalgaz karışımındaki hava miktarı; hava-benzin karışımındaki hava miktarına oranla daha fazla olmasından dolayı, doğalgazla çalışmada volumetrik verim daha düşüktür. Doğalgazla çalışmada; dolgunun difüzyon hızına bağlı olarak sıcaklıktan etkilenmesi ve yanma havasının daha fazla miktarda olmasına bağlı olarak azalan volumetrik verimin, ısı veriminde düşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca doğalgazın laminer alev hızının, benzinin laminer alev hızından daha düşük olması da ısı verimi olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Volumetrik verimin azalmasının yanı sıra düşük motor devirlerinde silindire emilen havanın hacimsel debisinin düşük olmasından dolayı, doğalgazla çalışma durumunda motor moment değerlerinde azalma görülmüştür.

Aynı motor devir sayılarında, hem benzin hem de doğalgaz kullanılması durumuna göre tespit edilen motor moment değerleri karşılaştırıldığında; en fazla fark 5500 [dak⁻¹] motor devrinde %10,87 olarak hesaplanmıştır. En düşük fark ise 1500 [dak⁻¹] motor devrinde %6,36 olarak hesaplanmıştır. Maksimum motor momentinin elde edildiği 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, deney motorunun benzin yerine doğalgazla çalıştırılması durumunda; motor momentinin %7,88 oranında azaldığı hesaplanmıştır.

Taşıtların trafik içerisindeki hareketleri göz önünde alındığında, taşıt motorları genel olarak 2000 [dak⁻¹] ile 3500 [dak⁻¹] motor devirlerinde çalıştırılmaktadır. Dolayısıyla bu motor devirleri aralığında, homojen dolgulu buji ateşlemeli bir benzinli motorda doğalgaz kullanıldığı takdirde, motor momentinin ortalama olarak %7,24 oranında azaldığı hesaplanmıştır. Motorlar imal edilmeden önce, motorun çalıştırılacağı yakıtın özellikleri bir parametre olarak seçilir ve motor çalıştırılacağı yakıtın yanma fonksiyonuna göre tasarlanır. Benzinin bileşen kompozisyonu, oktan sayısı, yoğunluğu, parlama noktası,

tutuşma noktası, yanma reaksiyonundaki parçalanma karakteristiği ve yanma süresince uğrayacağı kimyasal reaksiyonlar; yanma karakteristiğini belirleyen faktörlerdir. Bu faktörler doğalgazda daha farklı değerlerdedir. Deney motoru; benzinli olarak tasarlanıp, imal edilmiştir. Deney motorunun benzine göre tasarlanıp imal edilmesinden dolayı, doğalgaz ile çalıştırıldığında daha az motor momenti sağlaması tasarımıyla ilişkili bir durum olduğu düşünölmektedir. Öte yandan doğalgazın tam yanması için gereken hava-yakıt oranının benzine göre daha yüksek olması; moment değerlerindeki azalmanın, tasarımdan kaynaklanıyor olması yönündeki düşünceyi desteklemektedir.

Aynı birim kütledeki benzinin alt ısı değeri, doğalgazın alt ısı değerinden daha düşük olduğu bilinmektedir. Doğalgazın kalorifik değerinin benzinden daha yüksek olmasıyla beraber; doğalgazın yanma verimi de benzinin yanma veriminden daha iyidir. Bu durumlara rağmen doğalgazla çalışma durumunda daha düşük moment elde edilmesine, volumetrik verimin düşük olmasının ve volumetrik verime bağlı ısı verimin düşük olmasını yanı sıra mekanik kayıplar da etkendir. Doğalgazın gaz fazında bir yakıt olması sebebiyle, motorda mekanik sürtünmeler daha fazla oluşmaktadır. Mekanik sürtünmelere bağlı olarak azalan mekanik verim sebebiyle motor momenti de azalmaktadır.

10.1.2. Efektif Gücün Değerlendirilmesi

Deney motorunda benzin ve doğalgaz yakıtlarının kullanılması durumunda ölçölen motor momenti verileri kullanılarak efektif güç hesaplanmıştır. Bu hesaplamada kullanılan formöl, denklem 10.1'de verilmiştir.

$$P_e = \frac{M_d [Nm] * n [dak^{-1}]}{9549,3} [kW] \quad (10.1)$$

M_d : Motor Momenti [Nm]

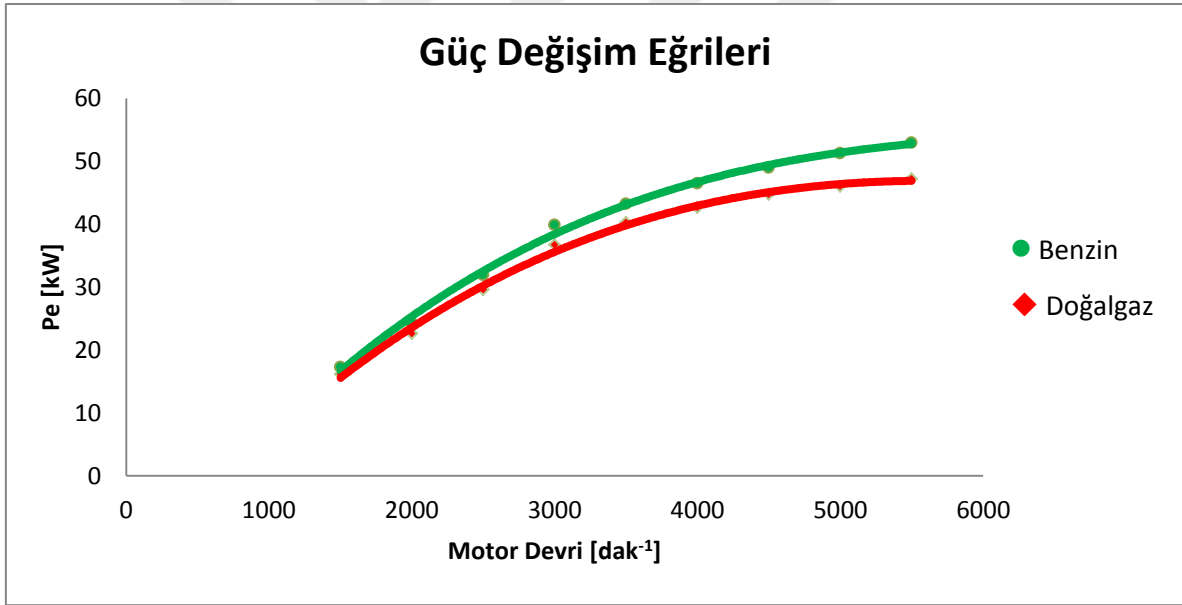
n: Motor Devir Sayısı [dak⁻¹]

P_e : Motor Gücü [kW]'tır.

Tablo 10.2'de, hem benzin hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumlarındaki; motor devrine göre efektif güç değişimleri verilmiştir.

Tablo 10.2. Motor Devir Sayısına Bağlı Güç Değişim Değerleri

Motor Devir Sayısı(n) [dak ⁻¹]	Pe, Benzin [kW]	Pe, Doğalgaz [kW]
1500	17,28	16,18
2000	24,29	22,62
2500	31,94	29,58
3000	39,89	36,75
3500	43,25	40,31
4000	46,49	42,72
4500	49,00	44,76
5000	51,31	46,07
5500	52,98	47,22



Şekil 10.2. Motor Devir Sayısına Bağlı Güç Değişim Eğrileri

Şekil 10.2’de her iki yakıtın kullanılması durumlarındaki motor devrine göre efektif güç değişim eğrileri grafik halinde verilmiştir. Benzin veya doğalgaz yakıtlarının kullanılması durumlarının her ikisinde de motor devir sayısı arttıkça motor gücünün de arttığı görülmektedir. Motor devir sayısı arttıkça çevrim sayısı da artmaktadır; dolayısıyla burada çevrim sayısındaki artışa bağlı olarak motor gücünün de artış göstermesi olağan bir durumdur. Grafikteki motor devir sayısına bağlı güç değişim eğrilerine bakılırsa; 3000

[dak⁻¹] motor devrine kadar motor gücü lineere yakın bir eğimde artış göstermiştir. Ayrıca düşük devirlerde doğalgaz ile benzin yakıtı arasındaki güç farkının daha az olduğu, bu farkın yüksek devirlerde daha fazla olduğu görülmektedir.

Yapılan deneylerde; her iki yakıt türünün de kullanması halinde, maksimum motor gücü 5500 [dak⁻¹] motor devir sayısında elde edilmiştir. Doğalgazla çalışmada en yüksek motor gücü 47,22 kW; benzinle çalışmada ise 52,98 kW olarak hesaplanmıştır. Deney motoru, aynı devir sayılarında; hem benzin hem de doğalgaz kullanılması durumuna göre tespit edilen motor gücü değerleri karşılaştırıldığında, benzin yakıtının kullanılması durumunda daha yüksek motor gücü değerlerine ulaşılmıştır. Benzin yerine doğalgazın yakıt olarak kullanılması durumunda, motorun benzinle çalıştırılmasına göre; en fazla fark, maksimum motor gücünün elde edildiği 5500 [dak⁻¹] motor devrinde %10,88 olarak hesaplanmıştır. En düşük fark ise 1500 [dak⁻¹] motor devrinde %6,37 olarak hesaplanmıştır. Tüm motor devir sayılarında yapılan hesaplamalar değerlendirdiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre motor gücünde ortalama olarak % 8,48 oranında azalma hesaplanmıştır. Doğalgazla çalışma durumunda motor gücünün azalması, benzinle çalışma durumuna göre; motor momenti ölçümü yapılan tüm motor devirlerindeki ortalama efektif basıncın daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Taşıtların trafik içerisindeki hareketleri göz önünde alındığında, taşıt motorları genel olarak 2000 [dak⁻¹] ile 3500 [dak⁻¹] motor devirlerinde çalıştırılmaktadır. Dolayısıyla bu motor devirleri aralığında, homojen dolgulu buji ateşlemeli bir benzinli motorda doğalgaz kullanıldığı takdirde, motor gücünün ortalama olarak %7,25 oranında azaldığı hesaplanmıştır.

Doğalgazın kalorifik değerinin, benzinin kalorifik değerine oranla daha yüksek olmasına rağmen doğalgaz yakıtı kullanıldığında, benzine göre daha düşük motor gücü üretilmesinin sebebi; volumetrik verimin daha düşük olması, volumetrik verimle birlikte ısı veriminin düşmesi ve mekanik verim kayıplarının artmasıyla birlikte doğalgazın yanma fonksiyonunun benzine göre farklı olmasıdır.

Her iki yakıtın kullanılmasıyla üretilen motor güçlerinin farkı daha detaylı yorumlanacak olursa; 1500 [dak⁻¹] motor devrinden, 3000 [dak⁻¹] motor devrine kadar stabil bir fark artışı görülmektedir. Bu fark, motor devir sayısı artışına bağlı olarak daha da artarak devam etmiştir. Efektif motor gücü, motor momentine ve motor devir sayısına bağlıdır. Motor devir sayısı arttıkça motor gücünde genel bir artışın yaşanması olağandır. Fakat deney motorunda 3000 [dak⁻¹] motor devrinde maksimum motor

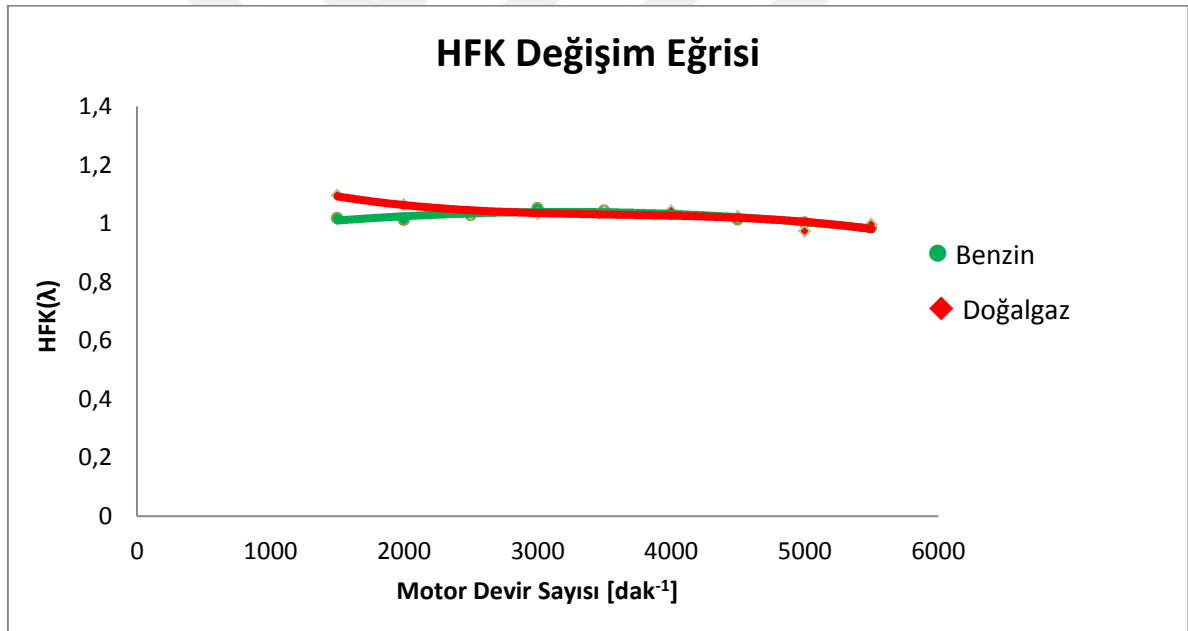
momentine ulaşıldığı ve bu devirin üzerine çıkıldığında motor momentinin düşmeye başladığı bilinmektedir. Grafik incelendiği zaman 3000 [dak⁻¹] motor devrinden sonra motor gücünün stabil bir artış göstermemesinin sebebi, 3000 [dak⁻¹] motor devrinin üzerine çıkıldığında motor momentinin azalmaya başlamasıdır. Motor momentindeki azalmanın yüksek devirlerde artması ise yanma için yeterli sürenin olmaması ve haliyle de yanma reaksiyonunun yüksek devirlerde kötüleşmesinin yanı sıra yüksek motor devir hızlarında supapların açık kalma süresinin kısılmasına bağlı volumetrik verimin düşmesiyle açıklanmaktadır. Deney motorunda doğalgaz kullanılması durumunda, yüksek motor devirlerine ulaşıldığında benzine göre daha az bir güç artışı görülmektedir. Moment eğrilerinde görüldüğü gibi devir sayısı arttıkça eğriler arasındaki fark artmaktadır. Motor devir sayısı belirli bir referans değer üzerine çıktığında motorun hareketli parçalarında meydana gelen atalet kuvvetleri ve yine hareketli parçalarda meydana gelen mekanik sürtünmelerin artmasına bağlı olarak mekanik verim düşmektedir. Sonuçta mekanik kayıplar artarak, motor gücü düşmektedir. Ayrıca yüksek motor devirlerinde; mekanik verim kaybının yanı sıra, volumetrik verimde azalmalar ve yanma süresinde kısılma meydana gelmektedir. Tüm bu sebeplere bağlı olarak ortalama efektif basınç önemli oranda azalır ve dolayısıyla motor gücü artış hızında azalma meydana geldiği söylenebilir.

10.1.3. Hava Fazlalık Katsayısının ve Hava/Yakıt Oranının Değerlendirilmesi

Tablo 10.3'te, deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan hava fazlalık katsayısı ölçümü değerleri; hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için verilmiştir. Bu deneyde ölçülen hava fazlalık katsayısına ait değerlerin; motor devir sayısına bağlı değişim eğrileri Şekil 10.3'te, grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 10.3. Motor Devir Sayısına Bağlı Hava Fazlalık Katsayısı Değişim Değerleri

Motor Devir Sayısı [dak ⁻¹]	Hava Fazlalık Katsayısı (λ)	
	Benzinle Çalışma Durumunda	Doğalgazla Çalışma Durumunda
1500	1,017	1,096
2000	1,012	1,063
2500	1,028	1,033
3000	1,051	1,032
3500	1,042	1,038
4000	1,034	1,042
4500	1,013	1,024
5000	1,002	0,973
5500	0,985	0,996



Şekil 10.3. Motor Devir Sayısına Bağlı Hava Fazlalık Katsayısı Değişim Eğrileri

Hava-yakıt oranı, buji ateşlemeli motorlarda yanma reaksiyonunun oluşumu ve gelişimi açısından oldukça önemli bir parametredir. İdeal yanma olarak anılan durum; teorik hava-yakıt oranının belirlenerek tam yanma denklemi oluşturulmasıyla izah edilmektedir. Fakat buji ateşlemeli motorlarda, gerçek çevrimde silindire emilen dolgunun hava-yakıt oranı; teorik orandan farklı olabilmektedir. Karışımın zengin veya fakir olarak ifade edilmesi; teorik ile gerçek hava-yakıt oranının farklılığından kaynaklanmaktadır.

Hava fazlalık katsayısı λ sembolü ile gösterilir ve $\lambda < 1$ olması durumunda yanma reaksiyonu zengin karışımla; $\lambda > 1$ olması durumunda ise yanma reaksiyonu fakir karışımla gerçekleşmektedir. İdeal yanma olarak anılan teorik tam yanma denklemi için ise $\lambda = 1$ 'dir. Tam yük şartlarında karışım fakirleşme eğilimi gösterirken, kısmi yük şartlarında karışım zenginleşme eğilimi göstermektedir. Hem benzinle çalışma durumunda hem de doğalgazla çalışma durumunda genel olarak dolgunun fakir karışımdan oluştuğu görülmektedir, bu durum tam yük şartlarında hava fazlalık oranının artmasıyla açıklanabilir.

Hem benzin hem de doğalgaz ile yapılan çalışmalarda ölçülen hava fazlalık katsayısı değerlerine bakılırsa; doğalgazla çalışma durumunda benzine göre yanma reaksiyonunun daha fakir karışımla gerçekleştiği görülmektedir. Tüm motor devir sayılarında ölçülen hava fazlalık katsayısı değerleri bir bütün olarak değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumundaki karışımların, benzinle çalışma durumundaki karışımlara oranla ortalama olarak %2,25 oranında daha fakir olduğu hesaplanmıştır.

Benzin ve doğalgaz ile çalışma durumlarında ölçülen hava fazlalık katsayı değerlerinin, motor devir sayısına bağlı değişimleri; her motor devir sayısı için karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda 2500 [dak⁻¹], 3000 [dak⁻¹] devrinde ve 5000 [dak⁻¹] motor devrinde; benzinle çalışma durumunda gerçekleşen yanma reaksiyonunun, doğalgazla gerçekleşen yanma reaksiyonuna göre daha fakir karışımla gerçekleştiği tespit edilmiştir. 2500 [dak⁻¹], 3000 [dak⁻¹] ve 5000 [dak⁻¹] motor devir sayılarının haricinde ölçüm yapılan diğer motor devir sayılarında ise doğalgazla çalışma durumundaki yanma reaksiyonunun, benzinle çalışma durumundaki yanma reaksiyonuna göre daha fakir karışımla gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Özellikle 1500 [dak⁻¹] ve 2000 [dak⁻¹] motor devir sayılarında; doğalgazla çalışma durumunda ölçülen hava fazlalık katsayı değerlerinin, aynı motor devir sayılarındaki benzinle çalışma durumunda ölçülen hava fazlalık katsayı değerlerinden; kayda değer oranda daha fazla olduğu görülmüştür. Düşük devirlerde, emilen hava hareketleri azdır. Hava hareketlerinin az olması yanma hızını düşürmektedir. Doğalgazın laminer yanma hızının, benzinin laminer yanma hızına oranla daha düşük olmasının etkisinden dolayı da; deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumunda düşük devirlerde daha fakir karışımla çalıştığı düşünülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda düşük motor devir hızlarında; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre yanma reaksiyonunun daha fakir karışımlarla gerçekleştiği görülmüştür.

Bu çalışmada hava fazlalık katsayısı, Bosch marka BEA 350 egzoz gazı emisyon test cihazı ile ölçülmüştür. Test cihazı hava fazlalık katsayısını ölçmektedir ve ölçüm sonucunda elde edilen hava fazlalık katsayısı değerleri kullanılarak, gerçek çevrimdeki hava-yakıt oranı hesaplanmıştır. Hesaplama kullanılan formül, denklem 10.2’de verilmiştir. Ayrıca hava fazlalık katsayısının bağlı olduğu fonksiyonlar ise denklemler 10.3 ve 10.4’te verilmiştir.

$$\lambda = \frac{AFR_{Gerçek}}{AFR_{Teorik}} = \frac{\frac{m_{hava,gerçek}}{m_{yakıt,gerçek}}}{\frac{m_{hava,teorik}}{m_{yakıt,teorik}}} \quad (10.2)$$

λ = Hava Fazlalık Katsayısı

$$AFR_{Gerçek} = Gerçek \frac{Hava}{Yakıt} \text{ Kütlesel Oranı} \quad (10.3)$$

$$AFR_{Teorik} = Teorik \frac{Hava}{Yakıt} \text{ Kütlesel Oranı} \quad (10.4)$$

$$m_{hava,gerçek} = \text{Tüketilen Gerçek Hava Kütlesi [kg]}$$

$$m_{yakıt,gerçek} = \text{Tüketilen Gerçek Yakıt Kütlesi [kg]}$$

$$m_{hava,teorik} = \text{Tüketilen Teorik Hava Kütlesi [kg]}$$

$$m_{yakıt,teorik} = \text{Tüketilen Teorik Yakıt Kütlesi [kg]}$$

Bu deneysel çalışmada hava fazlalık katsayılarının ölçüldüğü çalışma gününde; CNG tüp demetlerinde bulunan doğalgazın yaklaşık olarak 200 bar basınç değerinde sıkıştırılmış halde bulunduğu ölçülmüştür. Bu çalışmanın yapıldığı gün; CNG tüp demetlerinin bulunduğu bölgenin yerel hava sıcaklığı, CHY marka ve 502K/J modelindeki dijital termometre ile 15,5°C olarak ölçülmüştür. Fakat CNG tüp demetinin, tüplerin bulunduğu konum itibarıyla rüzgâr yönünden ve güneş ışınlarının açısından etkilenme olasılığından dolayı; her CNG tüp yüzeyinin farklı sıcaklık değerlerinde olacağı düşünülmüştür. Bu düşünceye istinaden; CNG tüplerinin yüzey sıcaklıkları temassız sıcaklık ölçer ile ölçülerek, sıkıştırılmış halde bulunan doğalgazın ortalama sıcaklık değeri hesaplanmıştır. Yapılan sıcaklık ölçümlerinde CNG tüp demetlerinin alt ve üst kısım yüzeylerinde yaklaşık olarak 1,5-2°C dolaylarında sıcaklık farkı gözlenmiştir. Bu sebepten dolayı CNG tüp demetlerinin yüzey sıcaklıkları, yüzeyin orta bölgesinde belirlenen merkez noktalardan

ölçülmüştür. Ölçümler, tüp yüzeylerine yaklaşık olarak 20-30 cm mesafeden gerçekleştirilmiştir. Yapılan sıcaklık ölçümüne ait değerler Tablo 10.4'te verilmiştir.

Tablo 10.4. CNG Tüp Demeti Yüzey Sıcaklıkları

Yapılan Ölçüm	Sıcaklık Gösterimi	Sıcaklık Değeri (°C)
1 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_1	16,2
2 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_2	16,3
3 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_3	16,7
4 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_4	14,6
5 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_5	13,5
6 Numaralı CNG Tüpü Yüzey Sıcaklığı	T_6	14,2
CNG Tüp Demetleri Ortalama Yüzey Sıcaklığı ($T_{ort.} = \frac{T_1+T_2+T_3+T_4+T_5+T_6}{6}$)	$T_{ort.}$	15,25

Bu deneysel çalışmada kullanılan doğalgazın bileşen kompozisyonu, bileşen oranları ile birlikte; Tablo 10.5'te verilmiştir. Bu oranlarla birlikte ölçülen basınç değeri ve hesaplanan sıcaklık değeri şartlarında modellenmiştir.

