

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DOĞALGAZ KULLANILAN ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL MOTORUNDA
BİYOYAKIT VE KATKI MADDESİ KULLANIMININ KİSİMİ YÜKLERDEKİ
PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

Gökhan ERGEN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Murat KARABEKTAŞ

Aralık 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞALGAZ KULLANILAN ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL MOTORUNDA
BİYOYAKIT VE KATKI MADDESİ KULLANIMININ KİSİMİ YÜKLERDEKİ
PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİLERİ

DOKTORA TEZİ

Gökhan ERGEN

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE EĞİTİMİ

Bu tez / / 2011 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oy çokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
İsmet ÇEVİK
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Murat KARABEKTAŞ
Üye

Prof. Dr.
Adnan PARLAK
Üye

Doç. Dr.
Murat HOŞÖZ
Üye

Doç. Dr.
Halit YAŞAR
Üye

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca çalışmalarımı teşvik eden ve desteğini esirgemeyen danışmanım Sn. Doç. Dr. Murat KARABEKTAŞ'a teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarında katkı ve desteklerini esirgemeyen Teknisyen Hasan GÜREL'e, Tekniker Sadi YAPICIOĞLU'na, deneysel yöntem aşamasında yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ömer SAVAŞ'a ve Arş. Gör. Ferit FIÇICI'ya, FBDTEZ 2008-50-02-008 nolu projenin maddi katkısıyla gerçekleştirilen çalışmam için Sakarya Üniversitesi Rektörlüğü'ne, özellikle çalışmalarım esnasında özverisini ve manevi desteğini hiç eksik etmeyen eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
ENERJİ İHTİYACI.....	14
2.1. Dünyada Enerji.....	14
2.2. Türkiye’de Enerji.....	17
BÖLÜM 3.	
ALTERNATİF YAKIT GEREKSİNİMİ ve DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN ALTERNATİF YAKITLAR.....	20
3.1. Alternatif Yakıt Gereksinimi.....	20
3.1.1. Emisyon sınırlamaları.....	20
3.1.2. Motorlu taşıt kullanımı.....	24
3.2. Dizel Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar.....	25
BÖLÜM 4.	
DOĞALGAZ ve MOTORLARDA KULLANIMI.....	28
4.1. Dünyada ve Türkiye’de Doğalgaz.....	28

4.2. Doğalgaz Kullanımı ve Özellikleri.....	30
4.2.1. Doğalgazın özellikleri.....	31
4.2.2. Taşıtlarda doğalgaz kullanımı.....	33
4.2.2.1. Doğalgaz kullanım maliyeti.....	35
4.2.2.2. Doğalgaz kullanım güvenliği.....	36
4.2.2.3. Doğalgazın çevreye etkileri.....	38
4.2.2.4 Doğalgazın depolama ve dağıtım özellikleri.....	39
4.2.2.5 İçten yanmalı motorlarda doğalgaz uygulamaları.....	44
4.3. Motor Yakıtı Olarak Doğalgaz.....	48
4.3.1. Doğalgazın yanma özellikleri.....	49

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
5.1. Materyal.....	51
5.1.1. Deney yakıtları.....	51
5.1.2. Deney düzeneği ve kullanılan cihazlar.....	54
5.1.2.1. Deney düzeneği.....	54
5.1.2.2. Deney motoru.....	55
5.1.2.3. Dinamometre.....	56
5.1.2.4. Hava debi ölçeri.....	57
5.1.2.5. Yakıt tüketimi ölçümü.....	57
5.1.2.6. Çift yakıt sistemi.....	58
5.1.2.7. İlave yakıt sistemi.....	60
5.1.2.8. Sıcaklık göstergeleri ve termokupllar.....	60
5.1.2.9. Egzoz emisyon cihazı.....	61
5.2. Deneysel Yöntem.....	61
5.2.1. Deneysel tasarım.....	62
5.2.2. Belirsizlik analizi.....	67
5.3. Hesaplama Yöntemleri.....	69
5.3.1. Motor döndürme momenti ve efektif güç.....	69
5.3.2. Özgül yakıt tüketimi ve özgül enerji tüketimi.....	70
5.3.3. Efektif verim.....	71

BÖLÜM 6.

ARAŞTIRMA SONUÇLARI ve TARTIŞMA.....	72
6.1. Motorin ve Doğalgaz Kullanımı.....	72
6.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT).....	73
6.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET).....	76
6.1.3. Efektif verim.....	78
6.1.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları.....	80
6.1.5. Karbonmonoksit (CO) emisyonları.....	82
6.1.6. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları.....	85
6.1.7. Azotoksit (NO) emisyonları.....	87
6.1.8. Egzoz gazı sıcaklıkları.....	90
6.2. Çift Yakıt Olarak Doğalgaz Ve Motorin Kullanımının Etkileri.....	91
6.3. Kısmi Yük Şartlarında Gerçekleştirilen Uygulamalar.....	92
6.3.1. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı.....	92
6.3.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT).....	93
6.3.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET).....	95
6.3.1.3. Efektif verim.....	97
6.3.1.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları.....	100
6.3.1.5. Karbonmonoksit (CO) emisyonları.....	102
6.3.1.6. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları.....	104
6.3.1.7. Azotoksit (NO) emisyonları.....	107
6.3.1.8. Egzoz gazı sıcaklığı.....	110
6.3.2. Fumigasyon yöntemiyle diglyme kullanımı (F-DGM).....	112
6.3.2.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT).....	112
6.3.2.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET).....	115
6.3.2.3. Efektif verim.....	117
6.3.2.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları.....	120
6.3.2.5. Karbonmonoksit (CO) emisyonları.....	122
6.3.2.6. Karbondioksit (CO ₂) emisyonları.....	125
6.3.2.7. Azotoksit (NO) emisyonları.....	127
6.3.2.8. Egzoz gazı sıcaklığı.....	130

BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ.....	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

ANG	: Absorbe Edilmiş Doğalgaz
ANOVA	: Varyans Analizi
BG	: Beygir Gücü
C20-D	: %20 Doğalgaz İçerikli Çift Yakıt (Doğalgaz – Motorin)
C40-D	: %40 Doğalgaz İçerikli Çift Yakıt (Doğalgaz – Motorin)
C60-D	: %60 Doğalgaz İçerikli Çift Yakıt (Doğalgaz – Motorin)
C80-D	: %80 Doğalgaz İçerikli Çift Yakıt (Doğalgaz – Motorin)
C20-B	: %20 Doğalgaz ve Pilot Biyodizel İçerikli Çift Yakıt
C40-B	: %40 Doğalgaz ve Pilot Biyodizel İçerikli Çift Yakıt
C60-B	: %60 Doğalgaz ve Pilot Biyodizel İçerikli Çift Yakıt
C80-B	: %80 Doğalgaz ve Pilot Biyodizel İçerikli Çift Yakıt
CNG-D	: Çift Yakıt Yöntemiyle Uygulanan Doğalgaz-Motorin Yakıtları
CNG-B	: Pilot Yakıt Olarak Biyodizel Kullanılan Çift Yakıtlar
CNG	: Sıkıştırılmış Doğalgaz
C/H	: Karbon/Hidrojen Oranı
DGM	: Diglyme ya da Dietilen Glikol Dimetil Eter
EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
ENGVA	: Avrupa Doğal Gazlı Araçlar Birliği
F10DGM	: %10 Diglyme İçerikli Çift Yakıt
F20DGM	: %20 Diglyme İçerikli Çift Yakıt
F30DGM	: %30 Diglyme İçerikli Çift Yakıt
F-DGM	: Diglyme İçerikli Çift Yakıtlar
GTEP	: Milyar Ton Petrol Eşdeğeri
HCCI	: Homojen Dolgulu Dizel Motor
IANGV	: Uluslar arası Doğal Gazlı Araçlar Birliği
İGDAŞ	: İstanbul Gaz Dağıtım A. Ş.
KOH	: Potasyumhidroksit