Tablo 10.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Doğalgazın Bileşen Kompozisyonu

<i>CNG Bileşen Kompozisyonu</i>		
Bileşen Adı	Bileşen Formülü	Bileşen Yüzdesi
Metan	CH ₄	% 91,43698
Etan	C ₂ H ₆	% 3,39889
Propan	C ₃ H ₈	% 1,02553
Karbondiyoksit	CO ₂	% 0,52345
Nitrojen	N ₂	% 3,02255
n-Bütan	C ₄ H ₁₀	% 0,24211
İzo-Bütan	C ₄ H ₁₀	% 0,18326
n-Hekzan	C ₆ H ₁₄	% 0,04715
İzo-Pentan	C ₅ H ₁₂	% 0,06379
n-Pentan	C ₅ H ₁₂	% 0,05629

Dolayısıyla deneysel çalışmada kullanılan doğalgaza ait bileşen değerine göre yapılan modellemeden elde edilen sonuçlara göre;

$$\rho_{CNG(15,25^{\circ}C;200\text{ bar})} = 188,901 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

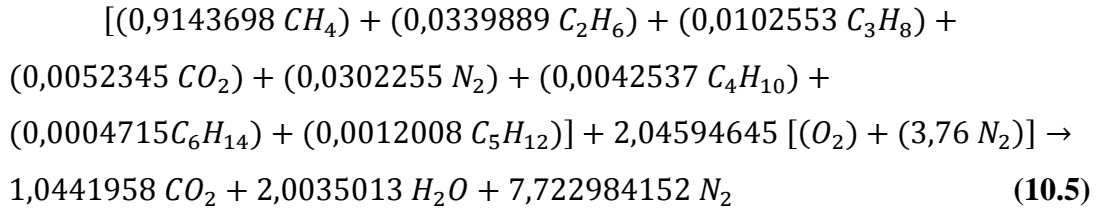
$$(1000 \text{ lt})_{CNG(15,25^{\circ}C;200\text{ bar})} = (188,901 \text{ kg})_{CNG(15,25^{\circ}C;200\text{ bar})}$$

$$(1 \text{ kg})_{CNG(15,25^{\circ}C;200\text{ bar})} = (5,293 \text{ lt})_{CNG(15,25^{\circ}C;200\text{ bar})}$$

15,25°C sıcaklıkta ve 200 bar basınç altında sıkıştırılmış doğalgazın; 1 kilogramı, 5,293 litredir.

Deneysel çalışmada kullanılan doğalgazın bileşen oranları referans alınmak suretiyle, “unitrove.com” web sitesinden yararlanılarak modellenmiştir. Modellemede, AGA8-92DC detaylı karakterizasyon denklemi kullanılarak doğalgazın molar kütlesi hesaplanmıştır [28].

Havanın; 1 mol O₂ ile 3,76 mol N₂'nin bileşiminden oluştuğu kabul edilirse; deneysel çalışmada kullanılan doğalgazın karışımındaki bileşen değerlerine istinaden, teorik tam yanma denklemi, denklem 10.5'te verilmiştir.



Tam yanma için gerekli olan teorik havanın mol miktarı, denklem 10.6'da verilmiştir.

$$2,04594645 \text{ O}_2 + 7,692758652 \text{ N}_2 = 9,738705102 \text{ kmol}_{Hava} \quad (10.6)$$

Teorik tam yanma için, Hava-Yakıt molar oranı, denklem 10.7'de verilmiştir.

$$AFR_{Molar;(Teorik,Doğalgaz)} = \frac{n_{Hava}}{n_{Doğalgaz}} = \frac{9,738705102 \text{ [kmol]}}{1 \text{ [kmol]}} = 9,738705102 : 1 \quad (10.7)$$

Modellemeye göre, doğalgazın molar kütleşi;

$$m_{Doğalgaz} = 17,5951 \left[\frac{kg}{kmol} \right], \text{dur.}$$

Havanın molar kütleşi; denklem 10.8'de formülize edilip, hesaplanmıştır.

$$m_{hava} = \frac{(n_{O_2} [kmol] * m_{O_2} \left[\frac{kg}{kmol} \right]) + (n_{N_2} [kmol] * m_{N_2} \left[\frac{kg}{kmol} \right])}{n_{O_2} [kmol] + n_{N_2} [kmol]}$$

$$m_{hava} = \frac{(1 [kmol] * (2 * 15,9994) \left[\frac{kg}{kmol} \right]) + (3,76 [kmol] * (2 * 14,0067) \left[\frac{kg}{kmol} \right])}{1 [kmol] + 3,76 [kmol]}$$

$$m_{hava} = 28,8506 \left[\frac{kg}{kmol} \right], \text{dur.} \quad (10.8)$$

Tam yanma reaksiyonuna göre, teorik tam yanma için gereken doğalgazın kütleşi; denklem 10.9'da hesaplanmıştır.

$$m_{r,Doğalgaz} = n_{Doğalgaz} [kmol] * m_{Doğalgaz} \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$m_{r,Doğalgaz} = 1 [kmol] * 17,5951 \left[\frac{kg}{kmol} \right] = 17,5951 [kg] \quad (10.9)$$

Tam yanma reaksiyonuna göre, teorik tam yanma için gereken hava kütleşi; denklem 10.10'da hesaplanmıştır.

$$m_{r,Hava} = n_{Hava} [kmol] * m_{hava} \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

$$m_{r,Hava} = 9,738705102 [kmol] * 28,8506 \left[\frac{kg}{kmol} \right] = 280,9674854 [kg]$$

(10.10)

Tam yanma reaksiyonuna göre; bu deneysel çalışmada kullanılan doğalgazın tam yanması için gereken, teorik hava-yakıt oranı; denklem 10.11'de verilmiştir.

$$AFR_{Teorik,Doğalgaz} = \frac{m_{r,Hava}}{m_{r,Doğalgaz}} = \frac{280,9674854 [kg]}{17,5951 [kg]} = 15,9685:1 \quad (10.11)$$

Tüm bu ölçümlere ve hesaplamalara göre, deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumundaki gerçek hava yakıt oranı denklem 10.12 ile hesaplanabilir.

$$AFR_{Gerçek, Doğalgaz} = \lambda * AFR_{Teorik, Doğalgaz} \quad (10.12)$$

Doğalgazla çalışma durumunda, tam yükleme ve tam gaz açıklığı şartlarındaki en yüksek hava fazlalık katsayısı değeri 1500 [dak⁻¹] motor devrinde 1,096 değerinde ölçüldüğüne göre;

$$\begin{aligned} AFR_{Gerçek, Doğalgaz} &= \lambda_{(1500[dak^{-1}])} * AFR_{Teorik, Doğalgaz} = 1,096 * 15,9685 \\ &= 17,50:1 \end{aligned} \quad (10.13)$$

Denklem 10.13'te verildiği gibi hesaplanırsa; bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen doğalgazla çalışma durumundaki gerçek hava-yakıt oranının, tam gaz açıklığı ve tam yükleme şartlarında 17,50:1 değerine kadar yükseldiği görülmüştür.

Buji ateşlemeli motorlarda, benzin yakıtının tam yanması için gereken teorik hava-yakıt oranının 14,7:1 olduğu bilinmektedir [62]. Dolayısıyla benzinle çalışma durumundaki teorik hava-yakıt oranı 14,7:1 olarak kabul edilmiştir. Bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen benzinle çalışma durumunda tam yükleme ve tam gaz açıklığı şartlarındaki en yüksek hava fazlalık katsayısı değeri; 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, 1,051 değerinde ölçülmüştür.

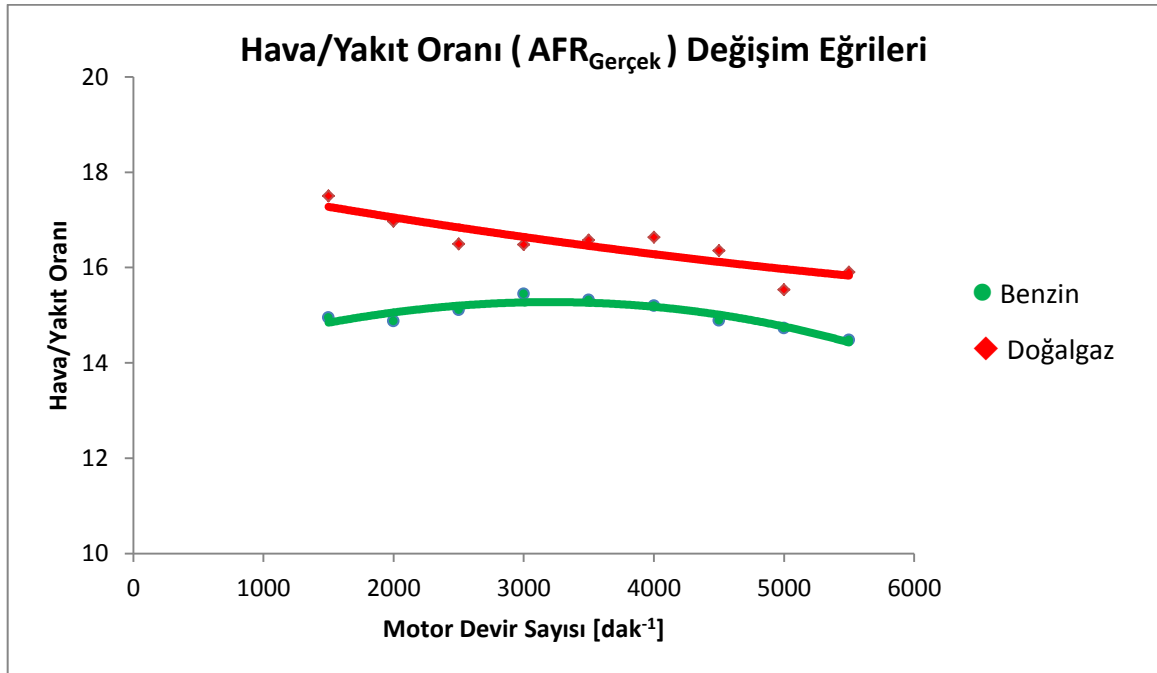
$$AFR_{Gerçek, Benzin} = \lambda_{(3000[dak^{-1}])} * AFR_{Teorik, Benzin} = 1,051 * 14,7 = 15,45 \quad (10.14)$$

Denklem 10.14'te verildiği gibi hesaplanırsa; bu deneysel çalışmada yapılan benzinle çalışma durumundaki gerçek hava-yakıt oranının, tam gaz açıklığı ve tam yükleme şartlarında 15,45:1 değerine kadar yükseldiği görülmüştür.

Tablo 10.6’da deney motorunun, tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında gerçekleştirilen çalışmalardan hesaplanan; hava-yakıt oranları, hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için verilmiştir. Hava-yakıt oranlarının, motor devir sayısına bağlı değişim eğrileri, Şekil 10.4’te grafik halinde gösterilmektedir.

Tablo 10.6. Motor Devir Sayısına Bağlı Hava/Yakıt Oranı Değişim Değerleri

Motor Devir Sayısı [dak ⁻¹]	Hava-Yakıt Oranları ($AFR_{Gerçek}$)	
	Benzinle Çalışma Durumunda	Doğalgazla Çalışma Durumunda
1500	14,9499	17,501476
2000	14,8764	16,9745155
2500	15,1116	16,4954605
3000	15,4497	16,479492
3500	15,3174	16,575303
4000	15,1998	16,639177
4500	14,8911	16,351744
5000	14,7294	15,5373505
5500	14,4795	15,904626



Şekil 10.4. Motor Devir Sayısına Bağlı Hava/Yakıt Oranı Değişim Eğrileri

Deneysel çalışmada tespit edilen en yüksek hava fazlalık katsayı değeri şartlarında, aynı deney motorunun benzin yerine doğalgaz ile çalıştırılması durumunda; birim kütledeki doğalgazın, birim kütledeki benzine oranla, kütleli olarak %13,26 oranında daha fazla hava ile yanma reaksiyonu gerçekleştirdiği görülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışmaya göre; tüm motor devir sayılarında belirlenen hava/yakıt oranlarında ortalama olarak %9,96 oranında artış tespit edilmiştir. Sonuç itibarı ile doğalgaz ile çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla, daha fakir karışımla yanma olayının gerçekleştiği belirlenmiştir.

10.1.4. Özgül Yakıt Tüketiminin Değerlendirilmesi

Deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan özgül yakıt tüketimi ölçümü değerleri; sadece benzin yakıtının kullanılması durumu için ölçülmüş ve hesaplanmış olup, Tablo10.7’de verilmiştir. Deney setinde; motor gücüne ve zamana bağlı olarak hacimsel benzin tüketimi ölçülmüştür. Hacimsel benzin tüketimi, deneylerde kullanılan benzinin yoğunluğu ($\rho_{Benzin}=0,7433 \text{ kg/l}$) ile çarpılarak, kütleli tüketim miktarı hesaplanmıştır. Bu deneysel çalışmada elde edilen motor gücü değeri, kütleli yakıt tüketim değeri ve birim yakıtın tüketim süresi değerleri kullanılmak suretiyle denklem 10.15’teki formül ile hesaplanarak, benzinle çalışma durumundaki özgül yakıt tüketimi hesaplanmıştır.

$$be = \frac{3600 * m_{yakıt} [gr]}{Pe [kW] * \Delta t [sn]} [gr/kwh] \quad (10.15)$$

Burada:

$$be = \text{Özgül Yakıt Tüketimi} [gr/kWh]$$

$$m_{yakıt} = \text{Tüketilen Yakıt Kütlesi} [gr]$$

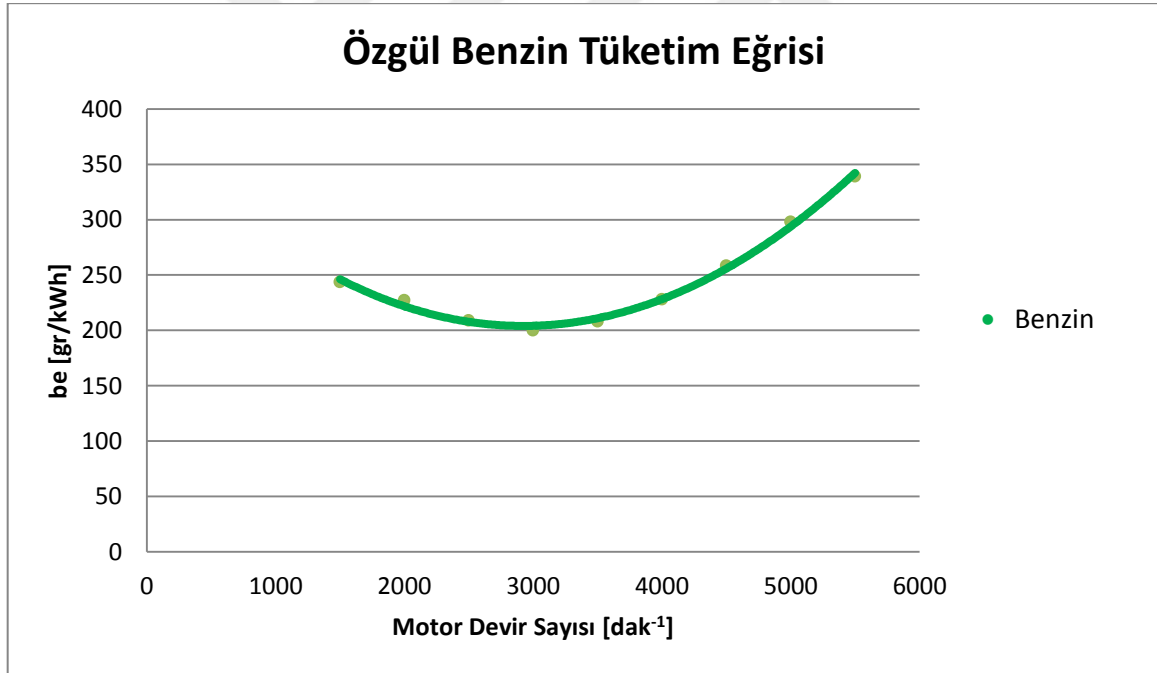
$$\Delta t = \text{Referans Miktardaki Yakıtın Tüketim Süresi} [sn]$$

$$3600 = \text{Zaman Birimi Çevrim Sabiti}$$

$$Pe = \text{Motor Gücü} [kW] \text{’tr.}$$

Tablo 10.7. Benzinle Çalışma Durumundaki Motor Devir Sayısına Bağlı Özgül Yakıt Tüketimi Değerleri

<i>Tam Yükleme ve Tam Gaz Açıklığı Şartlarında</i>	
Motor Devri (n) [dak⁻¹]	be Benzin [gr/kWh]
1500	243,5126
2000	227,2148
2500	208,9126
3000	200,0812
3500	208,0613
4000	227,8864
4500	258,4624
5000	297,8502
5500	338,9169



Şekil 10.5. Özgül Benzin Tüketim Eğrisi

Şekil 10.5'te verilen grafikte görüldüğü gibi maksimum motor momentinin elde edildiği 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında, özgül yakıt tüketimi; minimum değere ulaşmış olup, 200,0812 [gr/kWh] olarak belirlenmiştir. 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısının üzerine

çıkıldıkça özgül yakıt tüketiminin arttığı görülmektedir. Efektif ortalama basınç özgül yakıt tüketimi değerini önemli oranda etkileyen bir parametredir. Özgül yakıt tüketim değeri genişletilmiş haliyle denklem 10.16'daki gibi gösterilebilir.

$$be = \frac{3600 * m_{yakıt} [gr]}{Pe [kW] * \Delta t [sn]} = \frac{3600 * m_{yakıt} [gr]}{Pme \left[\frac{kN}{m^2} \right] * V_H [m^3] * z * n [sn^{-1}] * \Delta t [sn]} [gr/kwh] \quad (10.16)$$

$be = \text{Özgül Yakıt Tüketimi} [gr/kWh]$

$m_{yakıt} = \text{Tüketilen Yakıt Kütlesi} [gr]$

$Pe = \text{Motor Gücü} [kW]$

$\Delta t = \text{Tüketim Zamanı} [sn]$

$3600 = \text{Zaman Dönüşümü İçin Sabit Değer}$

$Pme = \text{Efektif Ortalama Basınç} [kN/m^2]$

$V_H = \text{Herbir Silindirin Hacmi} [m^3]$

$z = \text{Motorun Silindir Sayısı}$

$n = \text{Motor Devir Sayısı} [sn^{-1}]$ 'dir.

Denklem 10.16'dan görüldüğü gibi aynı sürede, aynı birim miktarda yakıtın tüketildiği bir motorun özgül yakıt tüketimini etkileyen temel değişken parametreler; ortalama efektif basınç ve motor devir sayısıdır. Denkleme göre motor devir sayısının artışına bağlı olarak özgül yakıt tüketim değerinin azalması beklenmektedir. Efektif ortalama basıncın maksimum değerine ulaştığı motor devir sayısına kadar, motor devir sayısını artmasıyla birlikte özgül yakıt tüketim değerinin düştüğü görülmüştür. Fakat efektif ortalama basıncın maksimum değerine ulaştığı motor devir sayısının daha üzerindeki motor devirlerine çıkıldıkça özgül yakıt tüketim değeri artmıştır. Efektif ortalama basıncın maksimum değerine ulaştığı 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısının üzerine çıkıldıkça özgül yakıt tüketim değerinin artması; efektif ortalama basıncın azalmasıyla birlikte yanma şartlarının kötüleşmesi ve yanma için yeterli zamanın sağlanamaması ile açıklanabilir. Özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu devir sayısından daha yüksek devirlerde yakıt tüketimi ve güç artmaktadır. Yakıt tüketim trendindeki artış hızı güç artış hızından daha fazla olduğundan, özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Yakıt tüketimi ve güç

artış trendleri arasındaki fark devir hızı arttıkça daha da artmaktadır. Sonuçta devir arttıkça özgül yakıt tüketimi artışı devam etmiştir.

Bu deneysel çalışmada; sıkıştırılmış doğalgaz, CNG tüp demetinde depolanarak kullanılmıştır. CNG tüp demeti, palet yapısında olması sebebiyle; hem hacimsel olarak büyüktür, hem de kütleli olarak oldukça ağırdır. Dolayısıyla deneyler esnasındaki doğalgaz tüketim miktarı, deneysel olarak ölçülememiştir. Fakat bu çalışmada hava fazlalık katsayısı ölçülmüş olup gerçek yanma şartlarındaki hava-yakıt oranı hesaplanmıştır. Benzin ve doğalgaz yakıtlarının özgül yakıt tüketim değerlerini karşılaştırabilmek amacıyla, bu verilere ve deneysel çalışmada kullanılan doğalgazın alt ısı değerine göre doğalgazın özgül yakıt tüketim değeri hesaplanmıştır.

Özgül yakıt tüketimi, birim zamanda birim güç başına tüketilen yakıt miktarıdır. Deney motoru benzinle çalışma durumunda, tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarında; 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, 100ml hacimdeki benzini 33,52 saniyede tüketmiştir.

Tüketilen benzinin kütleli miktarı, denklem 10.17’de hesaplanmıştır.

$$m_{T,Benzin} = V_{Benzin} * \rho_{Benzin} = 0,1[lt] * 0,7433 \left[\frac{kg}{lt} \right] = 0,07433[kg] = 74,33 [gr] \quad (10.17)$$

Aynı şartlarda, aynı birim zamanda tüketilen doğalgaz miktarını hesaplamak için denklem 10.18’deki formül kullanılmış ve denklem 10.19’da hesaplanmıştır.

$$m_{T,Benzin} * \left[(AFR_{Gerçek})_{Benzin} + 1 \right] * Hu_{Benzin} = m_{T,Doğalgaz} * \left[(AFR_{Gerçek})_{Doğalgaz} + 1 \right] * Hu_{Doğalgaz} \quad (10.18)$$

$$AFR_{Gerçek, Benzin, 3000 [dak^{-1}]}: 3000[dak^{-1}] = 15,4497: 1$$

$$Hu_{Benzin} = 10400 \left[\frac{kCal}{kg} \right]$$

$$AFR_{Gerçek, Doğalgaz, 3000 [dak^{-1}]} = 16,479492: 1$$

$$Hu_{Doğalgaz} = 11005 \left[\frac{kCal}{kg} \right]$$

Olduğuna göre;

$$74,33[\text{gr}] * 16,4497 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] * 10400 \left[\frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right] = m_{\text{Doğalgaz}}[\text{gr}] * 17,479492 \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right] * 11005 \left[\frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right]$$

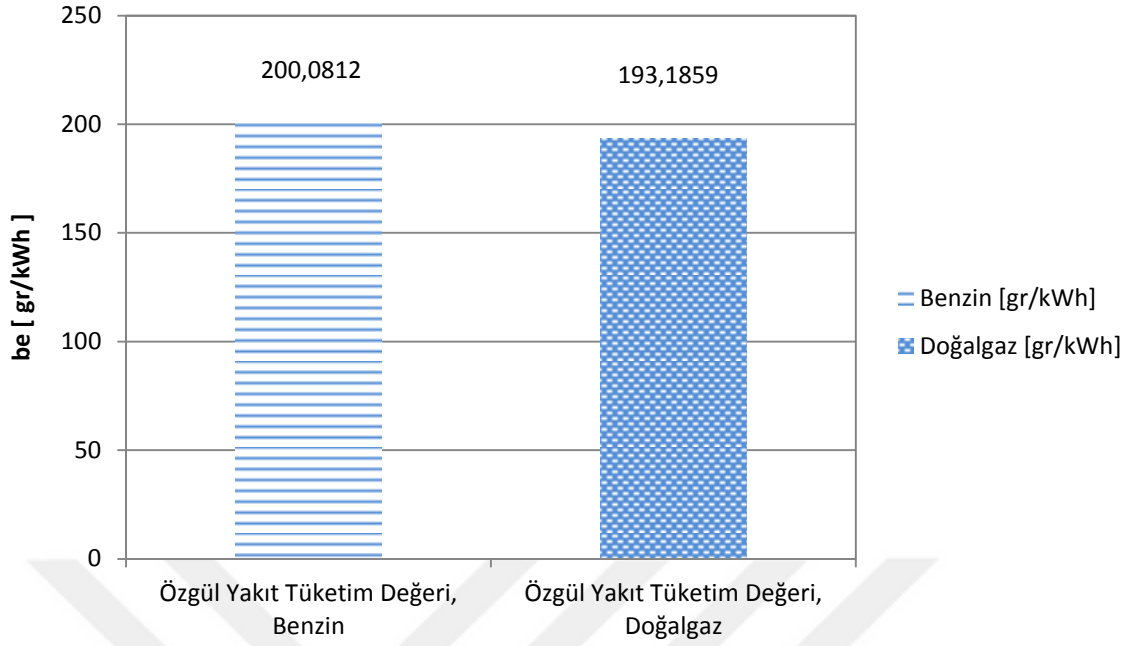
$$m_{\text{Doğalgaz}} = 66,105 [\text{gr}] \text{ 'dır.} \quad (10.19)$$

Denklem 10.19'dan anlaşılacağı gibi, deney motoru aynı şartlarda benzin yerine doğalgazla çalıştırılırsa; deney motorunun benzin tüketimine oranla kütleli olarak yaklaşık %11 daha az doğalgaz tükettiği hesaplanmıştır.

Özgül yakıt tüketiminde esas parametrelerden biri tüketilen yakıtın kütleli debisidir. Aynı şartlardaki kütleli debi ya zaman değişimine ya da kütle değişimine bağlıdır. Her iki yakıtın kütleli tüketim miktarı farklı olduğundan dolayı, zaman değişimi aynı kabul edilmiştir. Dolayısıyla, 3000 [dak⁻¹] motor devrinde tam gaz açıklığı ve tam yük koşullarında, doğalgazdaki tüketim süresinde benzinin tüketim süresiyle aynı kabul edilerek özgül doğalgaz tüketimi hesaplanmıştır. 3000 [dak⁻¹] motor devrinde tam gaz açıklığı ve tam yük koşullarında; doğalgazla çalışma durumunda, özgül yakıt tüketimi denklem 10.20'de hesaplanmıştır.

$$be = \frac{3600 * m_{\text{Doğalgaz}} [\text{gr}]}{Pe [\text{kW}] * \Delta t [\text{sn}]} = \frac{3600 * 66,105 [\text{gr}]}{36,75[\text{kW}] * 33,52 [\text{sn}]} = 193,1859 [\text{gr/kWh}] \quad (10.20)$$

Benzinle çalışma durumunda ulaşılan en düşük özgül yakıt tüketimi 3000 [dak⁻¹] motor devrinde sağlandığından dolayı; bu devir sayısı bir parametre olarak seçilmiş ve doğalgazla çalışma durumundaki özgül yakıt tüketimi de 3000 [dak⁻¹] motor devrine göre hesaplanmıştır. Benzinle çalışma durumunda 3000 [dak⁻¹] motor devrinde özgül yakıt tüketim değeri 200,0812 [gr/kWh] olarak hesaplanmıştır. Doğalgazla çalışma durumunda ise 3000 [dak⁻¹] motor devrinde özgül yakıt tüketim değeri 193,1859 [gr/kWh] olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre 3000 [dak⁻¹] motor devrinde; doğalgazla çalışma durumunda özgül yakıt tüketim değerinin, benzinle çalışma durumuna göre yaklaşık %3,5 oranında daha az olduğu görülmektedir. Şekil 10.6'da; 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarındaki doğalgazla ve benzinle çalışma durumlarının özgül yakıt tüketim değerleri grafik halinde karşılaştırılmıştır.



Şekil 10.6. Benzin ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak⁻¹] Motor Devrindeki Özgül Yakıt Tüketim Değerlerinin Karşılaştırılması

10.1.5. Efektif Verimin Değerlendirilmesi

Deney motorunun, 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında, benzinle veya doğalgazla çalıştırılması durumlarında; tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarındaki efektif verimleri hesaplanmıştır. İçten yanmalı motorlarda yanma odası içerisinde yakıtın yanması ile üretilen ısı enerjisinin büyük orandaki kısmı; soğutma, egzoz ve sürtünme yolu ile kaybedilmektedir. Bir kısım ısı enerjisi de ışınım ve egzoz gazında bulunan oksitlenebilir emisyonlar ile kaybedilmektedir. Kayıpların haricinde kalan ısı enerjisi, mekanik enerjiye dönüşmektedir. Efektif verim, yakılan yakıtın toplam ısı enerjisinin faydalı işe dönüşme oranını belirtmektedir.

Efektif verim hesabında kullanılan formül, denklem 10.21’de verilmiştir.

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot 10^3}{H_u \cdot b_e} \quad (10.21)$$

Burada;

η_e : Efektif Verim

H_u : Tüketilen Yakıtın Alt Isıl Değeri [kJ/kg]

b_e : Özgül Yakıt Tüketimi [gr/kWh]

3600: Birim Dönüşümü İçin Sabit Katsayı’dır.

3000 [dak⁻¹] motor devrinde, benzinle çalışma durumu için efektif verim; denklem 10.22'de hesaplanmıştır.

$$\eta e_{Benzin} = \frac{3600 * 10^3}{Hu_{Benzin} * be_{Benzin}} = \frac{3,6 * 10^6}{43532,32 * 200,0812} = 0,41332$$

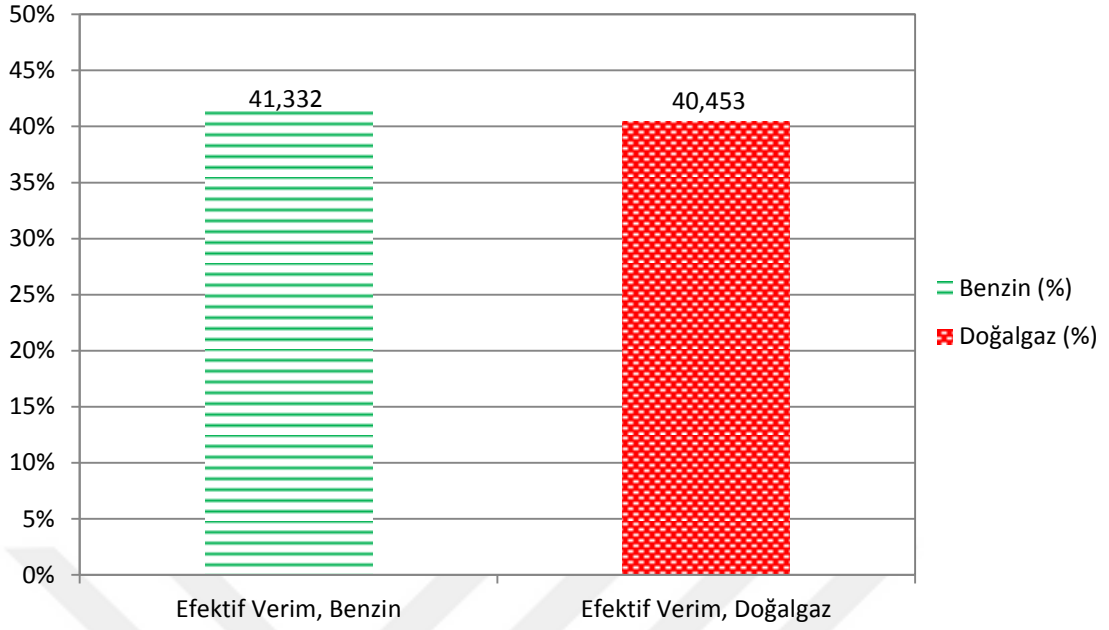
$$\eta e_{Benzin} = \% 41,332 \quad (10.22)$$

3000 [dak⁻¹] motor devrinde doğalgazla çalışma durumu için, efektif verim; denklem 10.23'te hesaplanmıştır.

$$\eta e_{Doğalgaz} = \frac{3600 * 10^3}{Hu_{Doğalgaz} * be_{Doğalgaz}} = \frac{3,6 * 10^6}{46064,72 * 193,1859} = 0,40453$$

$$\eta e_{Doğalgaz} = \% 40,453 \quad (10.23)$$

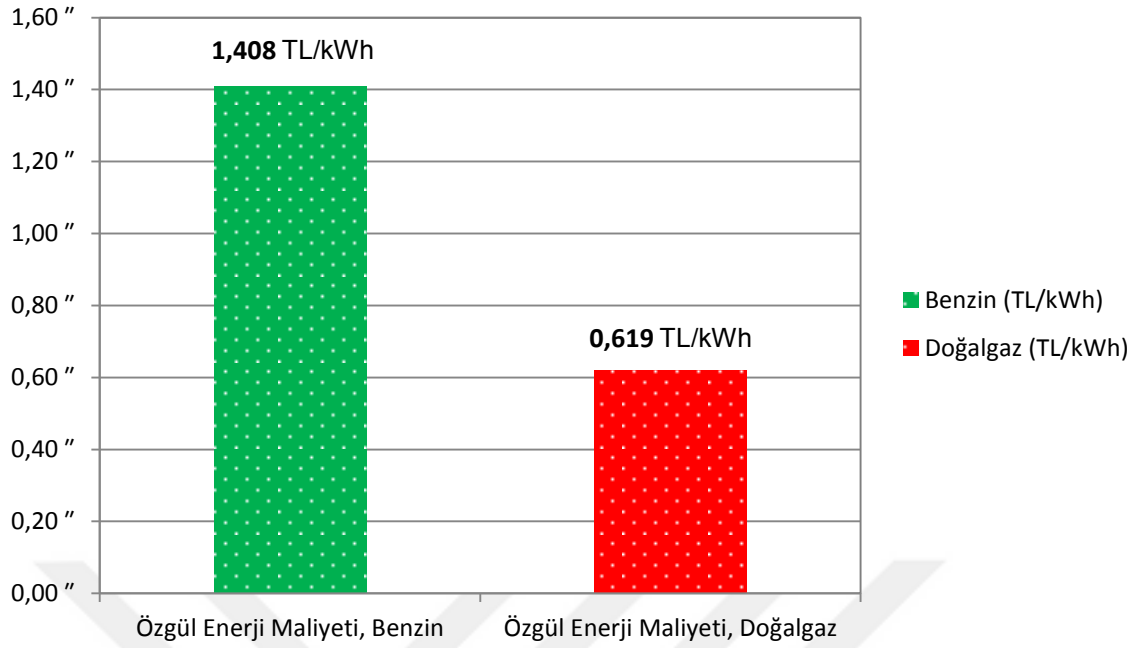
Hesaplamalar sonucunda elde edilen efektif verim değerlerine bakılırsa 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında; benzinle çalışma durumunda kazanılan efektif verim, doğalgazla çalışma durumunda kazanılan efektif verimden daha fazladır. Doğalgazla çalışma durumunda efektif verimin, benzinle çalışma durumuna oranla yaklaşık olarak %2,13 oranında azaldığı görülmüştür. Dolayısıyla benzinle çalışma durumundaki volumetrik verimin ve mekanik verimin; doğalgazla çalışma durumundaki volumetrik verimden ve mekanik verimden daha iyi olduğu söylenilebilir. Farklı motor çalışma devirlerinde benzinle çalışmada motor gücünün daha yüksek olmasının doğal sonucu olarak efektif verimde daha yüksek çıkmaktadır. Şekil 10.7'de, 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında; benzinle çalışma durumunda kazanılan efektif verim, doğalgazla çalışma durumunda kazanılan verimle grafik halinde karşılaştırılmıştır.



Şekil 10.7. Benzin ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak⁻¹] Motor Devrindeki Efektif Verim Oranlarının Karşılaştırılması

10.1.6. Özgül Enerji Maliyetinin Değerlendirilmesi

Deney motorunun, 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında, benzinle veya doğalgazla çalıştırılması durumlarında; tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarındaki özgül enerji maliyetleri hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Özgül enerji maliyeti, Ağustos 2017 tarihinde geçerli olan birim perakende satış fiyatlarına göre hesaplanmıştır. Aynı şehirde, 95 oktan kurşunsuz benzinin litre fiyatı 5,23 TL iken; 1 m³ CNG'nin fiyatı 2,39 TL'dir [78]. Tam yük ve tam gaz açıklığı şartlarında 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında benzinin özgül enerji maliyeti 1,408 TL/kWh, doğalgazın özgül enerji maliyeti ise 0,619 TL/kWh olarak hesaplanmıştır. Aynı şartlarda ve motor devirlerinde; doğalgazla çalışma durumunun özgül enerji maliyeti, benzinle çalışma durumunun özgül enerji maliyetiyle, Şekil 10.8'de grafik halinde karşılaştırılmıştır.



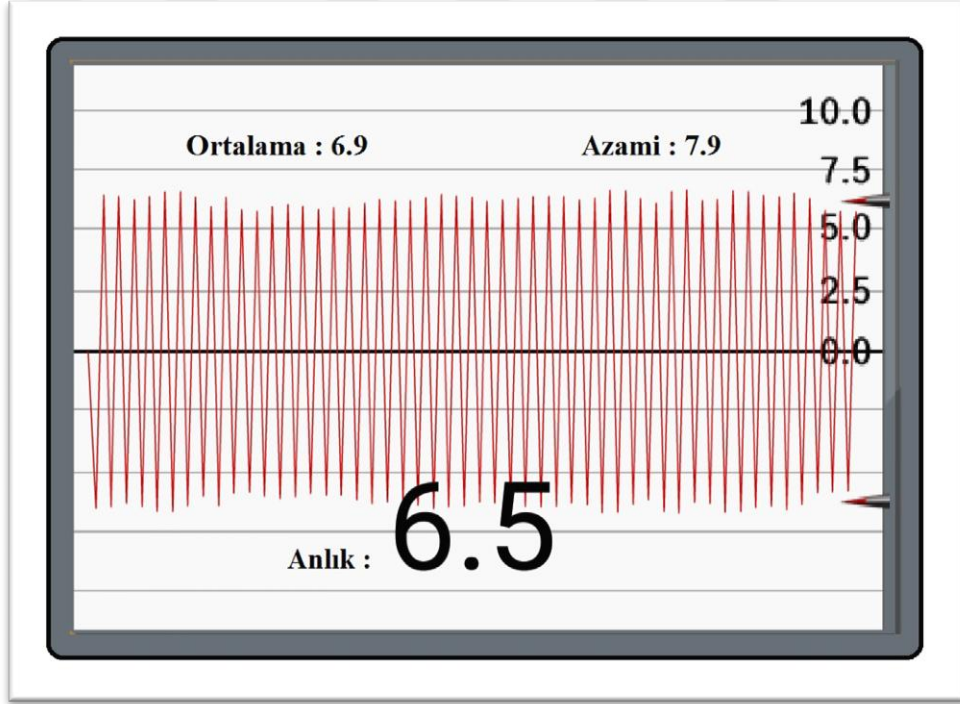
Şekil 10.8. Benzinle ve Doğalgazla Çalışma Durumlarında 3000 [dak⁻¹] Motor Devrindeki Özgül Enerji Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Bu çalışmada elde edilen verilere göre, aynı şartlarda ve 3000 [dak⁻¹] motor devrinde; doğalgazla çalışma durumundaki özgül enerji maliyetinin, benzinle çalışma durumundaki özgül enerji maliyetinden %56 daha ekonomik olduğu görülmektedir. Bu karşılaştırma, deney motorunun benzinle çalıştırılma durumundaki en düşük özgül yakıt tüketim değerinin elde edildiği 3000 [dak⁻¹] motor devri için hesaplanmıştır. Diğer motor devirlerinde ise özgül yakıt tüketiminin genel anlamda kütleli olarak daha fazla olduğu bilinmektedir. Ayrıca doğalgazın, benzine oranla çok daha ucuz bir yakıt olmasından dolayı; diğer motor devir sayılarında da özgül doğalgaz tüketim maliyetinin, özgül benzin tüketim maliyetinden daha düşük olduğu bilinmektedir. Tüm bu verilere istinaden, buji ateşlemeli homojen dolgulu bir motorda, benzin yerine doğalgaz kullanılması durumunda; özgül yakıt tüketim maliyetinin asgari olarak %50 oranında azalacağı düşünülmektedir.

10.1.7. Titreşim Yoğunluğunun Değerlendirilmesi

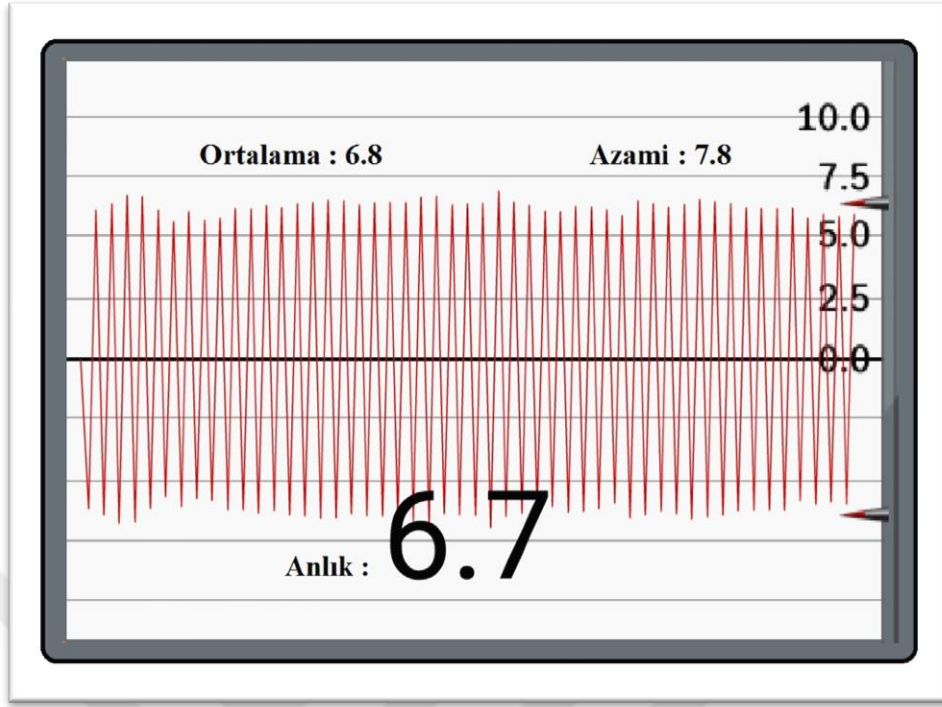
Her iki yakıtın kullanılması durumunda da, titreşim şiddetini ölçmeden önce motorun rölanti dalgalanmasının en asgari seviyeye düşmesi için, motorun rölanti devrindeki ideal çalışma düzenine ulaşıncaya kadar motor çalıştırılmıştır. Deney motoru ideal çalışma düzenine ulaştıktan sonra titreşim şiddeti ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Deney motoru, doğalgaz ile çalışma durumunda; rölanti devrinde çalıştırılarak 60 saniye süre ile titreşim yoğunluğu ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümde titreşim skalasında ortalama 6.9 değerinde, azami olarak ise 7.9 değerinde titreşim yoğunluğu olduğu gözlenmiştir. Doğalgazla çalışma durumunda ölçülen, titreşim yoğunluğu; Şekil 10.9'da gösterilmiştir.



Şekil 10.9. Doğalgazla Çalışma Durumundaki Titreşim Yoğunluğu

Deney motorunun benzinle çalıştırılması durumunda, motor rölanti devrinde 60 saniye süresince çalıştırılarak titreşim yoğunluğu ölçülmüştür. Bu ölçümde; titreşim skalasında ortalama 6.8 değerinde, azami olarak ise 7.8 değerinde titreşim şiddeti olduğu gözlenmiştir. Benzinle çalışma durumunda ölçülen, titreşim yoğunluğu; Şekil 10.10'da gösterilmiştir.



Şekil 10.10. Benzinle Çalışma Durumundaki Titreşim Yoğunluğu

Bu deneysel çalışmada yapılan titreşim ölçümlerinde; homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motorda doğalgaz yakıtı kullanılması durumunda, benzin yakıtı kullanılması durumuna göre %1.47 oranında titreşim yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir.

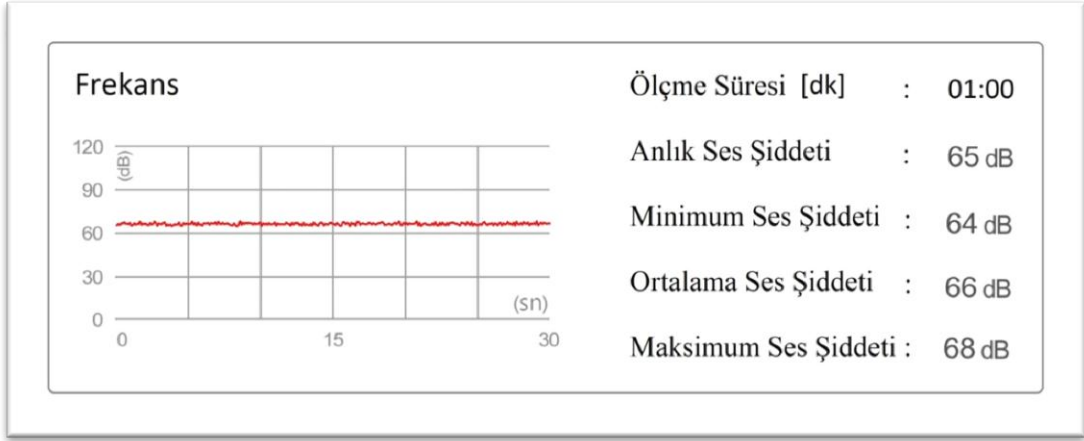
Doğalgazın oktan değeri benzinin oktan değerine oranla daha fazladır; bu sebepten dolayı vuruntuya göre daha dirençli olan doğalgazın yanması esnasında oluşan titreşimin daha az olması beklenilmektedir. Fakat doğalgaz; gaz fazında kuru bir yakıt olmasından dolayı motor çalışırken, benzine göre daha fazla mekanik sürtünmelere sebep olmaktadır. Sürtünmelerin daha fazla olmasının yanı sıra çok az şiddette olsa dahi CNG yakıt dönüşüm sistemi gaz enjektörlerinin çalışma esnasında oluştuğu titreşimden dolayı; doğalgaz yakıtı kullanıldığında benzine göre daha fazla titreşim oluşturmaktadır.

Homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motorda doğalgaz yakıtının kullanılması durumunda titreşim yoğunluğunun ortalama olarak %1.5 oranında daha fazla olması, hissedilebilirlik açısından ihmal edilebilir bir değerdir. Çünkü karayolu trafiğinde seyir halinde olan bir taşıtın motorunun %1-%2 oranında daha fazla titreşim oluşturması, taşıt kabini içerisinde bulunan insanlar tarafından hissedilemeyecek kadar küçüktür. Bu sebepten dolayı doğalgazın yakıt olarak kullanılması durumunda motor titreşimi açısından önemli oranda konfor kaybı yaşanmayacağı düşünülmektedir.

10.1.8. Gürültü Şiddetini Değerlendirilmesi

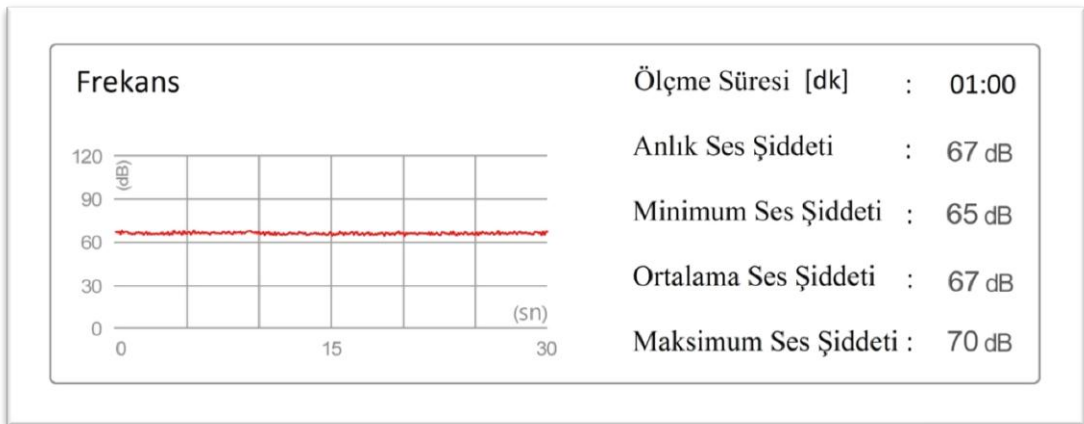
Gürültü şiddeti ölçülmeden önce motorun ideal çalışma düzenine ulaşması ve rölanti devrindeki dalgalanmaların en asgari seviyeye düşmesi için motor bir süre çalıştırılarak beklenilmiştir. Deney motoru ideal çalışma dengesine ulaştıktan sonra gürültü şiddeti seviyeleri ölçülmüştür.

Deney motorunda doğalgaz yakıtının yakıldığı durumda motor rölanti devrinde ve yüklenmeden çalıştırılarak 60 saniye süre ile oluşan gürültü sesi ölçülmüştür. Yapılan bu ölçümde, ekrandan okunan değerler ve frekans; Şekil 10.11’de gösterilmiştir.



Şekil 10.11. Doğalgazla Çalışma Durumunda Ölçülen Ses Şiddeti ve Frekansı

Benzin yakıtı yakılarak deney motorun çalıştırılması durumunda, motor rölanti devrinde 60 saniye süresince çalıştırılarak, oluşan gürültü ölçülmüştür. Bu ölçümde; ekrandan okunan değerler ve frekans; Şekil 10.12’de gösterilmektedir.



Şekil 10.12. Benzinle Çalışma Durumunda Ölçülen Ses Şiddeti ve Frekansı

Bu deneysel çalışmada yapılan, gürültü ölçümü deneylerinden elde edilen veriler karşılaştırılırken; deney motorunda benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda oluşan gürültü temel parametre olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla deney motorunda doğalgaz yakılması durumunda, oluşan gürültünün; benzin yakıtının yakılması durumuna göre, yüzde olarak değişim oranı hesaplanmıştır. Karşılaştırma ve hesaplama sonuçları Tablo 10.8’de gösterilmiştir.

Tablo 10.8. Doğalgaz ve Benzinle Çalışmada Ölçülen Gürültü Şiddetlerinin Karşılaştırılması

<i>Ölçülen Büyüklük</i>	<i>Benzinle Çalışma Durumu</i>	<i>Doğalgazla Çalışma Durumu</i>	<i>Fark [%]</i>
Minimum Ses Şiddeti	65 dB	64 dB	≈ 1,54
Ortalama Ses Şiddeti	67 dB	66 dB	≈ 1,50
Maksimum Ses Şiddeti	70 dB	68 dB	≈ 2,86

Yapılan hesaplamalar sonucunda görülmektedir ki; homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motorda doğalgaz yakıtı kullanılması durumunda, benzin yakıtı kullanılması durumuna göre yaklaşık olarak %1.50 oranında ortalama ses şiddetinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca deney motorunda benzin yerine doğalgaz kullanılması durumunda minimum ses şiddetinde yaklaşık olarak %1,54 oranında azalma olduğu ve maksimum ses şiddetinde ise yaklaşık olarak %2,86 oranında azalma olduğu tespit edilmiştir.