KY	: Kanola Yağı
KYME	: Kanola Yağı Metil Esteri
LNG	: Sıvılaştırılmış Doğalgaz
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
MTEP	: Milyon Ton Petrol Eşdeğeri
NiCr-Ni	: Nikel-Krom-Nikel
OAPEC	: Petrol İhraç Eden Arap Őlkeleri Birliği
ÖYT	: Özgöl Yakıt Tüketimi
ÖET	: Özgöl Enerji Tüketimi
SULEV	: Süper Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt Standartları
S/N	: Sinyal/Gürültü Oranı
TEP	: Ton Eşdeğer Petrol
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
TY	: Tam Yük şartları
ULEV	: Ultra Düşük Emisyonlu Taşıt Standartları
UEA	: Uluslararası Enerji Ajansı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dünya birincil enerji kaynaklarının 1990-2030 yılı projeksiyonu.....	15
Şekil 2.2.	Birincil enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki kullanım oranları projeksiyonu.....	15
Şekil 2.3.	2000-2010 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi dağılımı....	16
Şekil 2.4.	Türkiye birincil enerji kaynakları dağılımı.....	17
Şekil 2.5.	2000-2010 yılları arasındaki Türkiye enerji tüketimi dağılımı..	18
Şekil 2.6.	Türkiye birincil enerji üretimi (%) – 2009.....	19
Şekil 4.1.	2000-2010 yılları arasında dünya doğalgaz tüketimi.....	28
Şekil 4.2.	Doğalgaz rezerv dağılımları.....	29
Şekil 4.3.	Türkiye'nin doğalgaz ithal ettiği ülkeler ve dağılım oranları...	30
Şekil 4.4.	1991 yılından günümüze dünya genelinde doğalgazlı taşıt trendi.....	35
Şekil 4.5.	CNG Tankı	40
Şekil 4.6.	CNG, motorin ve benzin tanklarına ait yakıt ve depolama ağırlıklarının karşılaştırılması.....	41
Şekil 4.7.	Tampon depolama sistemi şeması.....	42
Şekil 4.8.	Kademeli depolama sistemi şeması.....	43
Şekil 4.9.	Hızlı dolum sistemi şeması.....	43
Şekil 4.10.	Yavaş dolum sistemi şeması.....	44
Şekil 4.11.	Çift yakıt sistemi şeması.....	47
Şekil 4.12.	Çift yakıt enjektörünün çalışma biçimi.....	48
Şekil 4.13.	Doğalgazlı çift yakıt yanma safhaları.....	50
Şekil 5.1.	Biyodizel üretim aşamaları.....	52
Şekil 5.2.	Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	54
Şekil 5.3.	Deney düzeneği şeması.....	55
Şekil 5.4.	Deney motoru.....	56

Şekil 5.5.	Elektrikli dinamometre.....	56
Şekil 5.6.	Hava debi ölçeri.....	57
Şekil 5.7.	Hassas terazi ve yakıt tankı.....	57
Şekil 5.8.	CNG tankı.....	58
Şekil 5.9.	Basınç regülatörü.....	58
Şekil 5.10.	Doğalgaz akış ölçeri.....	59
Şekil 5.11.	Doğalgaz sönümlenme tankı.....	59
Şekil 5.12.	İlave yakıt sistemi.....	60
Şekil 5.13.	Sıcaklık kontrol paneli.....	60
Şekil 5.14.	Egzoz emisyon cihazı.....	61
Şekil 6.1.	Motor yüküne bağlı özgül yakıt tüketimi değişimleri (a. 1400 d/d b. 1800 d/d c. 2200 d/d).....	74
Şekil 6.2.	Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	75
Şekil 6.3.	Motor yüküne bağlı özgül enerji tüketimi değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	76
Şekil 6.4.	Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	77
Şekil 6.5.	Motor yüküne bağlı efektif verim değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	78
Şekil 6.6.	Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	79
Şekil 6.7.	Motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	81
Şekil 6.8.	Farklı motor parametrelerinin HC değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	82
Şekil 6.9.	Motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	83
Şekil 6.10.	Farklı motor parametrelerinin CO değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	84
Şekil 6.11.	Motor yüküne bağlı CO ₂ emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	85

Şekil 6.12.	Farklı motor parametrelerinin CO ₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	86
Şekil 6.13.	Motor yüküne bağlı NO emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	87
Şekil 6.14.	Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	88
Şekil 6.15.	Motor yüküne bağlı egzoz gazı sıcaklık değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d).....	90
Şekil 6.16.	Farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	91
Şekil 6.17.	Motor yüküne bağlı ÖYT değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	93
Şekil 6.18.	Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	94
Şekil 6.19.	Motor yüküne bağlı ÖET değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	96
Şekil 6.20.	Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	97
Şekil 6.21.	Motor yüküne bağlı efektif verim değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	98
Şekil 6.22.	Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	99
Şekil 6.23.	Motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	100
Şekil 6.24.	Farklı motor parametrelerinin HC emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	101
Şekil 6.25.	Motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	103

Şekil 6.26.	Farklı motor parametrelerinin CO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	104
Şekil 6.27.	Motor yüküne bağlı CO ₂ emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	105
Şekil 6.28.	Farklı motor parametrelerinin CO ₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	106
Şekil 6.29.	Motor yüküne bağlı NO emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	108
Şekil 6.30.	Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	109
Şekil 6.31.	Motor yüküne bağlı egzoz gazı sıcaklığı değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	110
Şekil 6.32.	Farklı motor parametrelerinin egzoz gaz sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	111
Şekil 6.33.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	113
Şekil 6.34.	Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	114
Şekil 6.35.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖET değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	115
Şekil 6.36.	Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	117
Şekil 6.37.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen efektif verim değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	118

Şekil 6.38	Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri.....	119
Şekil 6.39.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	121
Şekil 6.40.	Farklı motor parametrelerinin HC emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	122
Şekil 6.41.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	123
Şekil 6.42.	Farklı motor parametrelerinin CO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	124
Şekil 6.43.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO ₂ emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	126
Şekil 6.44.	Farklı motor parametrelerinin CO ₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	127
Şekil 6.45.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	128
Şekil 6.46.	Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	129
Şekil 6.47.	F-DGM yakıtlarıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar).....	131
Şekil 6.48.	Farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri.....	132