Homojen dolgulu buji ateşlemeli bir motorda doğalgaz yakıtının kullanılması durumunda, benzin yakıtının kullanımına oranla daha az gürültü olduğu görülmüştür. Doğalgazla çalışmada daha az gürültü oluşmasının; doğalgazın oktan değerinin, benzinin oktan değerine oranla daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Motor doğalgaz ile çalıştırıldığı durumda aktif hale geçen gaz enjektörleri motor gürültüsüne rağmen insan işitme organları tarafından ayrıca fark edilmektedir. Dolayısıyla gaz enjektörlerinin fark edilir oranda bir gürültü oluşturmasına rağmen, genel anlamda motorun çalışma gürültüsünü desibel biriminde sayısal olarak artırmadığı yapılan bu çalışmada tespit edilmiştir. Bu durum; desibel biriminin logaritmik bir birim olduğu için ses seviyesi daha düşük olan bir kaynağın oluşturduğu gürültü, ses seviyesi daha yüksek olan bir kaynağın oluşturduğu gürültüyü pek fazla yükseltmemesiyle açıklanmaktadır [65].

İnsanlar sosyal yaşam alanları içerisinde; trafik gürültüsü, inşaat gürültüsü, endüstriyel gürültüler, günlük yaşamın getirdiği aktivasyon gürültüleri, insan ve hayvanlardan oluşan gürültüler gibi çeşitli gürültülere maruz kalırlar. İnsanların maruz

kaldığı gürültüler içerisinde en rahatsız edici olan trafik gürültüsüdür. Karayolu trafiğinde oluşan gürültülerin, çok sayıda kaynağa bağlı olmasından ve yayılım yollarının çeşitliliğinden dolayı çözümü oldukça zor olan bir akustik problemdir. Bu sebeple teorik çalışmaların yanı sıra, deneysel çalışmalar yapılarak bu akustik problem çözülmeye çalışılmaktadır [63,64,66,67].

Karayolu trafiğinde taşıtların ürettiği gürültü kaynakları; motorun mekanik gürültüsü, şanzıman gürültüsü, diferansiyel gürültüsü, soğutma fanı gürültüsü, aerodinamik gürültüler(tekerlek ve yol etkisinden oluşan gürültüler), egzoz sistemi gürültüleri, hava emme gürültüsü, şaşı ve karoser titreşimlerinden oluşan gürültülerdir [64].

Karayolu trafiğinde gürültüye neden olan kaynakların önem derecesi, taşıtın cinsine ve çalışma şartlarına bağlıdır. Binek otomobillerde ve hafif ticari taşıtlarda düşük vites ve düşük hızlarda motor gürültüsü baskın karakter göstermektedir. Yüksek vites ve yüksek hızlarda ise taşıtın hareketinden oluşan yol ve lastik gürültüsü, taşıtın güç ünitesine göre daha baskın gürültü oluşturmaktadır. Ancak yüksek hacimli dizel motorlara sahip ağır ticari taşıtlarda ise taşıtın güç ünitesine bağlı gürültüler her şartta daha baskın karakter göstermektedir [64,68].

Çoğunluğu teorik çalışmalar olmakla birlikte, yapılan çalışmalar göstermektedir ki; bir taşıtın oluşturduğu toplan gürültü hacminin %40'ını egzoz sistemi oluşturmaktadır [69-73].

Önemli miktarını motorlu taşıtların oluşturduğu gürültü kirliliği, insanları rahatsız ettiği gibi önemli oranda insan sağlığını tehdit etmektedir. Gürültü kirliliğinin insan sağlığı üzerinde;

- Anlık veya sürekli psikolojik rahatsızlıklar (davranış bozuklukları, heyecan, panik, korku)
- Zihinsel fonksiyon bozuklukları (okuma, anlama, çalışma, düşünme ve karar verme yetilerinde oluşan kayıplar)
- Sözel iletişim zorluğu
- İşitme duyusu ve işitme yollarında geçici ya da kalıcı hasarlar
- Kalp atış hızının artması, solunum fonksiyonlarında bozulmalar, kan basıncında ani değişimler gibi birçok etkileri bulunmaktadır.

İnsan kulağının işitebileceği ses şiddeti 0 dB ile 140 dB aralığındadır. Fakat uygun işitme aralığı 0 dB ile 120 dB aralığındadır. 0 dB duyma eşiği, 120 dB ise ağrı eşiği olarak tanımlanmaktadır. 120 dB ses şiddetinde insan kulağı rahatsızlık duymaya başlamaktadır.

125-130 dB aralığında kulakta ağrılar meydana gelir ve 140 dB ve üzerindeki ses şiddetlerinde kulak zarında yırtılmalar meydana gelir [65].

Gürültü en belirgin olarak işitme organlarını etkiler ve akustik zedelenmelere neden olur; travma, geçici eşik kaybı veya kalıcı eşik kaybına neden olmaktadır [65].

İnsan kulağı 20-20000 Hertz arasındaki sesleri duyabilir. 20 hertzın altındaki sesler infrasonik ses, 20000 hertzın üzerindeki sesler ise ultrasonik sesler olarak tanımlanmaktadır. İnfrasonik ve ultrasonik sesler, insanlarda; bulantı, baş ağrısı ve huzursuzluğa neden olmaktadır. Bu ses kaynaklarının başlıca nedenden biri ise trafik gürültüsüdür. Gürültü havada bulunan partiküllerin ses dalgalarının etkisiyle sıkışıp genişlemesine bağlı olarak ortaya çıkan bir etkidir [65].

Sesin temel iki karakteristiği frekans ve şiddettir. Sesin düşük veya yüksek olduğunu tanımlamak için kullanılan frekans, saniyedeki titreşim sayısıdır. Sesin şiddeti ise doğrudan kulak zarında oluşan mekanik basınçla ilişkilidir. İnsan için kulak kepeğine ulaşan sesin şiddeti dB birimi ile ölçülmekte ve tanımlanmaktadır. İnsan kulağını frekans hassasiyeti dB(A) birimi ile ölçülür ve ifade edilir. Fiziksel gürültü seviyesinin logaritmik ölçümüdür. Sesin olduğu yerdeki frekans ağırlığını belirtir [65].

Ses titreşen bir cisimden kaynaklanan mekanik enerjinin maddesel bir ortamda oluşturduğu kompresyon dalgalarıyla çevreye yayılan bir enerjidir. Belirli bir güce sahip olan titreşen cismin ortama yaydığı dalgaların oluşturduğu basınçlar, ses basıncı olarak tanımlanır [64].

Yapılan deneysel çalışmalardan anlaşıldığı gibi insan işitme organı ses basıncına logaritmik reaksiyon göstermektedir. Bu nedenle gürültü ve ses ölçümlerinde logaritmik bir değer olan Bel(B) birimi kullanılır. Bel çok geniş bir sayısal aralığa hitap eden birim olduğundan dolayı desibel (dB) yaygın olarak kullanılmaktadır [64].

Desibel lineer bir ölçü birimi değildir. 10 desibel şiddetindeki bir ses 1 desibel şiddetindeki bir sesin 10 katı büyüklüğündedir, 20 desibel şiddetindeki bir ses ise 1 desibel şiddetindeki bir sesin 100 katı büyüklüğündedir. Yine aynı şekilde 40 desibel şiddetindeki bir ses 1 desibel şiddetindeki bir sesin 10000 katı büyüklüğündedir [65]. Dolayısıyla deney motorunun, doğalgaz yakıtı yakılarak çalıştırılması durumunda; ortalama ses şiddetinde 1 desibel azalma ya da maksimum ses şiddetinde 2 desibel kadar azalma sağlanması desibel biriminin lineer olmamasından dolayı gürültü kirliliği açısından oldukça önemli miktarda bir kazançtır.

10.2. Egzoz Gazı Emisyonlarının ve Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi

Deney motorunun, benzin ve doğalgaz yakıtlarıyla çalıştırılması durumlarında:

1. Tam Yükleme ve Tam Gaz Açıklığı Şartlarında;

- HC emisyonları,
- CO emisyonları,
- CO₂ emisyonları,
- NO emisyonları,
- Egzoz gazı sıcaklıkları,

2. Yükleme Yapılmaksızın Rölanti Devrinde;

- HC emisyonları,
- CO emisyonları,
- CO₂ emisyonları,
- NO emisyonları,
- O₂ emisyonları,
- CO_{cor} değeri,
- Egzoz gazı sıcaklıkları,

manifold çıkışından ölçülerek; incelenmiş, değerlendirilmiş ve irdelenerek karşılaştırılmıştır.

3. Sabit yük ve kısmi gaz açıklığı şartı ile motor devir sayısının artırılması şartlarında;

hem benzinle çalışma durumundaki hem de doğalgazla çalışma durumundaki;

- HC emisyonları
- CO emisyonları
- CO₂ emisyonları
- O₂ emisyonları
- NO emisyonları
- Hava Fazlalık Katsayısı

4.Rölanti devrinde ve yükleme yapılmaksızın, benzinle ve doğalgazla çalışma durumundaki;

- HC emisyonları
- CO emisyonları
- CO₂ emisyonları
- NO emisyonları
- O₂ emisyonları
- Hava Fazlalık Katsayısı

susturucu çıkışından ölçülerek, değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada deney motorunun benzin ve doğalgaz yakıtı ile çalıştırılma durumlarında; farklı motor devirlerinde ve yük koşullarındaki CO, CO₂, HC, NO emisyonları ve egzoz gaz sıcaklıkları bu bölümde tablolar halinde verilmiş ve grafikler çizilerek incelenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda her iki yakıtın kullanılması durumundaki değişimler karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

10.2.1. Tam Gaz Açıklığı ve Tam Yük Şartlarında Egzoz Gazı Emisyonlarının ve Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi

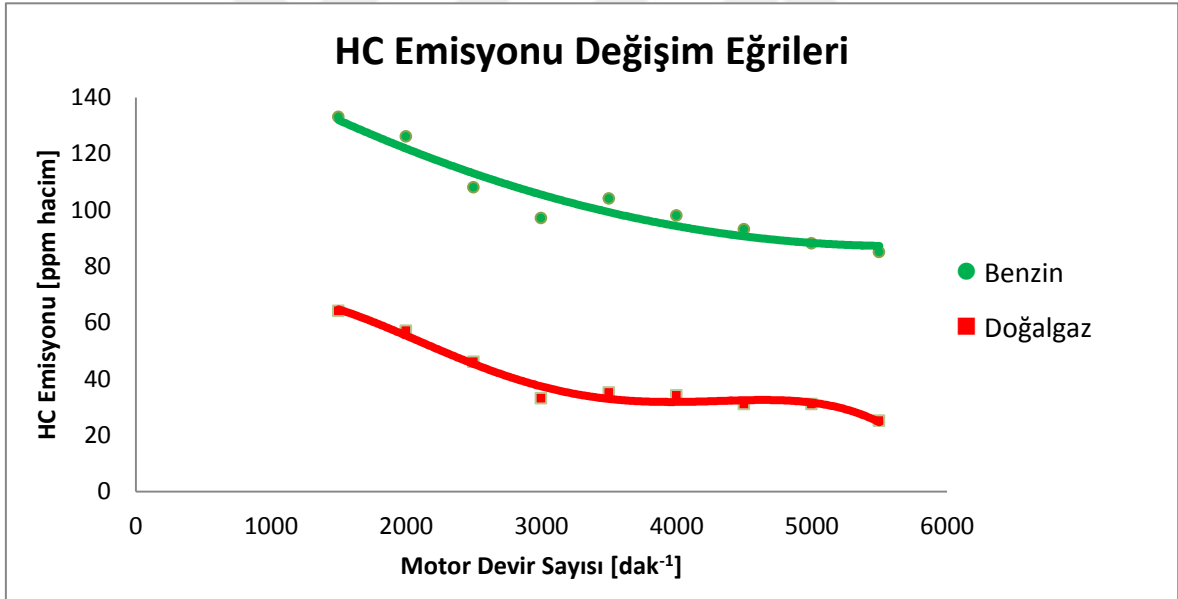
Tam gaz açıklığında ve tam yük şartlarında; deney motorunda benzin ve doğalgaz yakıtlarının kullanılması durumlarında, HC, CO, CO₂ ve NO emisyonlarının ve egzoz gazı sıcaklıklarının motor devir sayısına göre değişimleri incelenmiştir.

10.2.1.1. HC Emisyonlarının Değerlendirilmesi

Tablo 10.9’da, deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan egzoz gazı emisyon ölçümü değerlerinden; HC emisyonu değerleri hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için verilmiştir. Bu deneyde elde edilen HC emisyonlarına ait değerlerin, motor devir sayısına bağlı değişim eğrileri, Şekil 10.13’te grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 10.9. Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyon Değerleri

<i>Gaz Açıklığı : %100</i> <i>Yükleme : %100</i>		
Motor Devir Sayısı [dak⁻¹]	HC [ppm hacim] Benzin	HC [ppm hacim] Doğalgaz
1500	133	64
2000	126	57
2500	108	46
3000	97	33
3500	104	35
4000	98	34
4500	93	31
5000	88	31
5500	85	25



Şekil 10.13. Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişim Eğrileri

Deney motorunda doğalgaz yakıtı kullanılması durumunda, benzin yakıtı kullanımına göre; HC emisyonu değerlerinin daha düşük olduğu, Şekil 10.13'teki grafikten görülmektedir. Motorun devir sayısı arttıkça, emilen havanın hızındaki artışa bağlı olarak türbülans artmakta ve dolgunun karışım hızı artmaktadır. Dolayısıyla motor devir sayısı, karışım hazırlanma karakteristiğinde ve yanma reaksiyonu süreçlerinde oldukça etkilidir. Motor devir sayısı artışına bağlı olarak HC emisyonlarındaki azalmanın, dolgu

karişim hızının artması ve hava türbülansına bağlı gelişen bir durum olarak açıklanabilir. Ayrıca motor devir hızının artmasıyla sürtünme kayıplarındaki artışla birlikte HC emisyonları azalmaktadır [74]. Doğalgazın, gaz fazında bir yakıt olması benzine göre daha hızlı buharlaşma karakteristiği göstermesinden dolayı; HC emisyonları daha düşük seviyededir.

Bir egzoz emisyonu olan hidrokarbonların, yanma zamanında yakılmayan ve egzoz zamanında egzoz gazları ile birlikte atılan yakıt parçacıkları olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla oksijen ile reaksiyona girmeyen yakıt parçacıkları, HC emisyonu olarak tanımlanmaktadır. Yanma odası içerisinde oluşan fakir karişımlar ve yanma reaksiyonu için yeterli sürenin olmaması HC emisyonlarını artırmaktadır. Doğalgazın difüzyon hızının benzine oranla daha yüksek olmasından dolayı, hava ile homojenize karişımı benzine göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak ta homojenize haldeki dolgunun yanma süresi, doğalgazla çalışmada daha fazladır. Yanma süresinin daha fazla olmasının doğal sonucu olarak doğalgazla çalışmada daha az miktarda HC emisyonu oluşmuştur. Hem benzin kullanılması hem de doğalgaz kullanılması durumlarında; HC emisyon eğrilerinin, motor devir sayısının artışına bağlı olarak lineer bir azalma göstermemesinin sebebi karişımın fakirleşmesi ve yanma için yeterli sürenin olmamasıyla açıklanabilir.

Tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında gerçekleştirilen bu ölçümlerde devir sayısına bağlı olarak güç artışı söz konusudur. Motor devir hızının artmasına bağlı olarak güç artışıyla birlikte alev sönme bölgesi küçülmektedir. Alev sönme bölgesinin küçülmesiyle, HC emisyonları önemli oranda azalmaktadır. Dolayısıyla devir sayısı ile birlikte artan yükleme oranındaki artış HC emisyonlarının azalmasını sağlamıştır.

Ayrıca her iki yakıt türünün kullanımında da en yüksek HC emisyon değerinin 1500 [dak⁻¹] motor devrinde oluştuğu görülmektedir. Deney motorunda doğalgaz kullanılması durumunda ölçülen en yüksek HC emisyon değeri hacimsel olarak 64 ppm, benzin kullanılması durumunda ise hacimsel olarak 133 ppm olarak ölçülmüştür. Deney motorunda benzin yakıtı kullanılması durumunda en düşük HC emisyon değeri 5500 [dak⁻¹] motor devrinde hacimsel olarak 85 ppm, doğalgaz kullanılması durumunda ise yine 5500 [dak⁻¹] motor devrinde 25 ppm olarak ölçülmüştür. Tüm motor devirlerinde her iki yakıt türü için ölçülen HC emisyon değerleri karşılaştırılırsa, benzin yerine doğalgaz kullanılması halinde; HC emisyonlarında ortalama olarak %61,8 oranında azalma görülmüştür.

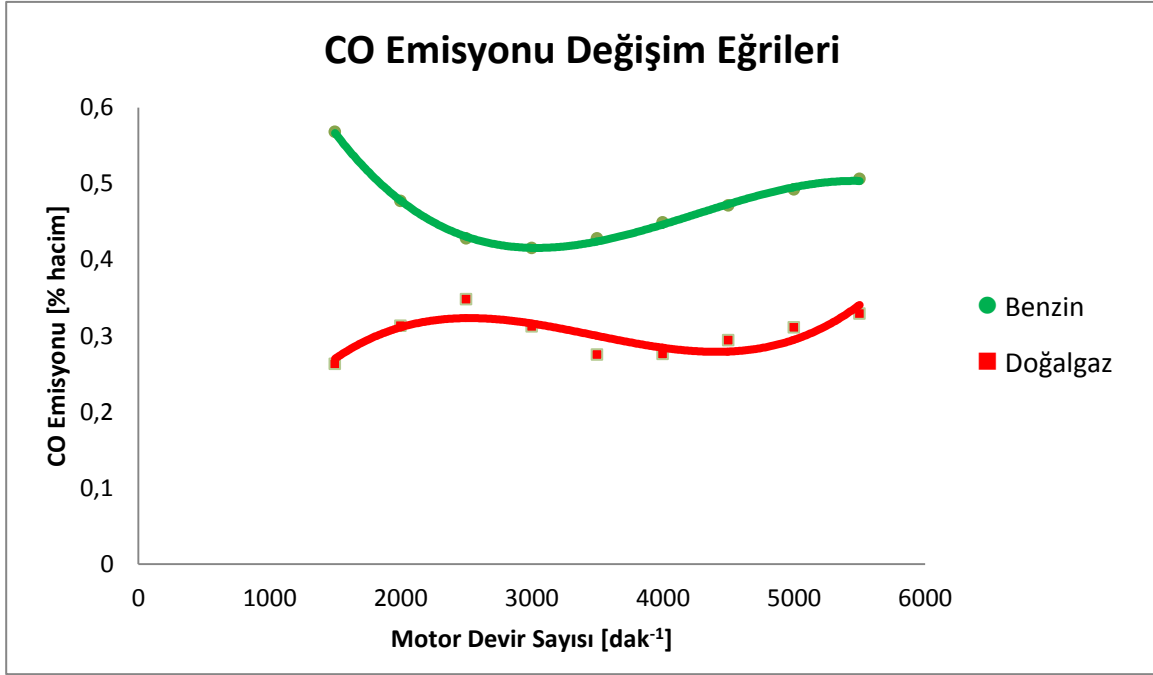
Deney motorunda doğalgaz kullanılması halinde ölçülen HC emisyon değerlerine göre 4500 [dak⁻¹] motor devrine oranla 5000 [dak⁻¹] motor devrinde HC emisyonunda azalma görülmemiştir. Devir sayısının artmasına bağlı olarak HC emisyon değerlerinin düşmemesi, yanmayan yakıt parçalarının var olduğu ve yanma veriminin düştüğünü göstermektedir. Tablo 10.2’de görüldüğü gibi motor efektif güç artış hızının 5000 [dak⁻¹] devir bandında düşmesi de bu durumun bir sonucudur. Bu durumun doğalgaz yakıtıyla çalışma durumunda gerçekleşmesi, motorun benzin yakıtına göre tasarlanmış olmasıyla açıklanabilir.

10.2.1.2. CO Emisyonlarının Değerlendirilmesi

Tablo 10.10’da, deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan egzoz gazı emisyon ölçümlerinden; CO emisyonu değerleri hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için verilmiştir. Bu deneysel çalışmada elde edilen CO emisyonlarına ait değerlerin, motor devir sayısına bağlı değişim eğrileri, Şekil 10.14’te grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 10.10. Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyon Değerleri

<i>Gaz Açıklığı : %100</i>		
<i>Yükleme : %100</i>		
Motor Devir Sayısı [dak⁻¹]	CO [% hacim] Benzin	CO [% hacim] Doğalgaz
1500	0,568	0,263
2000	0,477	0,313
2500	0,428	0,348
3000	0,415	0,312
3500	0,428	0,275
4000	0,449	0,276
4500	0,471	0,294
5000	0,492	0,311
5500	0,506	0,329



Şekil 10.14. Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyon Değişim Eğrileri

Tüm motor devir sayılarında ölçülen CO emisyon değerlerinin; doğalgazla yapılan çalışmada, benzinle yapılan çalışmaya oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Benzinle yapılan çalışmada en yüksek CO emisyonu, 1500 [dak⁻¹] motor devrinde hacimsel olarak %0,568 değerinde ölçülmüştür. Doğalgazla yapılan çalışmada ise en yüksek CO emisyonu, 2500 [dak⁻¹] motor devrinde % hacim olarak 0,348 değerinde ölçülmüştür. Ölçülen en düşük CO emisyonuna bakıldığında ise; benzinle çalışma durumunda 3000 [dak⁻¹] motor devrinde % hacim olarak 0,415 değerinde, doğalgazla çalışma durumunda ise 1500 [dak⁻¹] motor devrinde % hacim olarak 0,263 değerinde ölçülmüştür. Tüm motor devirlerinde ölçülen CO emisyon değerlerinin; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre ortalama olarak %35,73 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

CO emisyon eğrilerine bakılırsa, benzin kullanılması durumunda 3000 [dak⁻¹] motor devrine kadar CO emisyonlarının azaldığı ve 3000 [dak⁻¹] motor devrinden sonra arttığı görülmektedir. Deney motorunda 3000 [dak⁻¹] motor devrine kadar ortalama efektif basıncın arttığı ve 3000 [dak⁻¹] motor devrinden sonra ortalama efektif basıncın azaldığı yapılan deneylerle tespit edilmiştir. CO emisyon değerlerinin azalması; yanma veriminin artmasına, motor devir hızına, ortalama efektif basınca, yanma reaksiyonu süresine bağlı olmasıyla açıklanabilir. Tam yanma olayının gerçekleşmesi için gereken süre, yüksek motor devirlerinde çok kısadır. Yüksek motor devirlerinde yanma süresinin kısa olması

eksik yanmaya ve CO emisyon değerlerinin artmasına sebep olmaktadır. 3000 [dak⁻¹] motor devrinden sonra CO emisyon değerlerinin artması ise yanmanın kötüleştiğini göstermektedir ve bu durum CO emisyonlarını oksidasyona uğraması için yeterli sürenin olmamasıyla açıklanmaktadır.

Doğalgaz kullanılması durumunda ise; CO emisyonu eğrisine bakılırsa, 2500 [dak⁻¹] ile 4000 [dak⁻¹] motor devir bandında CO emisyon değerlerinde azalma görülmektedir. Bu devir bandından daha düşük motor devirlerinde ve daha yüksek motor devirlerinde; CO emisyon eğrilerinde artış görülmektedir. Dolayısıyla, deney motorunun doğalgaz ile çalıştırılması durumunda en iyi yanma ve oksidasyon şartları 2500 [dak⁻¹] ile 4000 [dak⁻¹] motor devir sayıları arasında gerçekleşmiştir. Doğalgaz yakıtının kullanılarak motorun çalıştırılması durumunda ölçülen CO emisyon değerlerine göre oluşturulan eğri, benzin ile çalıştırılma durumdaki eğriye karakteristik olarak benzememektedir. Bu durum deney motorunun benzin yakıtına göre tasarlanmış olmasıyla açıklanmaktadır. Ayrıca 2500 [dak⁻¹] ile 4000 [dak⁻¹] motor devir bandının, altındaki ve üzerindeki CO emisyon değerleri artışının; başta ortalama efektif basınç olmak üzere sıcaklığa ve oksidasyon için yeterli sürenin olmamasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

Yanma odasında; doğalgaz, benzine göre daha fazla gaz fazında yakılmaktadır. Bu durum, oluşacak reaksiyonların mertebesi açısından önemlidir. Gaz yanma reaksiyonlarının hızı üzerinde; yanma odası içeriği, gazların enerji seviyesi, gaz moleküllerinin çarpışma sıklığı ve ekzotermik reaksiyon verebilecek çarpışma yoğunluğunun etkili olduğu bilinmektedir. Yanma sırasında CO₂ oluşumu, CO oluşumuna göre daha fazla ısı enerjisi vermesine rağmen; yanma sırasında bir önceki çevrimden kalan CO₂'nin, inert durumda bulunması fazla hava içerisindeki reaksiyona iştirak etmemiş O₂ molekülleri ile çarpışarak ortamın enerji seviyesini düşürebilir. Bu durum, CO₂ ile aynı durumda olan N₂ için de söylenebilir. Hava hareketlerini etkileyen motor devrinin, kimyasal reaksiyonlar üzerinde etkili olduğu birçok araştırmada belirtilmiştir. Doğalgazla çalışmada CO emisyonunun daha düşük olması; gaz fazında olan doğalgaz üzerinde hava hareketlerinin daha etkili olduğunu göstermektedir.

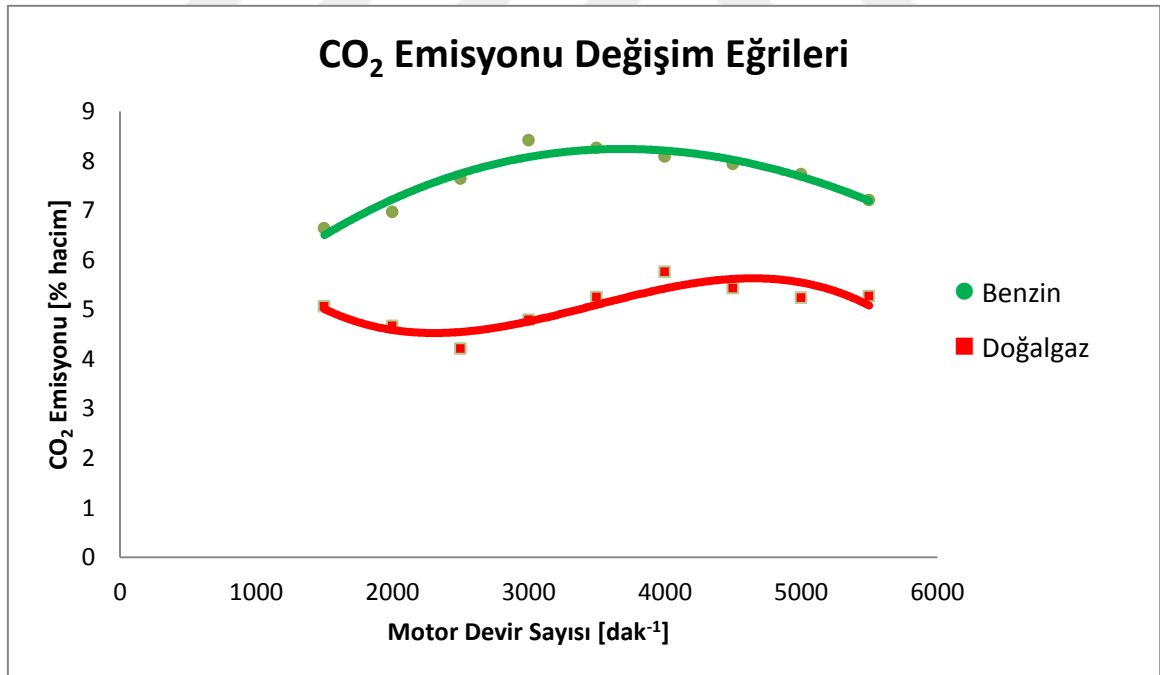
10.2.1.3. CO₂ Emisyonlarının Değerlendirilmesi

Deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan egzoz gazı emisyon ölçümü değerlerinden; CO₂ emisyonu değerleri hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için, Tablo 10.11'de

verilmiştir. Deneyleerde elde edilen CO₂ emisyonlarına ait değerlerin, motor devir sayısına bağlı değişimi, Şekil 10.15'te grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 10.11. Motor Devir Sayısına Bağlı CO₂ Emisyon Değerleri

<i>Gaz Açıklığı : %100</i>		
<i>Yükleme : %100</i>		
Motor Devir Sayısı [dak ⁻¹]	CO ₂ [% hacim] Benzin	CO ₂ [% hacim] Doğalgaz
1500	6,64	5,06
2000	6,97	4,67
2500	7,64	4,21
3000	8,42	4,79
3500	8,26	5,25
4000	8,09	5,76
4500	7,94	5,43
5000	7,73	5,24
5500	7,21	5,27



Şekil 10.15. Motor Devir Sayısına Bağlı CO₂ Emisyonu Değişim Eğrileri

Ölçüm yapılan tüm motor devir sayılarında; deney motorunun doğalgaz ile çalıştırılması durumunda ölçülen CO₂ emisyon değerlerinin, benzin ile çalışma durumunda ölçülen CO₂ emisyon değerlerine oranla daha düşük olduğu görülmüştür.

Deney motorunda benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda; en yüksek CO₂ emisyon değeri, 3000 [dak⁻¹] motor devrinde hacimsel olarak %8,42 değerinde ölçülmüştür. Deney motorunda doğalgaz yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması durumunda ise en yüksek CO₂ emisyonu 4000 [dak⁻¹] motor devrinde, hacimsel olarak %5,76 değerinde ölçülmüştür. Benzin ile çalışma durumunda en düşük CO₂ emisyon değeri hacimsel olarak %6,64 olarak 1500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçülmüş olup; doğalgaz ile çalışma durumunda ise en düşük CO₂ emisyon değeri hacimsel olarak %4,21 olarak 2500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçülmüştür. Tüm motor devirlerinde ölçülen CO₂ emisyon değerleri karşılaştırıldığında; motorun doğalgaz ile çalıştırılması durumunda, benzinle çalıştırılması durumuna göre CO₂ emisyon değerlerinde ortalama olarak %33,7 oranında azalma tespit edilmiştir.

Benzin yakıtının yakılarak motorun çalıştırılması halinde yapılan egzoz gazı emisyon ölçümlerinde; CO₂ emisyon değerlerinin 3000 [dak⁻¹] motor devrinde maksimum değere ulaştığı görülmektedir. 3000 [dak⁻¹] motor devrinin daha altındaki motor devir sayılarında CO₂ emisyon değerlerinin artış gösterdiği ve bu devir bandının üzerindeki devirlerde ise CO₂ emisyonunun düştüğü görülmektedir. CO₂ egzoz emisyon değerinin yüksek olması, iyi bir yanmanın göstergesidir. Dolayısıyla benzinle çalışma durumundaki CO₂ emisyon eğrisi incelendiğinde; eğrinin maksimum değerlere ulaştığı motor devrinde, ortalama efektif basınçta maksimum değerdir. Bununla birlikte CO₂ emisyonu eğrisinde; ortalama efektif basıncın artışına bağlı olarak, CO₂ emisyonunun da arttığı görülmektedir. Ayrıca düşük motor devir hızlarında oksidasyon için gereken sürenin daha fazla olması ve mevcut oksijen konsantrasyonunun etkisiyle CO₂ emisyon değerleri artmaktadır. Bu durum yanmanın iyileşme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ortalama efektif basınç, maksimum değerine ulaştıktan sonra motor devir hızının artmasıyla birlikte düşmektedir. Bu durumda yanmanın kötüleşmesi ve oksidasyon için yeterli sürenin olmaması sonucunda, CO₂ emisyonlarının azalması beklenen bir sonuçtur.

Yanma zamanında eksik yanma sonucu CO emisyonlarının genişleme zamanında oksidasyona uğrayarak CO₂ emisyonlarına dönüştüğü bilinmektedir. İyi bir yanma sonucunda CO emisyon değerlerinin azalması, CO₂ emisyonlarının artması beklenmektedir. Deney motorunda hem benzin yakıtının kullanılması hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumlarında gerçekleştirilen CO ve CO₂ emisyon eğrilerinin birbirine zıt karakteristikte paralellik göstermesi bu durumu doğrulamaktadır.

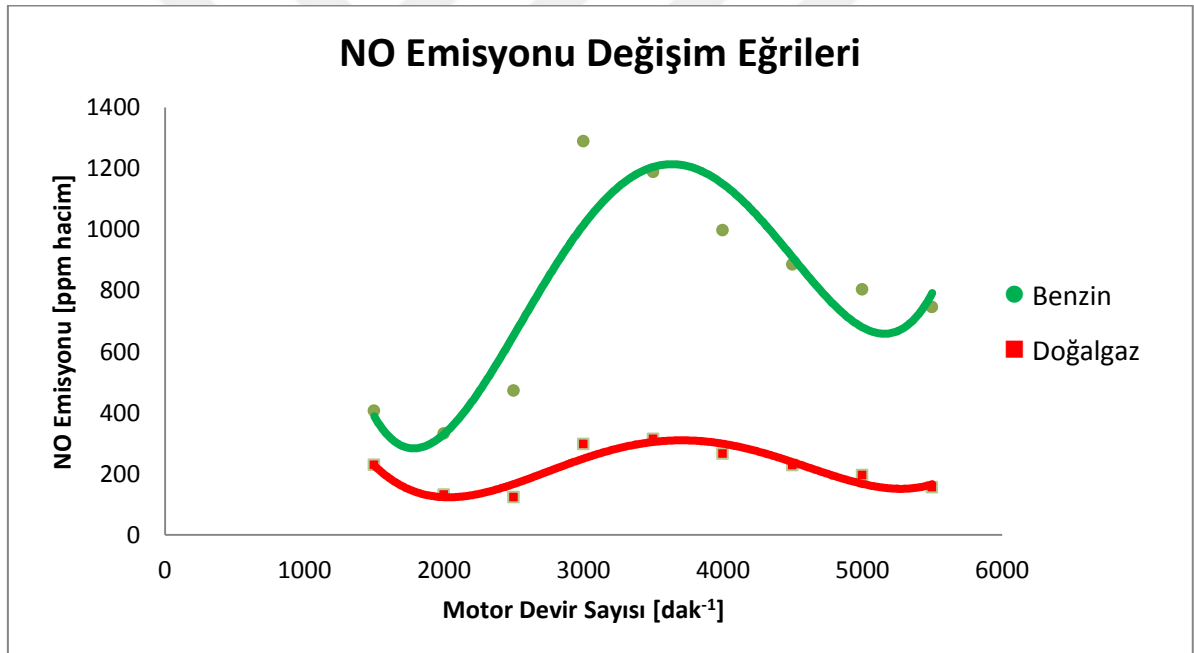
Grafikteki eğrilerde de görüldüğü gibi benzin yakıtının kullanılması durumunda oluşan CO₂ emisyonu eğrisi ile doğalgaz yakıtının kullanılması durumunda oluşan CO₂ emisyon eğrisi; karakteristik benzerlik göstermemektedir. Doğalgaz ile motorun çalıştırılması durumundaki CO₂ emisyon eğrisine bakılırsa, motor devir sayısının artışıdan bağımsız olarak CO₂ emisyon değerleri dalgalanmalar göstermiştir. Bu durum doğalgazın yanma reaksiyonundaki karakteristiğinin ve fiziksel özelliklerinin benzininkinden farklı olmasının ve deney motorunun da doğalgaz yakıtına göre tasarlanıp imal edilmemesinin bir sonucu olduğu düşünülmektedir. Ayrıca CO₂ emisyonlarının oluşumunda, motor devir hızının doğrudan etkisinin olmaması, CO₂ emisyonlarının oluşumunun belirli bir motor devir hızında oluşacak reaksiyon için gerekli zamana ve oksidasyon hızına bağlı bir fonksiyon olması bu durumu açıklamaktadır. Sonuç itibarıyla oksidasyon süresinin, yanma odası sıcaklık değerlerinin, hava-yakıt oranlarının ve yanma fonksiyonlarının farklılığından dolayı doğalgazla çalışma durumunda ölçülen CO₂ emisyon değerleri eğrisi, benzinle çalışma durumuyla aynı karakteristiği göstermemiştir.

10.2.1.4. NO Emisyonlarının Değerlendirilmesi

Deney motorunun tam gaz açıklığı ve tam yük şartlarında yapılan egzoz gazı emisyon ölçümü değerlerinden; NO emisyonu değerleri hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için, Tablo 10.12'de verilmiştir. Deneylerde elde edilen NO emisyonlarına ait değerlerin, motor devir sayısına bağlı değişimi, Şekil 10.16'da grafik halinde gösterilmiştir.

Tablo 10.12. Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değerleri

<i>Gaz Açıklığı : %100</i> <i>Yükleme : %100</i>		
Motor Devir Sayısı [dak ⁻¹]	NO [ppm hacim] Benzin	NO [ppm hacim] Doğalgaz
1500	407	229
2000	332	132
2500	473	124
3000	1289	298
3500	1188	314
4000	998	266
4500	886	228
5000	804	196
5500	746	156



Şekil 10.16. Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişim Eğrileri

NO emisyonlarının ana kaynağı; emme havasında bulunan moleküler azottur. Buji ateşlemeli motorlarda, yanma zamanında; alev cephesinin ilerlemesi ile yanan karışımın bulunduğu bölgede NO oluşumu başlamaktadır. Yanma olayının tamamlanmasının ardından, pistonun A.Ö.N.'ya doğru hareketi ile yanmış gazlar genişlemeye ve soğumaya başladığı esnada NO oluşumu durmaktadır. Kıvılcımın başladığı, bujiye en yakın bölgelerde yanma daha erken başladığından dolayı; NO oluşumu için tanınan süre daha

fazla olmaktadır [75]. Dolayısıyla her bir çevrim süresince oluşan egzoz emisyonları içerisindeki NO konsantrasyonu, krank mili açısına bağlı değişimler göstermektedir. Her bir çevrim sürecindeki NO emisyonlarının oluşumundaki değişimlerde, motor tasarımının ve yanma reaksiyonunda yakılan yakıtın bileşenlerinin önemli etkisi bulunmaktadır. Ayrıca yanma reaksiyonunun süresi, tutuşma başlaması, alev hızı, sıkıştırma oranı, motor devir hızı ve sıcaklık; buji ateşlemeli motorlarda NO oluşumunu etkileyen temel parametrelerdir.

Grafikteki NO emisyonları değişim eğrilerine bakıldığında her iki yakıtında yakılması sonucunda ortaya çıkan NO emisyonları maksimum noktaya ulaştıktan sonra, motor devir sayısının artmasıyla birlikte azalmıştır. Motor devir sayısının artmasına bağlı olarak NO emisyonlarının azalması; yanma hızının, motor devir sayısına bağlı olarak artmasının bir sonucudur.

Benzin yakıtının kullanılması durumunda 3000 [dak⁻¹] motor devrinde, NO emisyonunun maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir. Deney motorunun 3000 [dak⁻¹] motor devrinde maksimum moment sağladığı göz önünde bulundurulursa; bu noktada ortalama efektif basıncın maksimum seviyede olmasından dolayı sıcaklığın yükseleceği ve bu nedenle NO emisyonlarının en büyük değere ulaştığı söylenilebilir. Öte yandan doğalgaz yakıtının kullanılması durumunda ise NO emisyonlarının 3500 [dak⁻¹] motor devrinde maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Doğalgazın tutuşma sıcaklığının, benzinin tutuşma sıcaklığından daha yüksek olduğu bilinmektedir. Doğalgaz yakıtı kullanılması durumunda, efektif ortalama basıncın maksimum seviyeye ulaştığı motor devrinden daha yüksek olan 3500 [dak⁻¹] motor devrinde, NO emisyonunun maksimum seviyeye ulaşması; doğalgazın kimyasal yapısının benzinden farklı olmasıyla açıklanabilir. Benzine göre tasarlanmış olan motorda doğalgaz kullanılması durumunda; kimyasal yapıdan kaynaklanan termodinamik değişimler olabileceği düşünülmektedir.

NO emisyonunun sıcaklıkla ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu sebepten dolayı efektif ortalama basıncın en yüksek değere ulaştığı motor devrinde NO emisyonu maksimum değere ulaşacaktır. Dolayısıyla efektif ortalama basıncın maksimum değere ulaştığı motor devrine kadar NO emisyonu değerlerinin artış göstermesi beklenilmektedir. Fakat yapılan bu deneysel çalışmada, doğalgazla çalışma durumunda ölçülen NO emisyon değerlerine göre oluşturulan grafikler incelendiğinde; 1500 [dak⁻¹] motor devrinde elde edilen NO emisyonunun, 2000 [dak⁻¹] ve 2500 [dak⁻¹] motor devirlerinde ölçülen NO emisyonlarından daha yüksek değerde olduğu görülmektedir. Bu durumun; 1500 [dak⁻¹] motor devrinde, yanmanın daha fakir bir karışımla gerçekleşmesinin sonucu olduğu öngörülmektedir. Fakir

karışımla gerçekleşen yanma süreçlerinde alev sıcaklığının yüksek olması sebebiyle NO emisyonu daha fazla oluşmaktadır. Deney motorunun tam yük ve tam gaz açıklığında ölçülen hava fazlalık katsayısı değerleri göz önüne alındığında; en yüksek hava fazlalık katsayısı değerinin 1500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçüldüğü görülmektedir ve bu veriler öngörüü desteklemektedir.

Doğalgaz yakıtının kullanılması durumunda açığa çıkan NO emisyon değerleri, benzin yakıtının kullanılması durumdaki NO emisyonlarından daha düşük olduğu ölçülmüştür. Doğalgazın difüzyonu, benzine göre daha hızlıdır ve tutuşma sıcaklığı daha yüksektir. Dolayısıyla doğalgazın kullanılması durumunda daha düşük değerlerde NO emisyonu oluşması beklenen bir sonuçtur. Ayrıca doğalgaz yakıtı yakılarak motorun çalıştırılması durumunda, NO emisyonunun önemli oranda azalması doğalgaz-hava karışımından oluşan dolgunun daha homojen bir yapıda olmasından ve farklı oranda hava/yakıt karışımı ihtiva etmesine bağlı termodinamik değişimler olduğu düşünülmektedir.

En yüksek NO emisyonu; benzinle çalışma durumunda 3000 [dak⁻¹] motor devir hızında ppm hacim olarak 1289 değerinde ölçülmüş olup, doğalgazla çalışma durumunda ise 3500 [dak⁻¹] motor devir hızında ppm hacim olarak 314 değerinde ölçülmüştür. En düşük NO emisyonu; doğalgazla çalışma durumunda 2500 [dak⁻¹] motor devir hızında ppm hacim olarak 124 değerinde ölçülmüş olup, benzinle çalışma durumunda ise 2000 [dak⁻¹] motor devir hızında ppm hacim olarak 332 değerinde ölçülmüştür. NO emisyonlarının maksimuma çıktığı değerler karşılaştırılırsa; benzin yerine doğalgaz kullanımı sonucunda deney motorunun NO emisyonlarında %75,64 oranında azalma görülmektedir. Tam yük, tam gaz açıklığı durumunda ölçülen tüm motor devir hızlarındaki NO emisyon değerleri; genel olarak değerlendirilirse doğalgazla çalışma durumunda benzinle çalışma durumuna oranla NO emisyon değerlerinin ortalama olarak % 68,17 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

10.2.1.5. Egzoz Gazı Sıcaklıklarının Değerlendirilmesi

Deney motorunu tam yükte ve tam gaz açıklığında çalıştırarak, egzoz gazı sıcaklık değerleri; hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için ölçülmüştür. Ölçümler egzoz manifoldu boğazından 125 cm uzaklık mesafesinden, ölçülmüştür. Dolayısıyla egzoz gaz sıcaklıklarının manifold çıkışından ölçülmesi olarak anılmaktadır. Fakat egzoz manifoldundan çıkan gazların,

ölçümün yapıldığı 125 cm mesafesi boyunca boru içinden geçişinde sıcaklıklarını belirli bir oranda kaybettiği bilinmektedir. Ayrıca her iki yakıt türünün de kullanılması durumlarında egzoz gazı sıcaklık ölçümü aynı ortam şartlarında yapılmıştır.

Motorlarda birim zamandaki hız artışına bağlı olarak çevrim sayısı da artmaktadır. Birim zamanda daha fazla sayıda çevrim gerçekleşmesiyle, emme zamanında silindire alınan dolgu miktarı da artar. Dolgu miktarının motor devir hızına bağlı artışının sonucunda, iş zamanında daha fazla ısı enerjisi açığa çıkar. Dolayısıyla motor devir sayısındaki artışa bağlı olarak egzoz gaz sıcaklıklarının artması beklenmektedir. Egzoz gaz sıcaklığı da, tıpkı egzoz emisyon değerleri gibi yanma reaksiyonu hakkında önemli parametreler vermektedir. Her çevrimin egzoz zamanında, egzoz gazları üç periyot halinde silindiri terk eder. İlk periyot egzoz supabının açılmasından A.Ö.N.'ya kadar geçen süredir. Artık gazların önemli miktarı bu periyotta atılır ve bu periyotta gaz basıncı 3-5 bar arasında olup, gazların akış hızı da 600-700 mt/sn'dir [56]. İkinci periyot, pistonun A.Ö.N'dan Ü.Ö.N.'ya hareketinde silindir içinde kalan gazların süpürülerek dışarıya atılmasıdır. Üçüncü periyotta ise emme zamanında silindire emilen dolgunun etkisi ile kalan artık gazların dışarı atılmasıdır. Tablo 10.13'te, hem benzinle çalışma durumunda hem de doğalgazla çalışma durumundaki egzoz gaz sıcaklıklarının motor devir hızına bağlı değişim değerleri verilmiştir.

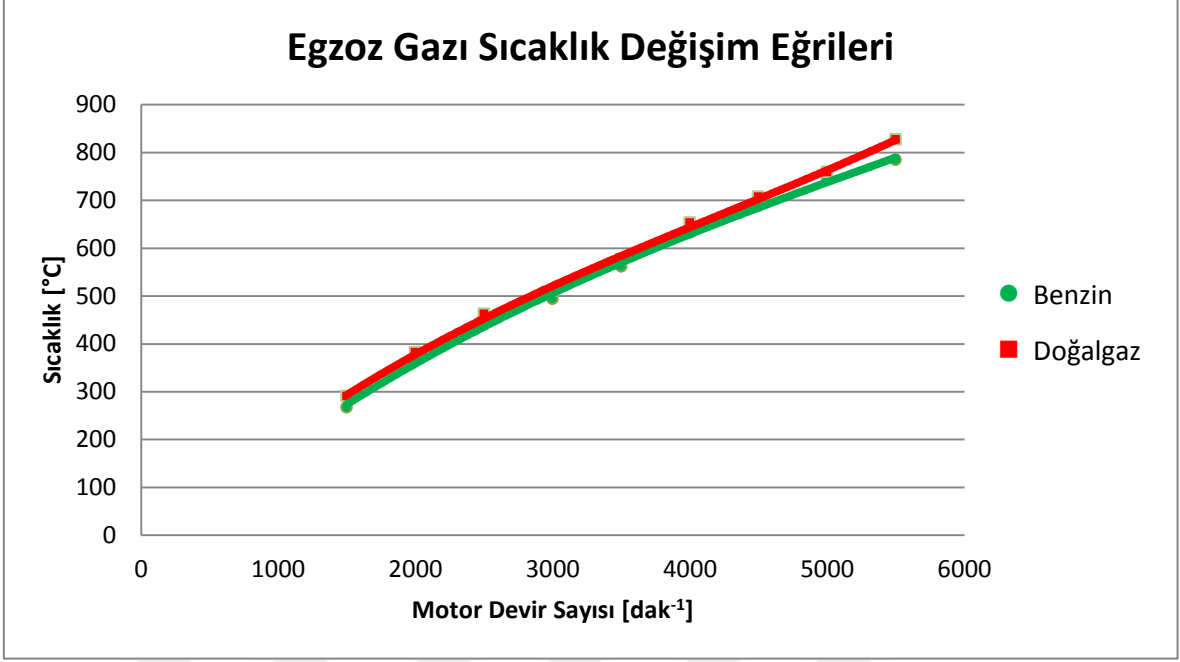
Tablo 10.13. Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Sıcaklık Değerleri

<i>Gaz Açıklığı : %100</i>		
<i>Yükleme : %100</i>		
Motor Devir Sayısı [dak⁻¹]	Egzoz Gazı Sıcaklığı [°C]	
	Benzinle Çalışma Durumunda	Doğalgazla Çalışma Durumunda
1500	267	290
2000	368	382
2500	447	462
3000	494	511
3500	561	576
4000	632	653
4500	688	707
5000	746	759
5500	784	827

Tablo 10.13'te verildiği gibi, her iki yakıt türünün yakılması durumunda da egzoz gaz sıcaklıkları; motor devir hızının artmasıyla, artış göstermiştir. Tüm motor devir hızlarında da doğalgazla çalışma durumundaki egzoz gaz sıcaklık değerleri, benzinle çalışma durumundaki egzoz gaz sıcaklık değerlerinden daha yüksektir. Bu durum doğalgazın ısıl değerinin benzine oranla daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Doğalgazla çalışma durumunda, egzoz gaz sıcaklığı ölçülen maksimum değeri olan 827°C'ye 5500 [dak⁻¹] motor devrinde ulaşmıştır. Benzinle çalışma durumunda ise en yüksek egzoz gaz sıcaklığı 784°C olarak 5500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçülmüştür. En düşük egzoz gaz sıcaklıkları her iki yakıt türünün de yakılması durumunda 1500 [dak⁻¹] motor devrinde ölçülmüş olup; benzinle çalışma durumuna 267°C iken, doğalgazla çalışma durumunda ise 290°C olarak ölçülmüştür. Ulaşılan maksimum egzoz gazı sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında 5500 [dak⁻¹] motor devrinde doğalgazla çalışma durumunda egzoz gaz sıcaklığı 43°C daha fazla değerde ölçülmüştür. Ulaşılan maksimum sıcaklık değerleri değerlendirilirse; doğalgazla çalışma durumunda maksimum egzoz gaz sıcaklığının, benzinle çalışmaya oranla %5,48 arttığı belirlenmiştir.