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	2000-2010 yılları arasında Türkiye birincil enerji tüketimi değerleri (MTEP).....	17
Tablo 3.1.	Ağır hizmet tipi araçlar için Euro Standartları.....	22
Tablo 3.2.	Binek araçlar için Euro Standartları.....	22
Tablo 3.3.	2004–2010 yılları arasında yakıt türüne göre Türkiye’deki taşıt dağılımı.....	24
Tablo 4.1.	Türkiye’de kullanılan doğalgaz bileşenleri.....	31
Tablo 4.2.	Doğalgazın yakıt özellikleri.....	31
Tablo 4.3.	2010 yılı verilerine göre en çok doğalgazlı taşıta sahip ülkeler.	34
Tablo 4.4.	Doğalgazın taşıtlarda kullanımıyla ilgili TSE standartları.....	37
Tablo 5.1.	Deneyleerde kullanılan doğalgazın yakıt özellikleri.....	51
Tablo 5.2.	Biyodizel ve motorin özellikleri.....	53
Tablo 5.3.	Diglyme (DGM) özellikleri.....	53
Tablo 5.4.	Deneyleerde kullanılan dizel motorunun teknik özellikleri.....	55
Tablo 5.5.	Ölçümü gerçekleştirilen emisyonlar ve egzoz emisyon cihazının özellikleri.....	61
Tablo 5.6.	Çift yakıt yöntemiyle doğalgaz-motorin yakıtlarının kullanımı sonucu elde edilen ANOVA tablosu.....	65
Tablo 5.7.	Pilot yakıt değişimi ve katkı maddesi uygulamalarıyla elde edilen ANOVA tablosu.....	66
Tablo 5.8.	Sistematik ve toplam belirsizlikler.....	69

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Dizel Motor, Çift Yakıt, Doğalgaz, Diglyme, Biyodizel

Yüksek performansları, düşük yakıt tüketimleri ve maliyetleri gibi özellikleri nedeniyle dizel motorlu taşıtlara ilgi artmaktadır. Bunun yanında, petrol kaynaklarının azalması, petrol fiyatlarının yükselmesi ve taşıtlardan kaynaklanan kirliliğin önemli oranda artması sonucunda ise dizel motorlarında kullanılacak alternatif yakıt arayışları gündeme gelmektedir. Doğalgaz, yakıt özellikleriyle ve düşük fiyatı nedeniyle, dizel motorlarında kullanımı uygun bir yakıt olarak değerlendirilmektedir. Hava kirliliğini ve petrole bağımlılığı azaltıcı etkilerinin yanı sıra, rezervlerinin yeterli olması nedeniyle, taşıtlarda doğalgaz kullanımına yönelik, gerek motor üreticileri, gerekse kullanıcıları teşvik edilmektedir. Dizel motorlarında doğalgaz kullanımı hususunda yapılan çalışmalarda, yakıt maliyetlerinin düştüğü ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler olduğu ifade edilmektedir. Ancak, doğalgaz kullanımı sonucunda, belirli çalışma koşullarında, motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları yönünden bazı olumsuzluklar olduğu da belirtilmektedir.

Bu çalışmada, dizel motorlarında doğalgaz kullanımından kaynaklanan sorunların giderilmesine yönelik olarak, farklı pilot yakıt kullanımı ve katkı maddesi uygulamalarının etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, yüksek setan sayısına ve oksijen içeriğine sahip biyodizel ve diglyme kullanılmıştır. Biyodizel, pilot yakıt olarak motorin yerine kullanılmış, diglyme ise doğalgaza fumigasyon yöntemiyle katkı maddesi olarak ilave edilmiştir.

Çalışmada, tek silindirli bir dizel motoru çift yakıtla çalışır duruma getirilmiştir. Bu koşullarda, motorinle ve farklı oranlardaki doğalgaz-motorin yakıtlarından oluşan çift yakıt uygulamasıyla deneyler gerçekleştirilmiştir. Tam yük ve kısmi yük şartlarında gerçekleştirilen deneyler sonucunda, elde edilen veriler dikkate alınarak, sorunlu çalışma bölgeleri tespit edilmiş, bu çalışma koşullarında, biyodizel kullanımı ve diglyme katkısını içeren deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucu elde edilen veriler, çalışmanın sonunda grafikler yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuş, ayrıca Ki Kare Testi kapsamında ANOVA ve S/N bulguları dikkate alınarak yorumlanmıştır.

Verilerin değerlendirilmesi sonucunda, çift yakıt yöntemiyle doğalgaz kullanımının motorin kullanımına göre düşük-orta motor yüklerinde, motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları yönünden bazı olumsuzluklara neden olduğu saptanmıştır. Buna yönelik olarak gerçekleştirilen biyodizel kullanımı ve diglyme katkısı uygulamaları ile doğalgaz kullanımına göre, efektif verim ve özgül enerji tüketimi değerlerinde iyileşme elde edildiği belirlenmiştir. Ayrıca diglyme katkısının HC emisyonlarında, biyodizel kullanımının ise HC ve CO emisyonlarında iyileşmeye yol açtığı gözlemlenmiştir. Biyodizel kullanımı ve diglyme katkısı ile NO emisyonlarının doğalgaz kullanımına göre bir miktar artış gösterdiği belirlenmiştir.

EFFECTS OF BIOFUEL AND ADDITIVE USAGE ON THE PARTIAL LOAD PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS OF A DUAL-FUEL DIESEL ENGINE FUELED WITH NATURAL GAS

SUMMARY

Key Words: Diesel Engine, Dual Fuel, Natural Gas, Diglyme, Biodiesel

For reasons such as their high performance, low fuel consumption and costs, interest in vehicles with diesel engines is growing. Besides, the issue of finding alternative fuels for diesel engines has begun to be considered as a result of decrease in oil reserves, rise in oil prices and the significant increase in air pollution caused by motor vehicles. The use of natural gas in diesel engines is considered to be suitable because of its fuel features and low price. Both engine manufacturers and users are being encouraged to use natural gas in motor vehicles as it not only reduces air pollution and reliance on oil but also has adequate reserves. It is stated in the studies considering the use of natural gas in diesel engines that the fuel costs have decreased and that there has been improvement in exhaust emissions. However, it is also stated that under specific operating conditions, some problems related with engine performance characteristics and exhaust emissions originating from the use of natural gas have been observed.

In this study, the effects of different pilot fuel use and the application of additives in handling the problems originating from the use of natural gas are evaluated. For this purpose, biodiesel and diglyme, which have high cetane number and oxygen content, were used. Biodiesel was used as pilot fuel instead of diesel fuel, and diglyme was added to natural gas through fumigation method.

In the study, firstly, a single-cylinder diesel engine was equipped in order to operate with dual fuel. Under these circumstances, experiments on the application of diesel fuel and dual fuel containing of diesel fuel and natural gas at different rates were carried out. Having taken the data obtained from the experiments carried out under the conditions of full load and part load into consideration, the problematic parts, have been determined and under these circumstances experiments focusing on the use of biodiesel and diglyme as an additive have been carried out. Data obtained from these experiments are presented comparatively through diagrams at the end of this study, and are also discussed within the context of chi-square test by regarding the ANOVA and S/N data.

By evaluating the experimental data, it has been determined that at low-medium engine loads, the use of natural gas through dual fuel method in comparison with the use of diesel fuel has resulted in some problems regarding engine performance and exhaust emissions. The use of biodiesel and the application of diglyme as an additive to resolve such problems resulted in improvement in the brake thermal efficiency and specific energy consumption in comparison to the use of natural gas. Moreover, it has been observed that the application of diglyme caused an improvement in HC emissions and the use of biodiesel resulted in improvement in HC and CO emissions. It has also been observed that the use of biodiesel and the application of diglyme as an additive caused a slight increase in NO emissions in comparison to the use of natural gas.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Enerji, yaşamın temel ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli bir araçtır. Artan nüfus ve gelişen sanayileşme süreci, enerji ihtiyacının gün geçtikçe artmasına neden olmaktadır. Bu durum, enerji temininde çeşitli zorluklara yol açmakta ve enerji açığını oluşturmaktadır [1]. 1970'li yıllar enerji alanında önemli bir dönüm noktasıdır. 1973 yılında yaşanan petrol krizi, petrole dayalı enerji kullanımında ülkelerin büyük sıkıntılar yaşamasına neden olmuştur. Yaşanan kriz, ülkeleri enerji alanında farklı yaklaşımlara ve özellikle yeni kaynak arayışlarına itmiştir. Bu tarihten itibaren ve özellikle günümüzde, enerji ihtiyacının yerel kaynaklardan karşılanması, enerji verimliliğinin sağlanması ve tek bir kaynağa bağımlı olmayan enerji türlerinin kullanımı önem kazanmıştır. Bunun yanı sıra, rezerv sorunu bulunmayan, güvenli, ekonomik ve çevre dostu enerji türlerinin, günümüz teknolojisini ve sosyal yaşamını destekleyecek biçimde kullanılması gerekmektedir [2].

İçten yanmalı motorların tarihi, 18. yy.'ın sonlarına kadar uzanmaktadır. Benzin motorlarının ve dizel motorlarının icat edilmesiyle başlayan bu süreçte, içten yanmalı motorlar önemli bir gelişme göstermiştir. İçten yanmalı motorlar, günümüzde güç sistemleri, tahrik sistemleri ve enerji gibi pek çok alanda önemli bir yere sahip olmuştur [3]. İçten yanmalı motorların farklı alanlarda ve yoğun bir şekilde kullanımı, enerji tüketimindeki payını da giderek arttırmıştır. Petrol esaslı yakıtların kullanıldığı içten yanmalı motorlarda, petrolün sınırlı kaynaklara sahip olması ve bu yakıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin artması alternatif yakıt arayışlarını gündeme getirmiştir [4, 5].

Hava kirliliği, alternatif yakıt çalışmalarına yön veren önemli bir unsurdur. Gelişmekte olan ve sanayileşmiş kentlerde hava kirliliğinin yaklaşık %60-70 oranının motorlu taşıtlardan kaynaklandığı ifade edilmektedir. Bu oluşumu sağlayan

etkenler arasında en önemli pay, egzoz emisyonlarına aittir. Egzoz emisyonlarının dışında kurşun bileşikleri, yakıt ve yağ buharı, asbest artıkları, lastik kalıntıları gibi kirleticiler de yer almaktadır [6].

Karayolu taşıtları, kullanım yoğunlukları bakımından diğer motorlu taşıtlara (hava, deniz ve demiryolu) göre ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle, hava kirliliği ve enerji tüketimi üzerindeki etkisi de ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Artan nüfus, gelişen teknoloji ve sanayileşme ile birlikte, motorlu taşıt sayısı da önemli bir şekilde artış göstermektedir. 2001 yılında yaklaşık 7.3 milyonluk araç parkına sahip ülkemizde, 2010 yılı sonundaki araç parkı 15.1 milyona ulaşmış ve %107 oranında artış gerçekleşmiştir. Mevcut araç parkının en yüksek payı, otomobiller tarafından karşılanmıştır. 2010 yılı sonundaki veriler incelendiğinde, motorlu karayolu taşıtları arasında otomobil kullanım payının %50 oranında gerçekleştiği ifade edilmektedir. Otomobil sayıları dikkate alındığında, 2001 yılında %81 benzinli ve %19 dizel motorlu araç parkının, 2010 yılında %38.17 benzinli ve %41.04 dizel motorlu araç değerlerine ulaştığı belirtilmektedir [7].

Elde edilen verilere göre, dizel motorlu araçlara belirgin bir ilgi olduğu ve dizel araç kullanımının gün geçtikçe artış gösterdiği görülmektedir. Dizel motorları, deniz taşımacılığında kara taşımacılığına başlıca güç kaynağı olarak geniş bir alanda kullanılmaktadır. Basit yapıları, yüksek performansları, kolay bakım ve onarımları, düşük yakıt maliyetleri ve düşük yakıt tüketimleri, düşük bozulma oranları, yüksek efektif verimleri ve dayanıklılıkları dizel motorlarının önemli özellikleri arasında yer almaktadır [8].

Dizel motorlarının kullanımındaki artış, bu motorlarda kullanılacak alternatif yakıt çalışmalarını da hızlandırmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, bölgeden bölgeye değişen uygulamalar dikkat çekmektedir. Yapılan uygulamalarda, ülkelerin sahip olduğu enerji potansiyellerinin, teknolojik ve endüstriyel gelişmişliklerinin yakıt kullanımında son derece etkili olduğu görülmektedir. Dizel motorlarında kullanılacak alternatif yakıt çalışmalarında biyodizel, doğalgaz (sıkıştırılmış ya da sıvılaştırılmış biçimde), sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG),

hidrojen, alkol ve alkol türevi yakıt (metanol, etanol vb.) kullanımları ön plana çıkmaktadır [9].

Doğalgaz, sahip olduğu teknik özellikleri ve göreceli olarak ucuz fiyatı nedeniyle motorlarda kullanımı için son derece uygun bir yakıttır. Bu nedenle, önemli sayıda kullanıcının ilgisini çekeceği ve hızlı biçimde geniş kullanıma ulaşacağı beklenmektedir [10]. Doğalgazın hava kirliliğini azaltıcı etkileri, doğalgaz kaynaklarının yeterliliği ve petrole bağımlılığı azaltıcı etkisi motorlarda doğalgaz kullanımı için üç önemli etkidir. Doğalgazın diğer ülkelerdeki kullanımında, 1970'lerdeki petrol krizi etkili olmuştur. Yaşanan krizden sonra hükümetler dizel ve benzinli araçlarda kullanılmak üzere doğalgaza daha büyük önem vermişlerdir. Doğalgazın taşıtlarda kullanım alanı da oldukça geniştir. Binek otomobillerde, kamyonet ve kamyonlarda, tripotörlerde, otobüslerde, kargo gemilerinde, lokomotiflerde ve uçaklarda kullanım imkanı bulmuştur [11].