Tüm motor devir hızlarında gerçekleştirilen egzoz gazı sıcaklıkları genel anlamda değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumlarında egzoz gaz sıcaklığının, benzinle çalışma durumlarına oranla ortalama olarak % 3,6 oranında daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Şekil 10.17'de, egzoz gaz sıcaklıklarının motor devir hızına bağlı değişim eğrileri; hem benzinle çalışma durumu için hem de doğalgazla çalışma durumu için gösterilmiştir.



Şekil 10.17. Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Sıcaklık Değişim Eğrileri

Düşük yük ve düşük yakıt tüketimlerinde yanma sıcaklığı ve buna bağlı olarak egzoz gaz sıcaklığının düşük olması beklenir. Şekil 10.17'ye bakıldığında düşük yük ve düşük motor devir sayılarında her iki yakıt türü için egzoz gaz sıcaklığının düşük olduğu görülmektedir. Yük ve yakıt tüketimi arttığında egzoz gazı sıcaklığı artmaktadır. Diğer taraftan motor devir sayısındaki artışın, kimyasal reaksiyon hızlarının artması üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Sonuçta yüksek motor devir hızlarında, tam yanma ürünü olan ve oluşum entalpisinin yüksek olduğu bilinen CO₂ emisyonu oluşumunun artması sonucunda; sıcaklığın da artması gerektiği düşünülebilir. Ancak CO₂ emisyonu oluşumunun, her iki yakıt türü için de orta devirlerde en yüksek değeri aldığı düşünülürse; reaksiyon süresin de CO₂ oluşumunda etkili olduğu söylenebilir. Çalışma sıcaklığının artması üzerinde en etkili parametrelerin, yakıt tüketimi ve motor yükü olduğunu göstermiştir.

Her iki yakıt türü için de; egzoz gazı sıcaklık değişimi, benzer karakteristik özellik göstermiştir. Doğalgazla çalışma durumunda egzoz gazı sıcaklığının, benzinle çalışma durumuna oranla daha yüksek olması; doğalgazın ısıl değerinin daha yüksek olmasına bağlanabilir.

10.2.1.6. Rölanti Devrinde Egzoz Gazı Emisyon Değerlerinin ve Egzoz Gazı Sıcaklığının İncelenmesi

Deney motorunu yüklemeyen, rölanti devrinde çalıştırarak yapılan egzoz gazı emisyon ölçümü değerleri; hem benzin yakıtının kullanılması durumu için hem de doğalgaz yakıtının kullanılması durumu için ölçülmüştür. Deney motoru rölanti devrinde çalıştırılarak, rölanti gezintisinin en asgari seviyeye düşmesi için bir süre beklenilmiştir. Motor sabit rölanti devrine ulaştıktan sonra, takriben 880 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken, test cihazının kalibrasyonu yapıldıktan sonra egzoz gazı emisyon değerleri ölçülmüştür. Egzoz gazı emisyonları, egzoz manifoldu boğazından 125 cm uzaklık mesafesinde boru yüzeyine açılan delikten ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda elde edilen veriler Tablo 10.14'te verilmiştir. Egzoz gazı emisyon ölçümleriyle birlikte yapılan egzoz gazı sıcaklık değerleri de yine aynı şekilde, Tablo 10.14'te verilmiştir.

Tablo 10.14. Rölanti Devrinde Egzoz Gazı Emisyonları ve Sıcaklığı

<i>Motor Devir Sayısı: Rölanti (≈ 880 [dak⁻¹])</i>		
<i>Yükleme Miktarı: 0 Nm</i>		
Ölçülen Büyüklük	Benzinle Çalışma Durumunda Ölçülen Değer	Doğalgazla Çalışma Durumunda Ölçülen Değer
CO [% hacim]	0,158	0,098
CO ₂ [% hacim]	2,66	2,15
HC [ppm hacim]	70	44
O ₂ [% hacim]	16,80	16,81
CO _{cor} [% hacim]	0,841	0,654
NO [ppm hacim]	25	13
Egzoz Gazı Sıcaklığı (°C)	110	111

Deney motorunda doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre; CO, CO₂, HC ve NO emisyon değerlerinde azalma görülmektedir. O₂ emisyon değerinde ise artış görülmektedir. Ayrıca deney motorunda doğalgazla çalışma durumunda ölçülen CO_{cor} değeri, benzinle çalışma durumunda ölçülen CO_{cor} emisyonundan daha düşük ölçülmüştür.

Yapılan çalışmada ölçülen egzoz gaz sıcaklıkları incelendiğinde ise doğalgazla çalışma durumunda ölçülen egzoz gaz sıcaklığının daha yüksek ölçüldüğü görülmektedir.

Doğalgazla çalışmada egzoz gazı sıcaklığı 111°C ölçülmüş olup, benzinle çalışma durumunda ise 110°C ölçülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla; egzoz gazı sıcaklıklarında yaklaşık %1 kadar artış görülmüştür. Doğalgazla çalışmada egzoz gaz sıcaklığının benzinle çalışmaya oranla daha yüksek değerde olması, doğalgazın alt ısı değerinin daha yüksek olmasıyla açıklanabilir. Doğalgazın daha fakir karışımla yandığı göz önünde bulundurulursa, fakir karışımın silindir içi sıcaklığını artırmasıyla egzoz gazı sıcaklığı da artacaktır.

Yükleme yapılmadan rölanti devrinde gerçekleştirilen çalışma şartlarında, deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumunda, CO emisyonu % hacimsel olarak 0,098 değerinde ölçülmüştür. Benzinle çalıştırılma durumunda ise CO emisyonu % hacimsel olarak 0,158 değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla deney motorunda, yakıt olarak; benzin yerine doğalgazın kullanılması durumunda CO emisyon değerlerinde, %38 oranından azalma olduğu belirlenmiştir. CO emisyonları, hava-yakıt oranına bağımlı olarak değişim gösteren bir parametredir. Zengin karışımla çalışma şartlarında, CO emisyon değerlerinin yükseldiği bilinmektedir [76]. Fakat Tablo 10.6'da görülmektedir ki; doğalgazla çalışma, benzinle çalışmaya oranla daha fakir karışımlarla gerçekleşmiş ve bu sebepten dolayı doğalgazla çalışma durumunda ölçülen CO emisyon değeri, benzinle çalışma durumunda ölçülen CO emisyon değerinden daha düşük ölçülmüştür. Deney motoru yüklenmeden ve rölanti devrinde çalıştırıldığı için; silindire emilen dolgu miktarı az, silindir içi basınç ve silindir içi sıcaklık düşüktür. Bunlarla birlikte, rölanti devrinde; motora emilen havanın türbülansı azdır ve bu sebepten dolayı yanma verimi de düşüktür. Düşük basınç, düşük sıcaklık ve düşük türbülans şartlarında benzinin buharlaşma sonucu hava ile karışımı, gaz fazında bir yakıt olan doğalgaza göre daha zordur. Dolayısıyla benzin ile çalışmadaki yanma verimi daha düşüktür. Bu sebepten dolayı doğalgazla çalışma durumunda, CO emisyon değerleri daha düşük ölçülmüştür.

Yükleme yapılmadan rölanti devrinde gerçekleştirilen çalışma şartlarında, deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumunda, CO₂ emisyonu % hacim olarak 2,15 değerinde ölçülmüştür. Benzinle çalıştırılma durumunda ise CO₂ emisyonu % hacim olarak 2,66 değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla deney motorunda, yakıt olarak; benzin yerine doğalgazın kullanılması durumunda CO₂ emisyon değerlerinde, %19,2 oranından azalma olduğu belirlenmiştir. Bir tam yanma ürünü olan CO₂ emisyonları, eksik yanma ürünü olan CO emisyonlarının genişleme zamanında oksidasyona uğraması sonucunda oluşur. Burada oksidasyon olayının gelişmesi reaksiyon hızıyla ilgili bir durumdur. Benzinle çalışma

durumunda, doğalgazla çalışma durumuna göre % hacimsel olarak daha fazla eksik yanma ürünü olan CO emisyonu oluşmasına rağmen; yine benzinle çalışma durumunda % hacimsel olarak daha fazla CO₂ emisyon değeri ölçülmüştür. Bu durum, rölanti devrinde benzinle çalışma durumunda oksidasyon olayının aynı dengede gelişmesiyle açıklanabilir.

Mevcut çalışma şartlarında; deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumunda, HC emisyonu ppm hacim olarak 44 değerinde ölçülmüştür. Benzinle çalıştırılma durumunda ise HC emisyonu ppm hacim olarak 70 değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla deney motorunda, yakıt olarak; benzin yerine doğalgazın kullanılması durumunda HC emisyon değerlerinde, %37,15 oranından azalma olduğu belirlenmiştir. Bu durum, doğalgazla çalışmada; yanma veriminin arttığını göstermektedir.

Tüm bunlarla birlikte; CO emisyon değerleri göz önünde bulundurularak, doğalgazla çalışmada yanma veriminin daha fazla olduğu saptamıştır. Benzinle çalışma durumunda, HC emisyon değerlerinin daha yüksek değerde ölçülmesi; yanma veriminin düşüklüğünden ve karışımdaki hava-yakıt oranından kaynaklanmasıyla açıklanabilir.

Test cihazı, CO ve CO₂ emisyonlarını bir denklemde değerlendirerek CO_{cor} ölçümünü gerçekleştirmektedir. CO_{cor} değerindeki artış, CO emisyon değerinin artmasıyla doğru orantılı, CO₂ emisyon değerinin artmasıyla ters orantılıdır. CO_{cor} değeri; egzoz tesisatındaki gaz kaçakları hakkında da bilgi veren bir parametredir.

CO_{cor} değerini, hesaplamada kullanılan formül; denklem 10.24'te verilmiştir [77].

$$CO_{cor} = \frac{15 \cdot CO}{CO_2 + CO} \quad (10.24)$$

Burada;

$CO_{cor} = CO_{correcto}$: Karbonmonoksit Doğrulama Oranı [%hacim]

CO: Karbonmonoksit Emisyon Oranı [%hacim]

CO₂: Karbondioksit Emisyon Oranı [%hacim]

15: Dört Zamanlı Motorlar İçin Sabit Katsayıdır.

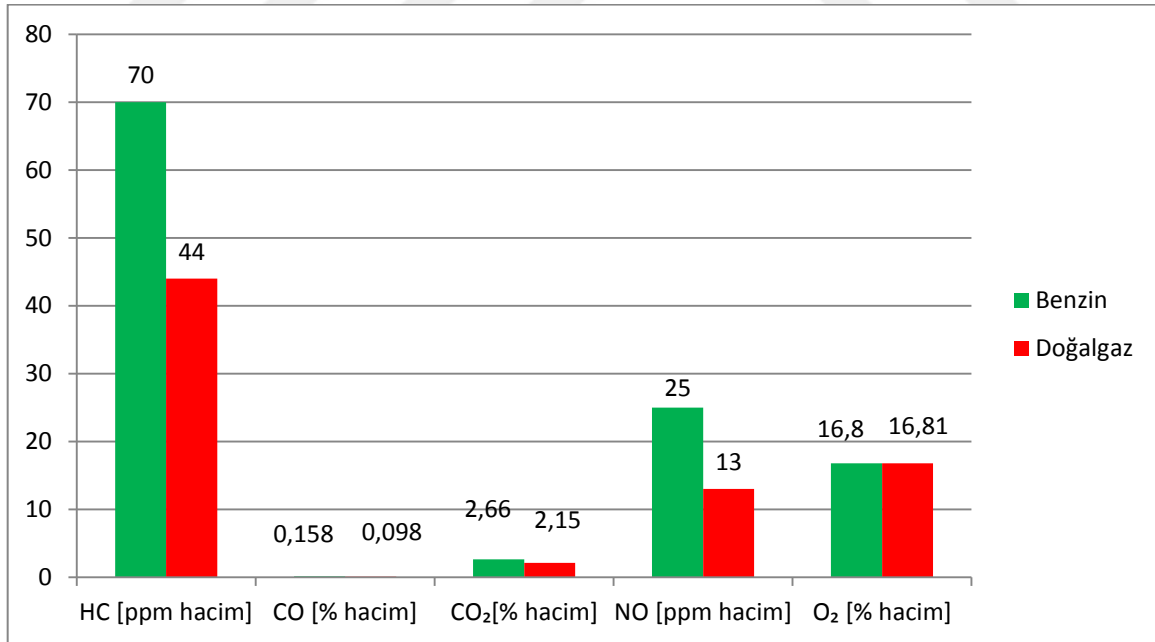
CO_{cor} oranları değerlendirildiğinde; benzinle çalışma durumunda % hacimsel olarak 0,841 değerinde, doğalgazla çalışma durumunda ise % hacimsel olarak 0,654 değerinde ölçülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda CO_{cor} oranı daha düşük ölçülmüştür. CO_{cor}

değerinin; doğalgazla çalışmada, benzinle çalışmaya göre %22,23 oranında daha düşük olduğu görülmektedir.

Her iki yakıtla çalışma durumlarında; O₂ emisyon değerleri neredeyse aynı değerde ölçülmüştür. Benzinle çalışmada O₂ emisyonu % hacim olarak 16,80 değerinde ölçülmüş olup, doğalgazla çalışma durumunda ise O₂ emisyonu % hacim olarak 16,81 değerinde ölçülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda O₂ emisyon değerinin hacimsel olarak %0,06 oranında azaldığı görülmüştür; bu oran kayda değer bir azalma olarak değerlendirilmemektedir.

Belirtilen şartlarda; deney motorunun doğalgazla çalıştırılması durumunda, NO emisyonu ppm hacim olarak 13 değerinde ölçülürken; benzinle çalıştırılma durumunda ise ppm hacim olarak 25 değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla deney motorunda, yakıt olarak; benzin yerine doğalgazın kullanılması durumunda rölanti devrindeki NO emisyon değerlerinde, %48 oranından azalma olduğu belirlenmiştir.

Şekil 10.18'de, deney motorunu yüklemeyen, rölanti devrinde çalıştırarak yapılan egzoz gazı emisyon ölçümü değerleri; benzinle çalışma durumu ve doğalgazla çalışma durumu için karşılaştırılarak grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 10.18. Rölanti Devrindeki Egzoz Gazı Emisyonlarının Karşılaştırması

10.2.2. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığı Şartı İle Motor Devir Sayısının Artırılması Durumunda Susturucu Çıkışından Ölçülen Egzoz Gazı Emisyonlarının İncelenmesi

Buji ateşlemeli motorlara sahip taşıtların motorları, karayolu trafiğinde çoğunlukla kısmi yük ve kısmi gaz açıklığı şartlarında çalışırlar. Kullanım sürelerinin çoğunluğunda; gerek otoyollarda gerekse şehir içi trafik akışı içerisinde 1500 [dak⁻¹] ile 3000 [dak⁻¹] devir bandı arasında çalışmaktadırlar. Dolayısıyla çalışmanın bu bölümünde; hem benzinle çalışma hem de doğalgaza çalışma durumlarının, 10 Nm sabit yükleme şartlarında 1500 [dak⁻¹] ile 3000 [dak⁻¹] motor devir hızları aralığında kısmi gaz açıklıklarında gerçekleştirilen deneylerle ölçülen egzoz emisyon değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Bu çalışmadaki egzoz gazı emisyon değerleri susturucu çıkışından ölçülmüştür. Belirtilen çalışma şartlarında ölçülen değerler, Tablo10.15'te verilmiştir.

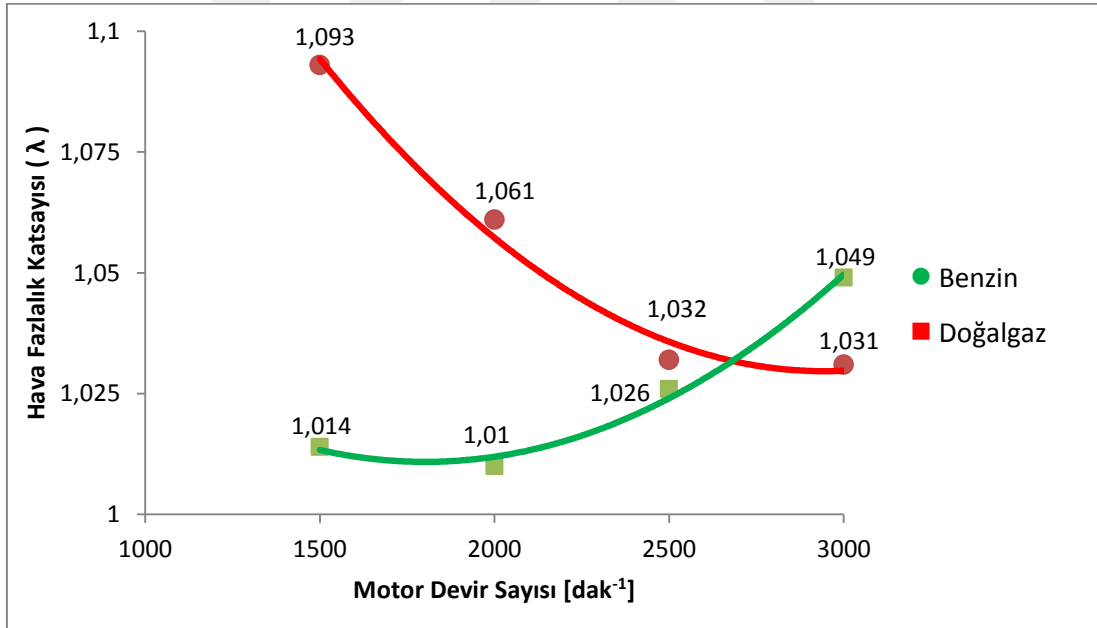
Tablo 10.15. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığı Şartlarında Motor Devir Sayısına Bağlı Egzoz Gazı Emisyonları

<i>Kullanılan Yakıt Türü</i>	<i>Ölçülen Değer</i>	<i>CO [% hacim]</i>	<i>CO₂ [% hacim]</i>	<i>HC [ppm hacim]</i>	<i>O₂ [% hacim]</i>	<i>NO [ppm hacim]</i>	<i>HEK (g)</i>
Rölanti Devri							
Benzin		0,782	12,48	307	2,46	153	1,084
Doğalgaz		0,605	8,18	115	4,26	58	1,202
1500 [dak⁻¹]							
Benzin		0,718	13,59	221	1,05	1496	1,014
Doğalgaz		0,582	9,20	84	2,49	433	1,093
2000 [dak⁻¹]							
Benzin		0,824	13,54	179	0,96	947	1,010
Doğalgaz		0,566	9,55	63	1,83	273	1,061
2500 [dak⁻¹]							
Benzin		0,753	13,32	164	1,22	976	1,026
Doğalgaz		0,707	9,91	56	1,36	340	1,032
3000 [dak⁻¹]							
Benzin		0,765	12,93	168	1,68	2101	1,049
Doğalgaz		0,636	9,84	89	1,33	1013	1,031

Tablo 10.15'te verilen ölçüm sonuçları; hava fazlalık katsayısı ve CO, CO₂, HC, NO, O₂ emisyonları için incelenip değişim eğrileri grafikler halinde oluşturularak değerlendirilmiştir. Ayrıca rölanti devrindeki çalışma, yükleme yapılmaksızın gerçekleştirilerek egzoz gazı emisyonları ve hava fazlalık katsayısı ölçüldüğü için; ayrı olarak değerlendirilmiş olup, Şekil 10.25'te ayrıca gösterilmiştir.

10.2.2.1. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı HFK Değişimlerinin İncelenmesi

3000 [dak⁻¹] motor devri hariç diğer tüm motor devir sayılarında doğalgazla çalışma durumundaki yanma reaksiyonu, benzinle çalışmaya oranla daha fakir karışımla gerçekleşmektedir. Doğalgazla çalışma ve benzinle çalışma durumlarında; hava fazlalık katsayı değerlerinin devir sayısına bağlı değişimi, Şekil 10.19'da grafik halinde gösterilmiştir.



Şekil 10.19. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı HFK Değişim Eğrileri

Doğalgazla çalışma durumunda düşük devirlerde belirgin fakir karışımla yanma reaksiyonu gerçekleşmektedir. Motor devir sayısının artmasıyla hava fazlalık katsayısının azaldığı görülmektedir. Doğalgazla çalışma durumunda en yüksek hava fazlalık katsayısı, 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısında 1,093 değerinde ölçülmüştür. Doğalgazla çalışma durumundaki en düşük hava fazlalık katsayısı ise 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında 1,031

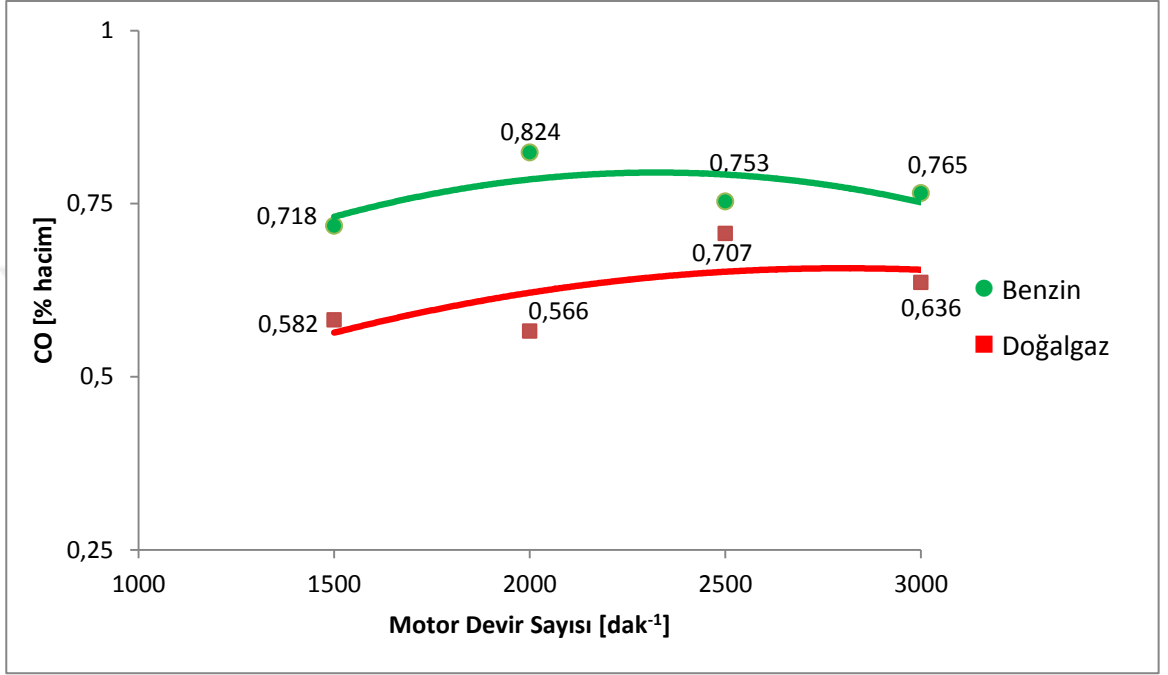
değerinde ölçülmüştür. Şekil 10.19’da verilen doğalgazla çalışma durumundaki hava fazlalık katsayısı eğrisinden görüldüğü gibi motor devir sayısı arttıkça, karışım zenginleşme eğilimi gösterip ideal yanma şartlarına yaklaşmaktadır.

Benzinle çalışma durumunda; düşük devirlerde ideal hava/yakıt oranına yakın karışımla yanma gerçekleştiği ve motor devir sayısının artmasıyla birlikte karışımın fakirleştiği görülmektedir. Motor devir sayısına bağlı hava fazlalık katsayıları incelendiğinde; 2000 [dak⁻¹] devir sayısına kadar hava fazlalık katsayısının azaldığı, 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısından sonra ise hava fazlalık katsayısının arttığı görülmektedir. En yüksek hava fazlalık katsayısı 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında 1,049 değerinde ölçülmüş olup, en düşük hava fazlalık katsayısı ise 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında 1,010 değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla benzinle çalışma durumunda motor devir sayısının artmasıyla; karışımın fakirleşmeye başladığı görülmektedir.

Tüm motor devir sayılarında gerçekleştirilen hava fazlalık katsayıları değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla genel olarak yaklaşık %2,87 oranında artma görülmüştür. Doğalgazla yanma, benzinle yanmaya oranla daha fakir karışımla gerçekleşmektedir.

10.2.2.2. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi

Tüm motor devir sayılarında; doğalgazla çalışma durumundaki CO emisyon değerleri, benzinle çalışma durumundaki CO emisyon değerlerine göre daha düşüktür.



Şekil 10.20. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı CO Emisyonu Değişim Eğrileri

Her iki yakıt türü ile gerçekleştirilen çalışma durumlarında da; CO emisyon değerleri motor devir sayısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Şekil 10.20’de gösterildiği gibi; CO emisyonlarının, motor devir sayısındaki artışla doğrusal değişim göstermediği görülmüştür.