Dizel motorlarında doğalgaz kullanımının geliştirilmesiyle ilgili bilimsel çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmaların sonuçları literatürde de belirtilmektedir;

R. G. Papagiannakis ve ark. [12], çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz ve motorin kullanımının motor performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında motor performans karakteristikleri olarak silindir basıncı, toplam ısı yayımı, yanma süresi, özgül yakıt tüketimi, emisyon değerleri olarak NO_x , CO, HC ve is emisyonlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada deney motorunu 1500 ve 2500 sabit devirlerde %40 ve %80 yüklerde test etmişlerdir. Doğalgazın çift yakıt olarak kullanımı sonucunda silindir basıncı değerlerinde azalma ve özgül yakıt tüketimi değerleri ile yanma süresi ve toplam ısı yayımı değerlerinde artış tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra CO ve HC emisyonlarında artış, NO_x ve is emisyonlarında ise azalma belirlemişlerdir. Papagiannakis ve ark yaptıkları çalışmada, dizel yakıtına göre doğalgazın sahip olduğu yüksek ısı kapasitesinin, yanma periyodunda gaz sıcaklığını düşürdüğünü, bu etkinin tutuşma gecikmesini ve yanma süresini uzattığını belirtmişlerdir. Tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin uzaması neticesinde performans değerlerinde bir miktar düşüş gerçekleştiğini, yanmanın tam olarak tamamlanamaması nedeniyle

özellikle düşük yüklerde CO ve HC oranında artışların gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Tutuşma gecikmesi ve yavaş yanma nedeniyle yanmanın etkili bir şekilde gerçekleşmemesinin silindir içi sıcaklığını düşürücü bir etki gösterdiğini ve bu durumun NO_x emisyonlarında azalma meydana getirdiğini ifade etmişlerdir.

Mohamed ve ark. [13], çift yakıtlı bir dizel motoru üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarında gaz yakıt değişiminin ve pilot yakıt değişiminin basınç artış oranı, motor gücü, HC, CO ve vuruntu limiti üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında gaz yakıt olarak CNG ve LPG, pilot yakıt olarak motorin ve jajoba yağı metil esteri (JME) kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, çift yakıt uygulamasında jajoba metil esterinin kullanımı sonucu yanma özelliklerinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Çalışmada çift yakıt uygulaması ile elde edilen maksimum basınç artış oranının standart dizel motora göre arttığı, bu oluşumda en yüksek değerlerin sırasıyla dizel yakıtı-LPG, pilot dizel yakıtı-CNG, pilot JME yakıtı-LPG ve pilot JME yakıtı-CNG ile gerçekleştiği belirtilmiştir. Tüm deney yakıtlarıyla elde edilen motor gücü ve özgül yakıt tüketimi değerlerinin önemli bir değişim göstermediği, JME'nin pilot yakıt olarak kullanıldığı çift yakıt karışımlarıyla standart çift yakıt karışımlarına göre daha yüksek CO ve HC değerleri elde edildiği saptanmıştır. Bunun yanı sıra JME'li çift yakıt karışımlarında ortalama basınç artış oranının standart çalışma şartlarına göre daha azaldığı belirtilmiştir.

Papagiannakis ve ark. [14], tek silindirli çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında doğalgazın farklı oranlarda ve farklı yüklerdeki etkilerinin motor performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Motor performans karakteristikleri olarak; silindir basıncı, toplam ısı yayımı, tutuşma gecikmesi, özgül yakıt tüketimi değerleri, emisyon karakteristikleri olarak; is, NO, HC ve CO değerleri dikkate alınmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada CNG oranındaki artışa bağlı olarak silindir basıncında azalma, toplam ısı yayımında, tutuşma gecikmesi, yanma süresi ve özgül yakıt tüketiminde artış saptamışlardır. İS ve NO emisyonlarının CNG oranına bağlı olarak azaldığını, CO ve HC emisyonlarının ise arttığını belirlemişlerdir. Yük artışına bağlı olarak silindir basıncında, toplam ısı yayımında artış görülürken, tutuşma gecikmesi, yanma süresi ve özgül yakıt tüketiminde düşüş saptamışlardır. Motor yükün artışına

bağlı olarak is, HC ve CO değerlerinde azalma, NO emisyonlarında ise artış tespit etmişlerdir. Çalışmada CNG'nin sahip olduğu yüksek ısı kapasitesinin ve düşük şarj sıcaklığının önemli bir etken olduğunu tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin bu nedenle arttığını belirtmişlerdir. Yük artışına bağlı olarak gözlenen değişimlerde ise silindir içi sıcaklığında meydana gelen artışın etkili olduğu ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra silindir içi sıcaklıklarındaki artışın tutuşma gecikmesi ve yanma süresini iyileşmesinde etkili olduğunu vurgulamışlardır.

Nwafor [15] doğalgazlı çift yakıtlı bir dizel motorunda pilot yakıt değişiminin özgül yakıt tüketimi, efektif verim, tutuşma gecikmesi ve HC emisyonları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yaptığı çalışmada pilot yakıt olarak dizel yakıtı, kanola yağı (KY) ve kanola yağı metil esterini (KYME) kullanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmada KY'nin pilot yakıt olarak kullanıldığı deneylerde özgül yakıt tüketimi değerlerinin standart dizel yakıtına göre orta devirlerde bir miktar azalma eğilimi gösterdiği ve yüksek devirlerde bir miktar arttığı saptanmıştır. KY'nin pilot yakıt olarak kullanımı ile elde edilen efektif verim değerlerinin saf dizel yakıtına göre orta devirde çok az miktar artış gösterdiği, devir artışı ile birlikte bu artışın yükseldiği ifade edilmiştir. KYME'nin pilot yakıt olarak kullanıldığı deneylerde elde edilen özgül yakıt tüketimi değerlerinin düşük devirlerde saf dizel değerlerine eşdeğer eğilimde gerçekleştiği fakat devir artışı ile bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Pilot yakıt olarak KYME kullanımıyla elde edilen efektif verim değerlerinde ise saf dizel yakıtına göre benzer bir eğilim saptanmıştır. KY'nin pilot yakıt olarak kullanımı sonucu elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin saf dizele göre daha yüksek olduğu, ancak yüksek yüklere doğru bir miktar düşüş gerçekleştiği belirlenmiştir. Pilot KYME yakıtı ile elde edilen tutuşma gecikmesi değerlerinin ise saf dizel yakıtına göre orta devirlerde daha düşük olduğu, yüksek devirde benzer değerler gösterdiği saptanmıştır. HC emisyonlarında pilot KYME ile elde edilen değerlerin saf dizele göre orta devirlerde daha düşükken, yüksek devirde ve yüksek yüklere doğru bir miktar arttığı görülmüştür. KY'nin pilot yakıt olarak kullanıldığı çift yakıt karışımlarında saf dizele göre HC değerlerinin her iki devirde de arttığı belirlenmiştir.

Galal ve ark. [16] yaptıkları çalışmalarında çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının motor performans ve emisyon karakteristiklerindeki etkilerini

araştırmışlardır. Çalışmada özgül yakıt tüketimi, efektif verim, güç, ortalama efektif basınç, tutuşma gecikmesi, CO, CO₂, O₂ ve NO verileri değerlendirmişlerdir. Gerçekleştirilen deneyler sonucu optimum sıkıştırma oranı 16.5 olarak tespit edilmiştir. Bu koşulda çift yakıt kullanımının zengin karışım bölgelerinde ve yüksek yüklerde daha olumlu performans gösterdiği belirlenmiştir. Tutuşma gecikmesi periyodunun çift yakıt kullanımı ile artış gösterdiği, ancak artan yükte birlikte çift yakıt performansının iyileştiği, yüksek yüklerde özgül yakıt tüketimi ve efektif verim değerlerinin dizel yakıt değerlerine yakın değerlere ulaştığı ve yüksek yükte özgül yakıt tüketimi değerlerinin çift yakıt kullanımıyla azaldığı saptanmıştır. CO emisyonlarının artan yükte ve zenginleşen karışımla birlikte dizel değerlerine yaklaştığı belirlenmiştir. Ancak tüm yüklerde çift yakıt kullanımı ile CO değerlerinin artış gösterdiği saptanmıştır. Çift yakıt kullanımı ile elde edilen NO_x emisyonlarının düşük motor yüklerinde dizel yakıtından düşük olmasına rağmen, artan yükte birlikte dizel yakıtından daha yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir.

Papagiannakis ve ark. [17] çift yakıtlı dizel bir motor üzerinde, pilot yakıtı miktarı ve avans değişiminin özgül yakıt tüketimi, maksimum silindir basıncı, NO, CO ve is parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarını daha önceki çalışmalarında tespit ettikleri verilere dayanan teorik bir model kapsamında gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda, avans artışının ve pilot yakıt miktarındaki artışların standart çift yakıt kullanımına göre özgül yakıt tüketimini iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Yüksek yüklerde çift yakıt kullanımı ile elde edilen özgül yakıt tüketimi değerlerinin dizel yakıtına göre azaldığını saptamışlardır. Pilot yakıt miktarındaki ve pilot yakıt avansındaki artışın standart çift yakıt kullanımına göre maksimum yanma basıncını arttırdığını tespit etmişlerdir. Bu etki yüksek yüklerde, yüksek pilot yakıt oranı ve yüksek pilot yakıt avansında daha net bir şekilde gerçekleşmiştir. Yapılan çalışmada pilot yakıt miktarındaki ve pilot yakıt avansındaki artışın NO_x ve is emisyonlarının artmasına neden olurken, CO emisyonlarının azalmasını sağladığı belirlenmiştir.

Abd-Alla ve ark. [18] çift yakıtlı bir dizel motorda ana yakıt olarak doğalgazın ana bileşeni olan metan gazının ve sıvılaştırılmış petrol gazının ana bileşenlerinden olan propan gazının kullanımını incelemişlerdir. Metan gazı üzerinde gerçekleştirdikleri

çalışmalarında CO₂ ilavesi, N₂ ilavesi ve EGR uygulaması yöntemlerinin etkilerini araştırmışlardır. Yapılan uygulamalar sonucunda CO₂ ilavesindeki artışa bağlı olarak CO ve CO₂ emisyonlarının artış gösterdiğini, N₂ ilavesindeki artışa bağlı olarak O₂'nin arttığını ve NO_x emisyonlarının azaldığını belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen EGR uygulamasının standart çift yakıtta göre NO_x emisyonlarını düşürdüğünü fakat artan EGR oranının düşük EGR oranlı çift yakıt kullanımlarına göre NO_x emisyonlarında bir miktar artışa neden olduğunu saptamışlardır. EGR uygulamasının ve EGR oranındaki artışın standart çift yakıtta göre HC emisyonları üzerinde azalma sağladığı tespit edilmiştir.

Carlucci ve ark. [19] çift yakıt dönüşümü yapılmış tek silindri dizel bir motor üzerinde yaptıkları çalışmada, dizel yakıtı enjeksiyon basıncındaki, doğalgaz enjeksiyon basıncındaki ve pilot yakıt miktarındaki değişimlerin CO, NO_x, HC, PM ve ısı yayım oranı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler düşük devir-düşük yük ve yüksek devir-yüksek yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Düşük devir-düşük yük koşullarında; gaz yakıt miktarı artışına karşılık CO, NO_x ve HC emisyonlarının artış gösterdiği, PM emisyonlarının ise azaldığı tespit edilmiştir. Pilot yakıtı enjeksiyon basıncının artması ile CO emisyonlarının azaldığı, NO_x emisyonlarının artış gösterdiği, HC ve PM emisyonlarında ise önemli bir değişimin olmadığı ifade edilmiştir. Gaz yakıt basıncı artışının ise CO emisyonlarını arttırdığı diğer emisyon değerlerinde önemli bir değişikliğe yol açmadığı belirlenmiştir. Yüksek devir-yüksek yük deneylerinde gerçekleştirilen çalışmada, pilot yakıt miktarındaki artışa karşılık CO ve NO_x değerlerinin azaldığı, HC ve PM değerlerinde ise önemli bir değişikliğin olmadığını vurgulanmıştır. Yüksek devir ve yüksek yükteki pilot yakıt basıncı artışına bağlı olarak CO ve NO_x emisyonlarında artış, HC ve PM emisyonlarında benzer değerler saptanmıştır. Bu deney koşulunda gaz yakıt basıncındaki değişikliğin ise emisyon değerlerinde önemli bir farklılığa yol açmadığı ifade edilmiştir. Bunun yanı sıra gerçekleştirilen deneyler sonucu belirlenen ısı yayım oranı değişimlerinin belirgin bir farklılığa yol açmadığı belirtilmiştir.

Mohamed Selim [20] yaptığı çalışmada motor devri, motor yükü, püskürtme avansı ve pilot yakıt miktarı değerlerinin basınç artış oranına etkisini incelemiştir. Selim'in elde ettiği sonuçlara göre, motor devrindeki artış basınç artış oranını azaltmıştır.

Tüm yüklerde çift yakıt kullanımı ile elde edilen basınç artış oranı saf dizelden daha yüksek belirlenmiştir. Aynı hızlarda değişen yük basınç artış oranında önemli bir değişikliğe yol açmamıştır. Fakat belirli noktalarda çift yakıt kullanımıyla elde edilen basınç artış oranının saf dizelden daha yüksek olduğu görülmüştür. Maksimum basınç artış oranı saf dizel kullanımıyla ÜÖN'den önce, çift yakıt kullanımıyla ise ÜÖN'den sonra gerçekleşmiştir. Aynı hızlarda ve tüm yüklerde maksimum basınç artış oranı çift yakıt kullanımıyla saf dizele göre daha yüksek belirlenmiştir. Pilot yakıt avansındaki artış basınç artış oranını önce bir miktar azaltmış, ardından tekrar arttırmıştır. Pilot yakıt miktarındaki artışın ise maksimum basınç artış oranını arttırdığı belirlenmiştir.

Abd-Alla ve ark. [21] çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgazın ana bileşeni olan metan gazı kullanımında avans etkisinin HC, CO, NO_x ve efektif verim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Gerçekleştirilen çalışmada avans artışının efektif verimi iyileştirdiği belirlenmiştir. Bu durumun silindir içerisinde artan basınç ve sıcaklık değerlerinin etkisiyle meydana geldiği ifade edilmiştir. Avans artışı NO_x emisyonlarının artmasına CO ve HC emisyonlarının ise azaldığı belirlenmiştir. NO_x emisyonlarının artmasında artan silindir içi sıcaklık değerlerinin, CO ve HC emisyonlarının azalmasında ise iyileşen yanma oluşumunun etkili olduğu belirtilmiştir.

Pirouzpanah ve ark. [22] doğalgazlı ve çift yakıtlı bir dizel motorunda EGR uygulamasının motor performans ve emisyon karakteristiklerinde meydana getirdiği etkileri hazırladıkları model kapsamında araştırmışlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada çift yakıt kullanımı sonucu efektif verimin azaldığı, CO ve HC emisyonlarının ise arttığı ifade edilmiştir. EGR uygulamasının efektif verim üzerinde önemli bir etki meydana getirmediğini, tutuşma gecikmesi periyodunu kısalttığını ancak termal etkinin bu periyotta önemli bir katkı sağlamadığı belirtilmiştir. Bunun yanı sıra EGR oranındaki artışın CO emisyonlarında azalma sağladığı ancak NO_x emisyonlarını arttırdığı ifade edilmiştir.