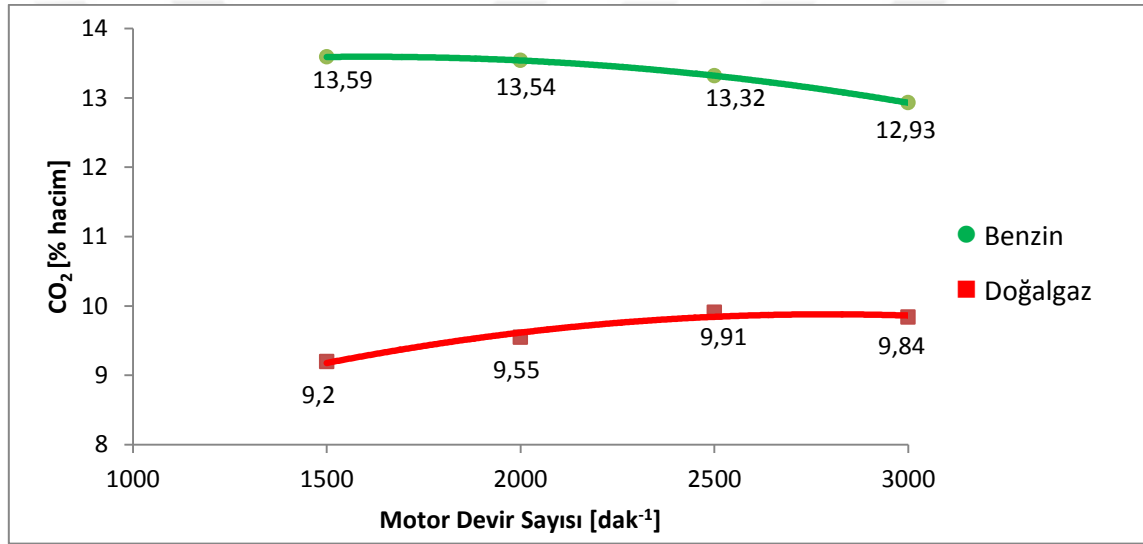
Doğalgazla çalışma durumunda; en yüksek CO emisyon oranı % hacim olarak 0,707 değerinde 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük CO emisyon oranı ise 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 0,566 değerinde ölçülmüştür.

Benzinle çalışma durumunda; en yüksek CO emisyon oran % hacim olarak 0,824 değerinde, 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük CO emisyon oranı ise 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 0,718 değerinde ölçülmüştür.

Tüm motor devir sayılarında ölçülen CO emisyon değerleri değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre, CO emisyonlarında genel olarak yaklaşık %18,6 oranında azalma görülmüştür. Doğalgazla çalışma durumunda yanmanın daha iyi olduğu görülmektedir.

10.2.2.3. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı CO₂ Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi

Tüm motor devir sayılarında; doğalgazla çalışma durumundaki CO₂ emisyon değerleri, benzinle çalışma durumundaki CO₂ emisyon değerlerine göre daha düşüktür.



Şekil 10.21. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı CO₂ Emisyonu Değişim Eğrileri

Doğalgazla çalışma durumunda, 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar; motor devir sayısındaki artışla beraber CO₂ emisyon değerlerinde de artma gerçekleşmiştir. Fakat bu artışın lineer olmadığı görülmektedir. Doğalgazla çalışma durumunda; en yüksek CO₂ emisyon oranı % hacim olarak 9,91 değerinde 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük CO₂ emisyon oranı ise 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 9,2 değerinde ölçülmüştür.

Benzinle çalışma durumunda CO₂ emisyon değerlerinde; motor devir sayısının artmasıyla CO₂ emisyon değerinin azaldığı görülmektedir. Benzinle çalışma durumunda; en yüksek CO₂ emisyon oranı % hacim olarak 13,59 değerinde 1500 [dak⁻¹] motor devir

sayısında iken ölçülmüştür. En düşük CO₂ emisyon oranı ise 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 12,93 değerinde ölçülmüştür.

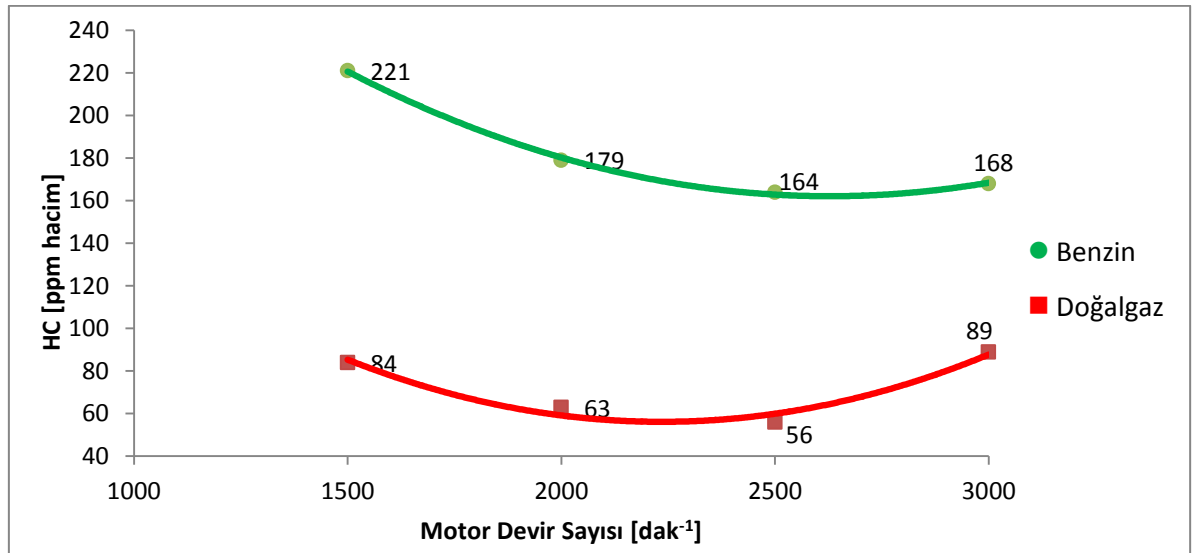
Doğalgazla çalışma durumunda, motor devir sayısının artışıyla birlikte; CO emisyonlarının oksidasyon sonucunda CO₂ emisyonlarına dönüşme durumu, benzinle çalışma durumundakine oranla daha da iyi olduğu belirlenmiştir. Şekil 10.20'deki CO emisyon eğrileri göz önünde bulundurularak; Şekil 10.21'deki CO₂ emisyon eğrileri değerlendirildiğinde bu tespit daha çok anlam kazanmaktadır.

Ayrıca tüm motor devir sayılarında ölçülen CO₂ emisyon değerleri değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre genel olarak %27.9 oranında azalma görülmüştür.

10.2.2.4. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi

Tüm motor devir sayılarında; doğalgazla çalışma durumundaki HC emisyon değerleri; benzinle çalışma durumundaki HC emisyon değerlerine oranla daha düşüktür.

Sabit yük ve kısmi gaz açıklığı şartlarında; hem benzinle çalışma hem de doğalgazla çalışma durumlarında, motor devir sayısına bağlı HC emisyonu değişim eğrileri, Şekil 10.22'de gösterilmiştir.



Şekil 10.22. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı HC Emisyonu Değişim Eğrileri

Doğalgazla çalışma durumundaki HC emisyon eğrisi, benzinle çalışma durumundaki HC emisyon eğrisi ile benzer karakteristik göstermektedir.

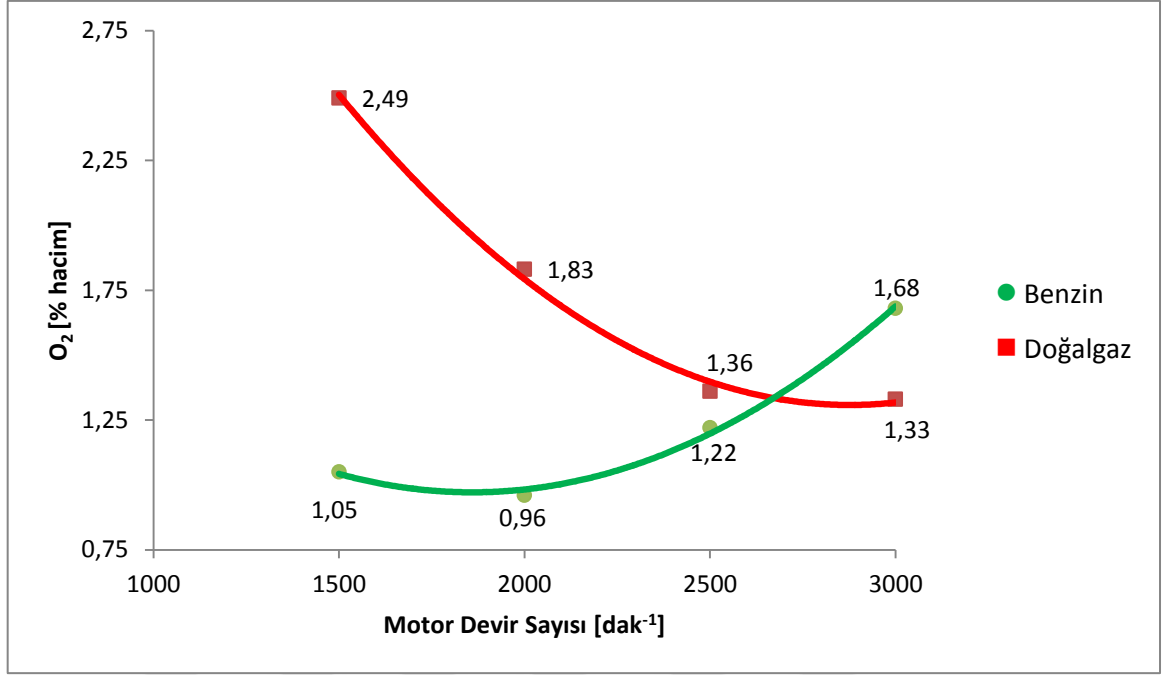
Doğalgazla çalışma durumunda, 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar; motor devir sayısındaki artışla beraber HC emisyon değerlerinde de azalma gerçekleşmiştir. 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısından sonra HC emisyonlarında artış görülmüştür. Fakat bu azalma ve artışın motor devir sayısındaki artışla doğrusal olmadığı görüldüğü gibi lineer olmadığı da görülmektedir. Doğalgazla çalışma durumunda; en yüksek HC emisyon oranı ppm hacim olarak 89 değerinde 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük HC emisyon oranı ise 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısında ppm hacim olarak 56 değerinde ölçülmüştür.

Benzinle çalışma durumunda, 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar; devir sayısının artmasıyla birlikte HC emisyon değerinin azaldığı görülmektedir. 2500 [dak⁻¹] devir sayısından sonra 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısına çıkıldığında ise az miktarda HC emisyonlarının arttığı görülmektedir. Benzinle çalışma durumunda; en yüksek HC emisyon oranı ppm hacim olarak 221 değerinde 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük HC emisyon oranı ise 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısında ppm hacim olarak 164 değerinde ölçülmüştür.

Tüm motor devir sayılarında ölçülen HC emisyon değerleri, bir bütün halde değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre HC emisyonlarında genel anlamda %60,1 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla doğalgazla çalışma durumunda yanmanın daha iyi gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

10.2.2.5. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı O₂ Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi

Doğalgazla çalışma durumundaki O₂ emisyon değerleri, motor devir sayısının artmasıyla birlikte düşmektedir. Benzinle çalışma durumundaki O₂ emisyon değerleri ise motor devir sayısının artmasıyla birlikte artış göstermektedir. Sabit yük ve kısmi gaz açıklığı şartlarında; hem benzinle çalışma hem de doğalgazla çalışma durumlarında, motor devir sayısına bağlı O₂ emisyonu değişim eğrileri, Şekil 10.23'te gösterilmiştir.



Şekil 10.23. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı O₂ Emisyonu Değişim Eğrileri

Doğalgazla çalışma durumunda en yüksek O₂ emisyon değeri, 1500 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 2,49 değerinde ölçülmüştür. Benzinle çalışma durumunda ise en yüksek O₂ emisyon değeri, 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 1,68 değerinde ölçülmüştür. Ölçülen en düşük O₂ emisyon değerlerine bakıldığında; benzinle çalışma durumunda 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 0,96 değerinde, doğalgazla çalışma durumunda ise 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında % hacim olarak 1,33 değerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısında her iki yakıt türünün kullanılması durumunda üretilen O₂ emisyon değerlerini yaklaştığı görülmektedir.

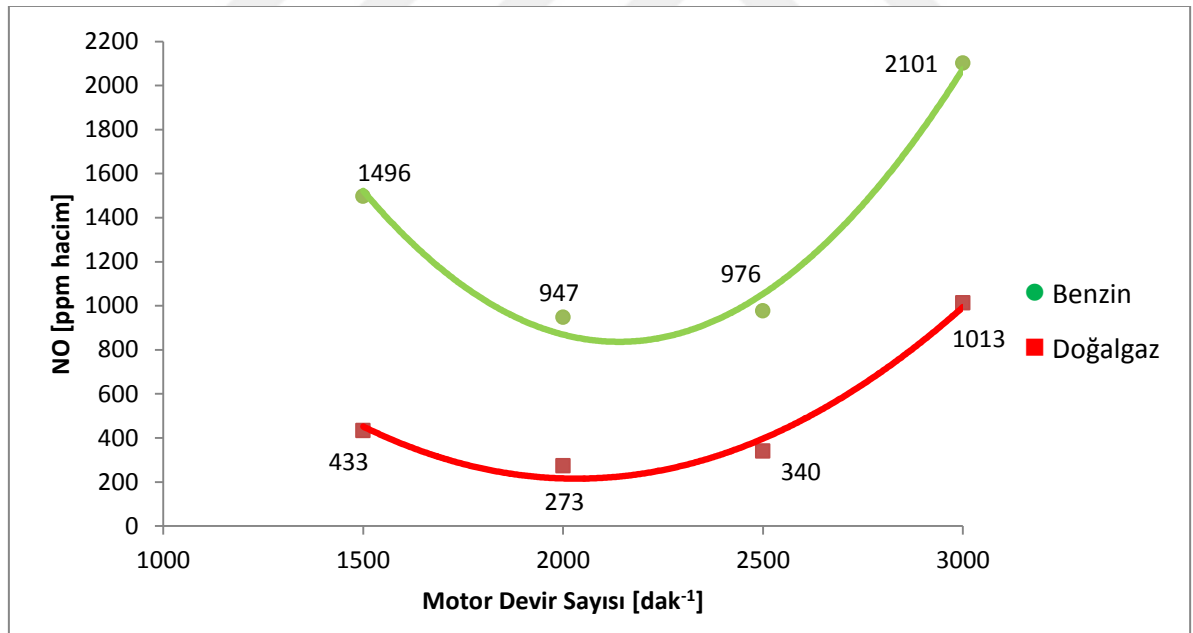
Benzinle çalışma durumunda 1500 [dak⁻¹] ile 3000 [dak⁻¹] motor devir sayıları arasında ölçülen O₂ emisyonları % hacim olarak ortalama 1,2275 değerindedir. Doğalgazla çalışma durumunda 1500 [dak⁻¹] ile 3000 [dak⁻¹] motor devir sayıları arasında ölçülen O₂ emisyonları % hacim olarak ortalama 1,7525 değerindedir. Belirtilen devir bantları aralığındaki ortalama O₂ emisyon değerleri karşılaştırıldığında; doğalgazla çalışma durumunda benzinle çalışmaya oranla O₂ emisyonlarında %42,76 oranında azalma tespit edilmiştir.

Doğalgazla çalışma durumunda; motor devir sayısındaki artışla birlikte O₂ emisyonlarındaki azalma göz önünde bulundurularak, CO₂ emisyonlarının motor devir sayısının artmasıyla birlikte artış göstermesi karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Sonuç olarak

doğalgazla çalışma durumunda; motor devir sayısının artışıyla birlikte CO emisyonlarının daha fazla oksidasyona uğrayarak O₂ emisyonlarını azaltıp, CO₂ emisyonlarını artırdığı görülmüştür. Homojen dolgulu buji ateşlemeli motorlarda, motor devir hızının artmasıyla birlikte, artan hava debisi ve hava hareketlerinin; oksidasyonu hızlandırdığı ve oksidasyonu oransal anlamda artırdığı, bu sebepten dolayı da karbonmonoksit(CO) emisyonlarında ciddi oranda azalma sağladığı düşünülmektedir.

10.2.2.6. Sabit Yük ve Kısmi Gaz Açıklığında Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişimlerinin İncelenmesi

Tüm motor devir sayılarında; doğalgazla çalışma durumundaki NO emisyon değerleri; benzinle çalışma durumundaki NO emisyon değerlerine oranla daha düşüktür. Sabit yük ve kısmi gaz açıklığı şartlarında; hem benzinle çalışma hem de doğalgazla çalışma durumlarında, motor devir sayısına bağlı NO emisyonu değişim eğrileri, Şekil 10.24'te gösterilmiştir.



Şekil 10.24. Kısmi Şartlarda Motor Devir Sayısına Bağlı NO Emisyonu Değişim Eğrileri

Doğalgazla çalışma durumundaki NO emisyon eğrisi, benzinle çalışma durumundaki NO emisyon eğrisi ile benzer karakteristik göstermektedir.

Doğalgazla çalışma durumunda, 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar; motor devir sayısındaki artışla beraber NO emisyon değerlerinde de azalma gerçekleşmiştir. 2000

[dak⁻¹] motor devir sayısından sonra NO emisyonlarında artış görülmüştür. Fakat bu azalma ve artışın motor devir sayısındaki artışla doğrusal olmadığı görüldüğü gibi lineer olmadığı da görülmektedir. Ayrıca 2500 [dak⁻¹] motor devir sayısından, 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısına çıkıldığında NO emisyonunun önemli oranda sıçrayarak yükseldiği belirlenmiştir. Doğalgazla çalışma durumunda; en yüksek NO emisyon oranı ppm hacim olarak 1013 değerinde 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük NO emisyon oranı ise 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında ppm hacim olarak 273 değerinde ölçülmüştür.

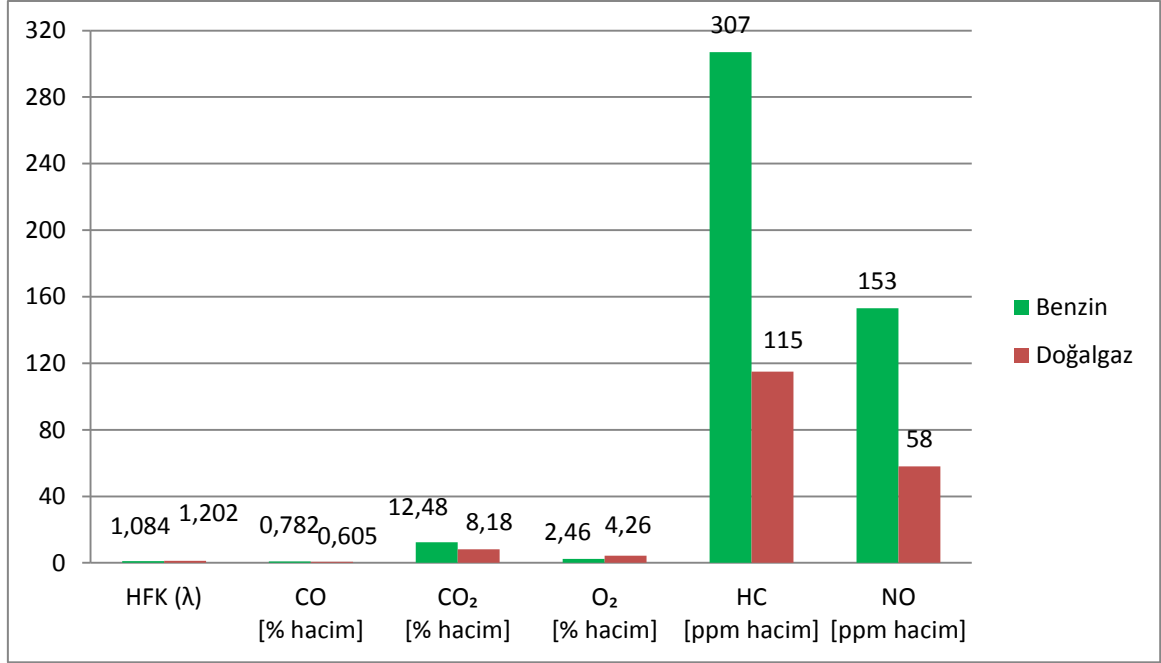
Benzinle çalışma durumunda, 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar; devir sayısının artmasıyla birlikte NO emisyon değerinin azaldığı görülmektedir. 2000 [dak⁻¹] devir sayısından 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısına kadar ise NO emisyonlarının arttığı görülmektedir. Benzinle çalışma durumunda; en yüksek NO emisyon oranı ppm hacim olarak 2101 değerinde 3000 [dak⁻¹] motor devir sayısında iken ölçülmüştür. En düşük NO emisyon oranı ise 2000 [dak⁻¹] motor devir sayısında ppm hacim olarak 947 değerinde ölçülmüştür.

Tüm motor devir sayılarında ölçülen NO emisyon değerleri, bir bütün halde değerlendirildiğinde; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre NO emisyonlarında genel anlamda %62,7 oranında azalma olduğu belirlenmiştir.

Yakıtların hava ile yanma reaksiyonuna girmesi sonucunda ortaya çıkan azot oksit(NO) emisyonlarının esas kaynağının azot(N₂) olduğu bilinmektedir. Hava yüksek oranda azot ihtiva etmektedir, dolayısıyla emme zamanında havanın silindir içine emilmesi ile yüksek oranda azot emilmiş olur. Fakat doğalgazla çalışma durumunda; benzinle çalışma durumuna istinaden, CO emisyonlarının oksidasyon hızının ve oranının daha fazla olması sebebiyle NO emisyonlarının daha az oluştuğu düşünülmektedir.

10.2.3. Rölanti Devrinde Susturucu Çıkışından Ölçülen Benzin ve Doğalgazla Çalışma Durumundaki Emisyon Değişimlerinin Değerlendirmesi

Rölanti devrinde yükleme yapılmaksızın gerçekleştirilen ve susturucu çıkışından ölçülen egzoz emisyonları, Şekil 10.25'te grafik halinde verilmiştir.



Şekil 10.25. Rölanti Devrinde Susturucu Çıkışından Ölçülen Egzoz Gazı Emisyonları

Yüksüz halde rölanti devri şartlarında; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışmaya oranla hava fazlalık katsayısında yaklaşık olarak %11 kadar artış görülmüştür.

Yine yüksüz halde rölanti devri şartlarında; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışmaya oranla susturucu çıkışından ölçülen egzoz gazı emisyonlarındaki değişim:

- ✓ CO emisyon değerlerinde %22 azalma
- ✓ CO₂ emisyon değerlerinde %34,5 azalma
- ✓ O₂ emisyon değerinde %73 artma
- ✓ HC emisyon değerinde %62,5 azalma
- ✓ NO emisyon değerinde %62 azalma olarak belirlenmiştir.

11. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu deneysel çalışmada, CNG yakıt dönüşümü gerçekleştirilen buji ateşlemeli bir motor; hem benzin hem de doğalgaz ile çalışır hale getirilmiştir. Doğalgaz ve benzin yakıtlarının kullanılması durumlarındaki motor performansları ve egzoz gazı emisyonları deneysel olarak ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar ve metotlar sonuçlarıyla özetlenmiştir. Deneysel sonuçlarına göre elde edilen veriler hem tablolar halinde hem de grafikler halinde karşılaştırılmıştır. Doğalgazla çalışmanın avantajlı ve dezavantajlı yönler tartışılmıştır.

11.1. Sonuçlar

Sonuçlar, maddeler halinde belirtilerek; homojen dolgulu buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımının motor performansına ve egzoz gazı emisyonlarına etkileri sıralanmıştır.

1. Deneysel çalışmada ölçülen moment değerleri karşılaştırıldığında; doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna göre motor momentinde ortalama olarak %8 oranında azalma görülmüştür.
2. Hesaplanan efektif motor gücü değerleri karşılaştırıldığında, doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla motor gücünde ortalama olarak %8,5 azalma tespit edilmiştir.
3. Doğalgazla çalışma durumunda hem motor gücünde hem de motor momentinde meydana gelen azalmalar benzer karakteristik göstermektedir. Bu durum efektif motor gücünün, motor momentinin fonksiyonu olmasıyla açıklanmıştır. Dolayısıyla doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışmaya oranla motor performansında genel anlamda düşmesi; volumetrik verimin düşmesi ve mekanik verim kayıplarının artması ile açıklanıp; sebepler, motor tasarımına bağlanmıştır.