Ergeneman ve ark. [23] çift yakıt dönüşümü gerçekleştirilmiş dizel motorlu İkarus marka bir otobüs üzerinde yakıt tüketimi ve emisyon değerlerindeki değişimi

araştırmışlardır. Laboratuvar koşullarında gerçekleştirdikleri deney sonuçlarını saf dizel yakıtlı çalışma şartlarına göre karşılaştırarak sunmuşlardır. Çalışmalarının neticesinde çift yakıt kullanımı ile PM emisyonlarında önemli oranda, CO emisyonlarında ise küçük oranlarda azalma, NO_x ve HC emisyonlarında ise artış belirlemişlerdir. NO_x emisyonlarındaki artışın geç enjeksiyon nedeniyle gerçekleşmiş olduğunu ve bu artışın püskürtme avansı ile bertaraf edilebileceğini, HC artışının ise yanmamış metan gazından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yakıt tüketimi üzerinde yaptıkları değerlendirme sonucunda çift yakıt kullanımı ile yaklaşık %10'luk bir azalma tespit etmişlerdir. Bu tüketimi değerindeki azalmanın %30 oranında daha düşük maliyet sağladığını belirlemişlerdir.

Mohamed Y.E. Selim [24], çift yakıt dönüşümü yapılmış tek silindirli Ricardo E6 marka bir dizel motorunda farklı gaz yakıtların (metan, CNG, LPG) meydana getirdiği değişimleri incelemiştir. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en yüksek motor gücü ve efektif verim değerlerinin sırasıyla metan, CNG ve LPG ile sağlandığı belirlenmiştir. İncelenen vuruş sınırları doğrultusunda en yüksek vuruş kabiliyeti metan gazıyla, en düşük vuruş sınırı LPG ile karşılanmıştır. Gaz yakıt miktarının artmasıyla birlikte tüm yakıtlarda maksimum basınç artış oranı değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek basınç artış oranının LPG ile en düşük basınç artış oranının ise CNG ve metan gazlarıyla elde edildiği saptanmıştır. Avans artışının tüm yakıtlarda motor torkunu ve efektif verimi azalttığı, maksimum basınç artış oranı ve maksimum basıncı ise arttırdığı belirlenmiştir.

Cohen [25] çalışmasında daha önce üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş, konvansiyonel, emisyon kontrollü konvansiyonel ve doğalgazlı motorlardan oluşan yedi farklı araştırma bulgularının karşılaştırılmasını yapmıştır. Elde ettiği bulguları emisyon ve maliyet değerleri açısından karşılaştırmıştır. Çalışmada doğalgaz kullanımı sonucu SO₂ emisyonlarının oluşmaması ve NO_x emisyonlarının diğer motor tiplerine göre daha düşük değerlerde meydana gelmesini vurgulamıştır. Bunun yanı sıra elde edilen emisyonlara bağlı olarak hesaplanan tahmini yaşam kalitesinin CNG yakıtı kullanılan otobüslerde daha elverişli sonuçlar sağladığı da ifade edilmiştir.

Anyogita ve ark. [26] kent ulaşımında yaşanan gürültü sorununa yönelik yaptıkları araştırmada, kentsel ulaşım araçları arasında yer alan 30'a yakın sayıdaki otobüs, minibüs, triportör ve taksilerden meydana gelen gürültü değerlerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma neticesinde benzinli ve dizel araçlara göre CNG'nin yakıt olarak kullanıldığı araçlarda gürültü seviyelerinin daha düşük değerlerde oluştuğunu vurgulamışlardır.

Papagiannakis ve ark. [27], çift yakıtlı bir dizel motorda gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada doğalgaz kullanımının efektif verim ve emisyon değerleri üzerindeki değişimlerini araştırmışlardır. Yapılan deneyler sonucu elde edilen bulgulara göre doğalgaz kullanımının saf dizel yakıtı kullanımına göre NO ve is emisyonlarının azaltılmasında önemli bir rol oynadığı ifade edilmiştir. Efektif verim değerlerinin doğalgaz kullanımıyla azaldığı, CO ve HC emisyonlarının ise önemli oranda artış gösterdiği belirlenmiştir. Yaşanan sorunların özellikle düşük motor yüklerinde gerçekleştiği, artan motor yüküyle birlikte CO ve HC emisyonlarındaki artışın azaldığı saptanmıştır.

Papagiannakis ve ark. [28] çift yakıtlı bir dizel motor üzerinde giriş havası sıcaklığı değişiminin ve doğalgaz oranındaki değişimin motor performans ve emisyonlarına etkisini daha önceden yapılan deneysel çalışmalara bağlı olarak oluşturdukları model kapsamında incelenmişlerdir. Pilot yakıt miktarındaki ve giriş havası sıcaklığındaki artış özgül yakıt tüketiminin standart çift yakıt kullanımına göre azalmasına neden olmuştur. Bunun yanı sıra giriş havası sıcaklığındaki ve pilot yakıt miktarındaki artış yüksek yüklerde elde edilen özgül yakıt tüketimi değerlerini saf dizel yakıtının da altına düşürmüştür. Pilot yakıt miktarının ve giriş havası sıcaklığının artışı standart çift yakıt kullanımına göre CO emisyonlarının azalmasını sağlamıştır. Ancak elde edilen değerler saf dizel yakıtına göre daha yüksek belirlenmiştir. Bunun yanı sıra giriş havası sıcaklığı ve pilot yakıt miktarının artmasıyla NO emisyonlarının artış gösterdiği, is emisyonlarının ise azaldığı belirlenmiştir.

Midkiff ve ark. [29], çift yakıt dönüşümü gerçekleştirdikleri tek silindirli bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Tam yük ve kısmi yük şartlarında gerçekleştirdikleri çalışmalarında efektif verim, özgül yakıt tüketimi

değerleri ile birlikte NO, CO, is ve PM emisyonlarını incelemişlerdir. Doğalgazın alternatif yakıt olarak kullanıldığı çift yakıt karışımlarında efektif verim ve özgül yakıt tüketimi değerlerinin kısmi yük şartlarında dizel yakıtına göre azalırken tam yük şartlarında düşük bir miktar iyileştiğini tespit etmişlerdir. Tüm yük şartlarında CO emisyonlarının yükseldiğini is ve PM emisyonlarının azaldığını belirlemişlerdir. NO emisyonlarında ise yüksek yüklerde çift yakıt kullanımı ile artış, düşük yüklerde ise azalma saptamışlardır.

Daisho ve ark. [30], Isuzu marka, çift yakıtlı doğalgazlı bir dizel motorunda doğalgazın ve farklı sıcaklıklarda EGR uygulamasının etkilerini araştırmışlardır. Çalışmalarında düşük yüklerdeki EGR uygulamasının NO_x ve HC emisyonlarını azalttığı, efektif verim değerlerini ise arttırdığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra EGR uygulamasının PM emisyonlarını arttırdığını ancak bu değerlerin dizel yakıtı değerlerinden daha düşük değerler gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca, daha düşük sıcaklıktaki EGR uygulamasıyla elde edilen değerlerin sıcak EGR uygulamasına göre değişkenlik gösterdiğini, NO_x ve HC değerlerinin azaltılmasında, efektif verimin artırılmasında ve TG süresinin azaltılmasında sıcak EGR uygulamasının daha etkili olduğu ifade etmişlerdir.