4. Doğalgazla çalışma durumunda, hava fazlalık katsayısında genel anlamda ortalama olarak %2,25 artış görülmüştür. Doğalgazla yanma durumunda, benzinle yanma durumuna göre hava/yakıt oranında kütleli olarak %13,26'ya kadar artmalar meydana geldiği görülmüştür. Dolayısıyla doğalgazla çalışmada, benzinle çalışmaya oranla; yanma reaksiyonunun daha fakir karışımla gerçekleştiği belirlenmiştir.
5. Benzinle çalışmanın en ekonomik sağlandığı devir bandı referans alınarak; aynı devir bandında doğalgazla çalışma durumunda özgül yakıt tüketiminin, benzinle çalışma durumundaki özgül yakıt tüketimine oranla yaklaşık olarak %3,5 oranında azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca doğalgazla çalışma durumundaki yakıt tüketim maliyetinin, benzinle çalışma durumundaki yakıt tüketim maliyetine oranla en az %50 daha düşük olduğu görülmüştür.
6. Yapılan hesaplamalar sonucunda, doğalgazla çalışma durumundaki efektif verimin; benzinle çalışma durumundaki efektif verime oranla takriben %2 kadar azaldığı belirlenmiştir.
7. Doğalgaz kullanımı sonucunda meydana gelen motor performans düşüklüğünün; düşük devirlerde daha az, yüksek devirlerde daha fazla olduğu görülmüştür. Motor performansındaki azalmalarda, hava fazlalık katsayısının etkili olduğu düşünülmektedir. Doğalgazla çalışma durumundaki karışım fakirleştikçe performansın daha az düştüğü görülmüştür.
8. Doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla titreşim yoğunluğunun ortalama olarak %1,5 arttığı belirlenmiştir. Motor titreşiminde %1,5 oranında artış miktarı; trafik içerisinde seyir halindeki taşıt kabininde, insanlar tarafından hissedilemeyecek kadar küçük bir artış değeridir. Buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımının, taşıtın seyir konforunu kayda değer oranda değiştirmediği görülmüştür.

9. Doğalgazla çalışma durumunda; benzinle çalışma durumuna göre motor gürültüsünde ortalama olarak %1,5 oranında azalma tespit edilmiştir. Her iki yakıt türünün kullanılması durumlarındaki maksimum gürültü şiddetleri karşılaştırıldığında; doğalgazla çalışma durumunda yaklaşık olarak %3 kadar azalma sağlandığı belirlenmiştir. Gürültü şiddetleri, desibel biriminde ölçüldüğünden ve desibelin lineer bir büyüklük olmamasından dolayı; buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımıyla sağlanan gürültü azalmasının insan sağlığı açısından oldukça önemli bir etki sağladığı düşünülmektedir. Sonuç olarak doğalgazlı taşıtların yaygınlaşması durumunda, taşıt motorlarından kaynaklanan gürültülerde önemli oranda azalma sağlanacağı belirlenmiştir.

10. Doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla egzoz gazı emisyon değerlerinde ciddi miktarda azalma tespit edilmiştir. Yüzdeler oranda ifade edilirse, benzin yerine doğalgaz kullanımında:

- HC emisyonlarında yaklaşık olarak %62,
- CO emisyonlarında yaklaşık olarak %36,
- CO₂ emisyonlarında yaklaşık olarak %34,
- NO emisyonlarında yaklaşık olarak %68 oranında azalma meydana geldiği görülmüştür.

Tüm bu egzoz gazı emisyon verileri karşılaştırıldığında; doğalgazla çalışma durumunda yanmanın daha iyi gerçekleştiği ve CO emisyonlarının CO₂ emisyonlarına dönüşümünü sağlayan oksidasyon reaksiyonunun daha iyi gerçekleştiği belirlenmiştir. Doğalgazın; gaz fazında bir yakıt olması, difüzyon hızının daha fazla olması, dolgu karışım kabiliyetinin daha iyi olması, fakir karışımla yanabilmesi, C ve H elementlerini benzine oranla daha az ihtiva etmesi emisyon oranlarının benzine göre daha düşük olmasını sağladığı belirtilmiştir.

11. Doğalgazla çalışma durumunda, benzinle çalışma durumuna oranla; egzoz gazı sıcaklığının ortalama olarak %3,6 oranında, maksimum değerlerinde ise %5,48 oranında artma görülmüştür. Bu artış doğalgazın ısı değerinin benzinin ısı değerine oranla daha yüksek olmasıyla açıklanmıştır.
12. Doğalgazla çalışmada, benzinle çalışmaya oranla daha düşük egzoz gazı emisyon değerleri ölçülmüştür. Ayrıca doğalgazla yanmanın daha fakir karışımlarla gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu verilere istinaden, doğalgazla çalışma durumunda benzinle çalışma durumuna oranla; yağlama yağının daha az kirleneceği, egzoz sistemi parçalarının daha az korozyona uğrayacağı ve bujilerin daha uzun süre kullanılabilceği düşünülmektedir. Dolayısıyla buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımının; bakım-onarım süreçlerinde harcanan, işletme maliyetlerini de azaltacağı düşünülmüştür.

11.2. Öneriler

Bu deneysel çalışma sonucunda elde edilen tespitlere istinaden; buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımı konusu üzerinde çalışılması gerektiği düşünülen ve önerilen yönler belirlenmiştir. Bu öneriler maddeler haline sıralanmıştır.

1. Doğalgazın oktan değerinin yüksek olması ve fakir karışımla yanmasından dolayı, sıkıştırma oranını artırmakla; motor performansının artırılabilceği ve daha fazla güç alınabilceği düşünülmektedir. Doğalgazla çalışma durumunda; motor sıkıştırma oranlarının, motor performansı üzerindeki etkilerini belirlemek üzere deneysel çalışma yapılması önerilmektedir.
2. Doğalgazla çalışma durumunda, motor devir hızının artmasıyla birlikte artan hava miktarının ve hareketlerinin; CO emisyonlarının, CO₂ emisyonlarına dönüşümün sağlayan oksidasyon üzerinde etkili olduğu düşünülmüştür. Dolayısıyla turbo beslemeli buji ateşlemeli motorlarda doğalgaz kullanımının egzoz gazı emisyonları üzerindeki etkilerinin deneysel olarak çalışılması ve belirlenmesi faydalı olacaktır.

3. Doğalgazla çalıştırılacak motorun emme manifoldu ve yanma odası, hava-doğalgaz karışımına daha fazla türbülans sağlayacak şekilde tasarlanır ve düzenlenirse; motor momentinde ve motor gücünde artış sağlanabileceği düşünülmektedir. Bu işlemler yapılmadan ve deneysel çalışmaya başlamadan önce, sayısal olarak çalışıp modelleme yaparak; türbülanslı akıştaki alev hızları, dolgunun ideal homojenize karışımı, tutuşma ve alev sönme bölgeleri sayısal olarak belirlenip, incelenmelidir. Çalışmanın; hata paylarını en asgari seviyeye düşürebilmek, verimini ise azami seviyeye çıkarabilmek ve maliyet ekonomisi analizini yapabilmek için deneysel çalışmadan önce sayısal çalışma yapılması faydalı olacaktır.
4. CNG yakıt dönüşüm sistemleriyle birlikte tüm motor devir hızlarında; benzinle çalışmaya oranla daha fakir karışımla yanma sağlayacak bir sistem üzerinde çalışılması, performans kayıplarını azalmak adına faydalı olacağı düşünülmektedir.
5. Doğalgazla çalışma durumunda; tüm motor devir hızlarında ve yük oranlarında, silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerinin deneysel olarak ölçülmesi önerilmektedir. Ateşleme avansı, gaz enjektörlerinin açılma zamanı, gaz enjektörlerinin püskürtme miktarı ve gaz enjektörlerinin püskürtme basıncı; silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerine göre kalibre edilirse, enerji verimliliğinde artış ve performans kayıplarında azalma sağlanabileceği düşünülmektedir.
6. Yaygın olarak kullanılan benzin, motorin ve LPG yakıtlarına oranla CNG'nin özgül enerji maliyetinin daha az olduğu görülmüştür. Benzine oranla takriben %50-55 oranında yakıt tüketim maliyet ekonomisi sağlayan doğalgaz, ekonomi bakımından da oldukça caziptir. Oto CNG dolum istasyonlarının ülke genelinde yaygınlaştırılması ve teşvik edilmesi halinde, ülke genelindeki motorlu taşıtlarda CNG kullanımının ciddi oranda artacağı düşünülmektedir. Bu durum, enerji verimliliğine katkı sağlayacağı gibi, çevre kirliliğini de önemli oranda azaltacaktır. Sonuç itibarı ile CNG kullanımının yaygınlaştırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Kartal, E.**, Yanma ve Yanmanın Optimizasyonu, TTMD Dergisi, 16. <http://www.ttmd.org.tr/userfiles/dergi/dergi16.pdf>, 10 Ocak 2016.
- [2] <https://www.ngk.de/tr/ayrintilariyla-teknoloji/lambda-sensoerleri/egzoz-gazi-ile-ilgili-temel-bilgiler/ideal-karism/>, İdeal Karışım, 3 Ocak 2016.
- [3] **Can, İ., Öner, C., Sugözü, İ.**, (2011). LPG İle Çalışan Benzinli Bir Motora Kademeli Dolgu Yapılmasının Performans Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- [4] **Mehdiyev, R., Bayka, D., Arslan, H., Güdü, T.**, (2005). Düşük Emisyonlu Ve Yüksek Verimli Yeni Bir Kademeli Dolgulu Benzin Motoru, Mühendis ve Makine 46- 549.
- [5] http://www.yildiz.edu.tr/~yavas/Kad_Dolgu_Direkt_benzin_puskurtme.pdf, Homojen ve Kademeli Dolgu, 11 Ocak 2016.
- [6] http://web.itu.edu.tr/~yamanlar/faq_t/#5, Doğal Gaz Hakkında Bilgiler, 14 Ocak 2016.
- [7] **Çetinkaya, S.**, (2004). Benzin ve Dizel Motorlarının Doğalgaz Motoruna Dönüştürülmesi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 81, 14-31.
- [8] <https://www.uniongas.com/about-us/about-natural-gas/chemical-composition-of-natural-gas>, Chemical Composition of Natural Gas, 19 Ocak 2017.
- [9] Doğalgaz Yakıt Sistemleri, Motorlu Araçlar Teknolojisi Yayın Dizini, 2014, T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara.
- [10] http://benergypartners.com/Facts_About_Natural_Gas.html, Facts About Natural Gas, 4 Ocak 2016.
- [11] **Bora, Y., H., Özden, Ş., Türkel, V.**, (2004). Doğalgazlı Araçların Çevreye Olumlu Etkileri, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, 26-28 Mayıs 2004.
- [12] Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporları, Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı Yayını, Mayıs 2017.
- [13] **Öğüt, H., Kuş, R.**, (2002). Motorlu Taşıtlarda Alternatif Yakıt Kullanımı, II. Ulaşım ve Trafik Kongresi Sergisi.
- [14] LPG-CNG'ye Dönüştürülmüş Araçlarda Denetim Uygulamaları (2008). LPG-CNG Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı, Oda Raporu III., TMMOB Yayını.
- [15] <http://www.konyalpg.com/dunyadacng.htm>, CNG Doğalgaz Dönüşümü, 17 Ocak 2016.
- [16] **Bielaczyc, P., Szczotka, A., Brodzinski, H.** (2001). Analysis of the Exhaust Emissions From Vehicles Fuelled with petrol or LPG and CNG Alternatively”, Journal of Kones. Combustion Engines, 1-2:363-370.
- [17] www.csb.gov.tr/dosyalar/images/file/HavKirlSagEtk.doc, Hava Kirliliğinin Sağlık Üzerindeki Etkileri, 19 Ocak 2016.

- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_natural_gas_vehicles, Doğal Gazlı Üretilen Taşıtların Listesi, 17 Ocak 2016.
- [19] <http://gazeo.com/up-to-date/news/2014/Natural-gas-storage,news,7328.html>, CNG'li Taşıtlar ile İlgili Bilgiler, 5 Ocak 2016.
- [20] <http://www.cngcomplete.com/blog/natural-gas-history-vehicles/>, CNG'li Taşıtların Tarihçesi, 16 Ocak 2016.
- [21] **Semin, R.A.B.**, (2008). A Technical Review Of Compressed Natural Gas As An Alternative Fuel For Internal Combustion Engines, Am. J. Eng. Appl. Sci 1.4:302-311.
- [22] **Yetişken, Y., Ekmekçi, İ.**,(2007). Türkiye Şartlarında Sıkıştırılmış CNG'li Araçların Kullanımının İrdelenmesi, Mühendis ve Makine, 49:586.
- [23] <http://www.cng.com.sg/cng-properties.html>, CNG Properties, 18 Ocak 2016.
- [24] http://cdn.igdas.com.tr/Web/Content/DogalgazinAraclardaKullanimi_OTO_DOGALGAZ_CNG.pdf, Doğal Gazın Taşıtlarda Kullanımı, 20 Aralık 2015.
- [25] **Aksoy, N.**, (1988). Doğal Gaz ve Yanma, BOTAŞ Doğal Gaz Sempozyumu Tebliğleri, Ankara.
- [26] **Srinivasan, K.K.**, (2006). The Advanced Injection Low Pilot Ignited Natural Gas Engine: A Combustion Analysis, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.128(1):213-218.
- [27] **Durell, E., Allen, J., Law, D., Heath, J.**, (2000). Installation and Development of a Direct Injection System for a Bi-Fuel Gasoline and Compressed Natural Gas Engine, Proceeding ANGVA 2000 Conference, Yokohama, Japan.
- [28] <http://www.unitrove.com/>, Natural Gas Density Calculator, 13 Haziran 2017.
- [29] **Veziroğlu, T.N., Noyan, Ö.F.**, 21. Yüzyılın Enerjisi: Hidrojen Enerji Sistemi, 41-64. http://www.emo.org.tr/ekler/17e6bcbcef8de3f_ek.pdf, 21 Ocak 2016.
- [30] **Ristovski, Z.D., Morawska, L., Hitchins, J., Thomas, S., Greenaway, C., Gilbertt, D.**, (2000). Particle Emissions From Compressed Natural Gas Engines, J. Aerosol Sci., 31:403-413.
- [31] **Sasaki, H., Sekiyama, S., Isusu, K.N.**, (2002). A New Combustion System Of a Heat-Insulated Natural Gas Engine With a Pre-Chamber Having a Throat Valve, Int J Engine Research, 3.
- [32] <http://www.naturelgaz.com/tr/neden/cng+hakkinda.html>, CNG Hakkında Bilgiler, 12 Ocak 2016.
- [33] **Bayraktar, H., Durgun, O.**, (2003). Buji Ateşlemeli Motorlar İçin Alternatif Yakıtların Teorik Değerlendirilmesi ve Pratik Kullanılabilirliği, Mühendis ve Makine, 45-533.
- [34] **Prevazi, G.**, (2002). Araçlarda CNG Uygulamaları, LPG ve CNG Uygulamaları Sempozyumu Bildiriler Kitabı, TMMOB Yayını.
- [35] **Aydın, F., Acaroğlu, M.**, (2009). İçten Yanmalı Motorlarda LPG Ve Doğalgaz Sistemlerinin Karşılaştırılması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Türkiye/Karabük.

- [36] LPG/CNG'ye Dönüştürülmüş Araçlarda Denetim Uygulamaları, (2012). TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Oda Raporu(4), TMMOB Yayını, MMO/581.
- [37] **Özcan, F.**, (2010). Buji Ateşlemeli Bir Motorda LPG ve CNG Kullanımının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi, Fatih ÖZCAN, M.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [38] **Saka, B., Özaktaş, T.**, (2004). Dünya ve Türkiye'de Doğal Gaz ve LPG'li Taşıtların Gelişimi, V. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu 26-28 Mayıs 2004.
- [39] **Dinler, N., Yücel, N.**, (2003). Alternatif Yakıt Olarak LPG Kullanan İki Motorun Performansının Deneysel İncelenmesi, LPG ve CNG Uygulamaları Sempozyumu, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara, 93-100.
- [40] **Sugözü, İ., Deniz, T., Mutlu, İ.**, (2009). Buji Ateşlemeli Bir Motorda Sıkıştırma Oranının Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1(1):17-24.
- [41] **Pulkrabek, W.W.**, (1997). Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 621:43:8, University of Wisconsin-Platteville, New Jersey:USA.
- [42] **Heywood, J.B.**, (1988). Internal Combustion Engine Fundamentals, Mcgraw-Hill Inc., USA.
- [43] **Gutierrez, H.**, (1992). Obtainment of Same Thermal Efficiency in Spark Engines with Different Compression Ratios, SAE Technical Paper, No: 921523.
- [44] **Zheng J-J., Wang J-H., Wang B., Huang, Z-H.**, (2009). Effect Of The Compression Ratio On The Performance And Combustion Of A Natural-Gas Direct-Injection Engine. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering, 85-98.
- [45] **Das, A., Watson, H.C.**, (1997). Development Of A Natural Gas Spark Ignition Engine For Optimum Performance. Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part D: Journal Of Automobile Engineering, 211: 361-378.
- [46] **Çelik, M. B., Balcı, M.**, (2002). Sabit Yük Ve Hız Şartlarında Sıkıştırma Oranının Motor Karakteristiklerine Etkisi. Teknoloji 2002, 3-4:39-45.
- [47] **Sekmen, Y., Erdumanlı, P., Akbaş, A., Salman, M., S.**, (2007). Buji Ateşlemeli Bir Motorda Sıkıştırma Oranının Motor Performansı Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22(4):745-751.
- [48] **Rao, G.L.N., Ramadhas, A.S.**, (2010). Alternative Fuels For Transportation, Compressed Natural Gas, 227-241.
- [49] **Demir, A., Gümüş, M., Yardım, M.S.**, (2011). LPG/CNG Yakıtlı Taşıtların Kapalı Otoparkları Kullanabilirliği, Uluslararası Otopark Politikaları ve Uygulamaları Sempozyumu 2011.
- [50] T.C. Resmi Gazete, (2008). Araçların İmal, Tadil ve Montajı Hakkında Yönetmelik (AITM), Sayı:27068, 28 Kasım 2008.
- [51] T.C. Resmi Gazete, (2009). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik, Sayı: 27344, 19 Eylül 2009.

- [52] Ham Petrol ve Doğal Gaz Sektör Raporları, Türkiye Petrolleri Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı Yayını, Mayıs 2015.
- [53] <https://www.just-auto.com/analysis/briefing-hcci-engine-technology-id174273.aspx>, Briefing – HCCI Engine Technology, 29 Mart 2017
- [54] <https://www.autoevolution.com/news/2018-mazda3-to-introduce-hcci-engine-promises-3-better-fuel-efficiency-114652.html>, 2018 Mazda3 to Introduce HCCI Engine, Promises 30% Better Fuel Efficiency, 29 Mart 2017
- [55] **Can, Ö., Çınar, C., ve Şahin, F.,** (2009). Ön Karışımli Benzin Dolgusunun HCCI-DI Motorunda Yanma Ve Egzoz Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 24(2):229-236.
- [56] **Can, İ.,** (2009). LPG İle Çalışan Benzinli Bir Motora Kademeli Dolgu Yapılmasının Performans Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, İbrahim CAN, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [57] **Eng, J.A.,** (2002). Characterization of Pressure Waves in HCCI Combustion, SAE Technical Paper, No: 2002-01-2859.
- [58] <https://www.autocar.co.uk/car-news/industry/next-generation-mazda-engines-eclipse-electric-car-emissions>, Next-generation Mazda Engines to Eclipse Electric Cars on Emission, 11 Haziran 2017.
- [59] **Abid, F., H.,** (2016). Comparasion of Performance Characteristics of NG and Gasoline-Fuelled Single Cylinder SI Engine, International Journal of Computation and Applied Sciences, IJOCAAS, 1(2), 13-20
- [60] **Ramjee, E., Reddy, K.V.K.,** (2011). Performance Analysis of A 4-Stroke SI Engine Using CNG as An Alternative Fuel, Indian Journal of Science and Technology, 4(7), 801-804.
- [61] <https://earthquake.usgs.gov/learn/topics/mercalli/php>, The Modified Mercalli Intensity Scale, 4 Mart 2017
- [62] <https://www.brighthubengineering.com/machine-daesign/15235-the-stoichiometric-air-fuel-ratio/>, Calculating The Stoichiometric Air-Fuel Ratio, 12 Mayıs 2017
- [63] **Malcolm, H.,** (2004). Transport Research Laboratory, Pinnacle Research, Noise Impact Of Land Transport: Stage3 Framework Development. Final Report,
- [64] **Savak, H., Aktaş, A.,** (2009). Tek Silindirli Benzinli Bir Motorun Egzoz Susturucusunun Performans ve Emisyonlarına Etkisi, 5. Uluslar Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük/Türkiye
- [65] **Güler, Ç., Çobanoğlu, Z.,** (1994). Gürültü, Çevre Sağlığı Temel Kaynak Dizisi, No:19.
- [66] **Davies, P.O.A.L, Harrison, M.F., Coolins, H.J.,** (1997). Acoustic Modelling of Multiple Path Silencers With Experimental Validations, Journal of Sound And Vibration, 200(2):195-225.
- [67] **Ge, Y.S., Tan, J.W., Lu, X.M.,** (2007). Numerical Simulation Of Intake And Exhaust Process Of Turbocharged Diesel Engine [J], Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2, 010.

- [68] **Mnjual, M.L.**, (1998). Analysis And Design Of Mufflers-An Overview Of Research At The Indian Institute Of Science, Journal Of Sound And Vibration, 211(3):425-433.
- [69] **Aktürk, N., Akdemir, O., Üzkurt, İ.**, (2003). Trafik Işık Sürelerinin Neden Olduğu Çevresel Taşıt Gürültüsü, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 18(1):71-87.
- [70] **Zhang, H.B., Ge, Y.S., Yang, D.F., Han, X.K., Zhang, F.J.**, (2004). Computer Assisted Design Of Exhaust Muffler Based On Transfer Matrix(J), Journal Of Beijing Institute of Technology, 5, 005.
- [71] **Boonen, R., Sas, P.**, (1998). Development Of An Active Exhaust Sincer For Internal Combustion Engines, In Proceedings Of The International Conference On Noise And Vibration Engineering, Vol.3:1245-1252.
- [72] **Boonen, R., Sas, P.**, (2001). Design Of An Active Exhaust Attenuating Valve For International Combustion Engines, KULeuven, Department Of Mechanical Engineering, Celestijnenlaan 300B, B-3001, Heverlee, Belgium .
- [73] **Boonen, R., Sas, P.**, (2002). Determination Of The Acoustical İmpedance Of An Internal Combustion Engine Exhaust, , KULeuven, Department Of Mechanical Engineering, Celestijnenlaan 300B, B-3001, Heverlee, Belgium .
- [74] **Soruşbay, C.**, Motor Çalışma Koşullarının Emisyonlara Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Otomotiv Laboratuvarı Ders Notları. web.itu.edu.tr/sorusbay/EGE/EGE.htm, 5 Temmuz 2017.
- [75] **Soruşbay, C.**, (1988). İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Gazları Emisyonları, Ders Notları, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul. web.itu.edu.tr/sorusbay/EGE/EGE_FILES/ 20 Haziran 2017.
- [76] **Çelik, B.M., Aktaş, A., Özdalyan, B.**, (2006). Gerçek Yol Şartlarında LPG ve Benzinle Çalışan İki Taşıtın Emisyon Bakımından Karşılaştırılması, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 11(1).
- [77] E060 Istruzioni Originali, Analisi Gas MCTCNet2, Manuale Software Per Analizzatore tipo: AMM NEW OTC, Bosch Automotive Service Solutions S.r.l., Via Provinciale 12, 43038 Sala Baganza(PR), İtaly. Kişisel görüşme sonucunda temin edilmiştir, (2017).
- [78] <https://www.socarenerji.com/akaryakit-fiyatlari>, Akaryakit Fiyatları, 3 Ağustos 2017.

ÖZGEÇMİŞ

Nihat ŞENOCAK, 07.09.1991 tarihinde Elazığ'da doğdu. İlköğrenimini Elazığ ili, Namık Kemal İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Orta öğrenimini Elazığ Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2010-2011 eğitim ve öğretim yılında Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve lisans öğrenimine başladı. 2014 yılı Haziran ayında; Otomotiv Mühendisliği Bölüm üçüncülüğü derecesi ile lisans mezuniyeti kazanarak, mezun oldu.

Lisans mezuniyetinin ardından 2014 yılı Eylül ayında; Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı'nda tezli yüksek lisans öğrenimine başladı. Lisansüstü öğrenim sürecinde; Öncelikli Alanlar AR-GE Destekleme Programı(1003) kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenen 113M090 numaralı "Ters Relüktans Elektrik Motorlu Otomobilin Tasarımı, İmalatı ve Kontrolü" konulu projede bursiyer olarak görev aldı. Yine lisansüstü öğrenim sürecinde, FÜBAP-TEKF.16.12 numaralı "Homojen/Kademeli Dolgulu Bir Benzinli Motorda Doğalgaz Kullanımının Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi" konulu bilimsel araştırma projesinde; araştırmacı olarak görev aldı ve tez konusunu oluşturan deneysel çalışmalarını tamamladı. 2017 yılında "Homojen Dolgulu Benzinli Motorlarda Doğalgaz Kullanımının Motor Performansına Etkisinin İncelenmesi" başlıklı tezini tamamladı.