Fritz ve ark. [31], çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmalarında doğalgaz kullanımı sonucu dizel yakıtına göre HC emisyonlarının 30-50 kat ve CO emisyonlarının 5-7 kat arasında, yakıt tüketiminin ise %25 oranında artış gösterdiğini, NO_x emisyonlarının %30 ve PM emisyonlarının %50 oranında azaldığını saptamışlardır.

Albayrak ve ark. [32], çift yakıt dönüşümü gerçekleştirilmiş MAN 590 marka otobüse ait dizel motorunda doğalgaz kullanımının motor performans parametrelerine ve egzoz emisyonlarına etkilerini araştırmışlardır. Tam yük ve kısmi yük şartlarında gerçekleştirdikleri çalışmalarında doğalgaz kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin 1/4–3/4 yük aralığında motorine göre arttığını, tam yük şartlarında ise düşük devirlerde benzer değerler gösterirken artan yüklerle birlikte bir miktar iyileştiğini, efektif verim değerlerinin 1/4–3/4 yük aralığında motorine göre azaldığı ve tam yük şartlarında iyileştiği belirlenmiştir. Egzoz emisyonlarında ise doğalgaz

kullanımıyla HC ve CO emisyonlarının önemli oranda arttığı, NO_x emisyonlarının ise 1/4–3/4 yük aralığında motorine göre azalırken tam yük şartlarında artış gösterdiği saptanmıştır.

Bu çalışmada, doğalgazın çift yakıt yöntemiyle bir dizel motorunda kullanımı ve bunun sonucunda ortaya çıkan olumsuzlukların iyileştirilmesine yönelik uygulanmaların gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Dizel motorunda çift yakıt yöntemiyle doğalgaz kullanımının, motor performans karakteristiklerinde ve egzoz emisyonlarında meydana getirdiği etkiler incelenmiştir. Bunun sonucunda, doğalgaz kullanımından kaynaklanan sorunlu çalışma bölgeleri belirlenerek, meydana gelen olumsuzlukların giderilmesine yönelik olarak farklı pilot yakıt kullanımı ve katkı maddesi uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışma, dört aşamadan oluşmaktadır. Çalışmanın birinci aşamasında, tek silindirli bir dizel motoruna çift yakıt sistemi uygulanmış ve dizel motoru çift yakıt motoruna dönüştürülmüştür. Yapılan dönüşüm ile dizel motorunun istenildiği zaman çift yakıtla (pilot yakıt + doğalgaz), istenildiği zaman tek yakıtla (motorin) çalıştırılabilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, deney düzeneği oluşturulmuş ve motorin kullanımının yanı sıra, çift yakıt olarak doğalgaz-motorin kullanımı (standart çift yakıt) ile ilgili tam yük ve kısmi yük deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonucunda, çift yakıt yöntemiyle doğalgaz kullanımından kaynaklanan olumsuzlukların meydana geldiği çalışma koşulları saptanmıştır.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, çift yakıt yöntemiyle, doğalgaz kullanımından kaynaklanan olumsuzlukların iyileştirilmesine yönelik, motorin yerine pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve doğalgaza fumigasyon yöntemiyle diglyme (DGM) katkısı uygulamaları ile ilgili deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, yapılan tüm deneylerden elde edilen veriler, karşılaştırmalı olarak grafikler yardımıyla sunulmuştur. Ayrıca, veriler Ki Kare Testi'ne tabi tutularak değerlendirilmiştir. Deney değişkenlerinin birbirleri ile

etkileşimleri, deney değişkenlerinin motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki değişimleri ve güven aralıklarının belirlenebilmesi için varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır. Deney değişkenlerinin etkinlik düzeylerinin belirlenebilmesi için ise sinyal/gürültü (S/N) oranları belirlenmiştir. Grafiklerle sunulan tüm veriler, ANOVA ve S/N sonuçları da göz önüne alınarak kapsamlı olarak yorumlanmıştır.

BÖLÜM 2. ENERJİ İHTİYACI

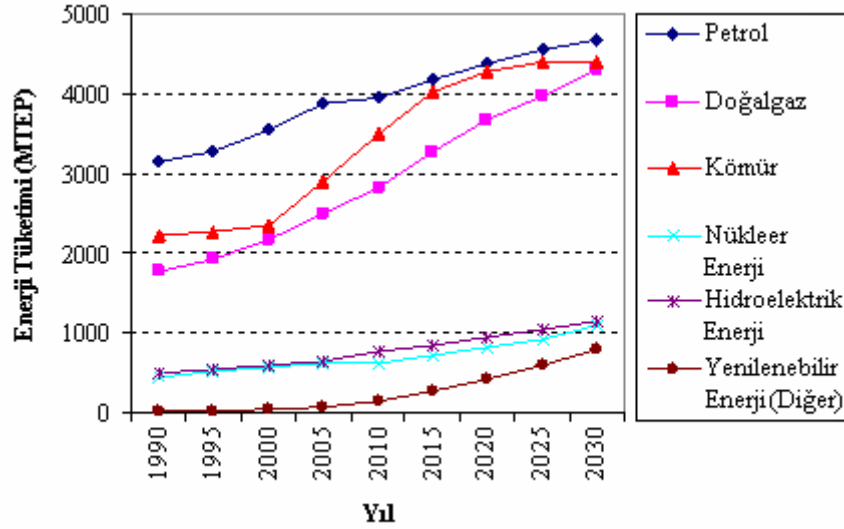
Enerji ihtiyacının karşılanması ve enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, ülkeler açısından son derece önemlidir. Enerji, ülkelerin kalkınma politikalarında stratejik bir unsurdur. Ancak artan nüfus, şehirleşme sorunları, küresel ısınma ve iklim değişiklikleri gibi çevresel sorunlar nedeniyle arz ve talep dengesi bozulmuştur. Bu durum, önemli gündemler oluşturarak ülkeleri ve yönetimleri ciddi politikalar üretmeye zorlamaktadır [33]. Enerji; sosyal, ekonomik ve teknolojik gelişmenin sağlanmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, üretim, işgücü ve sermaye oluşumunda etkilidir. Enerjinin hayatımızda bu derece etkin kullanımı enerji ihtiyacının da artmasına neden olmaktadır. Yapılan çalışmalarda, enerji ihtiyacının giderek artış gösterdiği ve bu ihtiyacın artarak devam edeceği öngörülmektedir [34].

2.1. Dünyada Enerji

Uluslararası Enerji Ajansı (UEA) tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, dünya birincil enerji talebinin 2008–2035 yılları arasında %36 oranında artacağı ifade edilmektedir. UEA'nın yaptığı araştırmalara bağlı olarak gerçekleştirilen senaryolar doğrultusunda, yıllık ortalama %1.2 düzeyinde talep artışının meydana geleceği açıklanmıştır. Bu bilgiler ışığında, enerji talebinin 2008 yılındaki 12.3 milyar ton eşdeğer petrol (GTEP) seviyesinden 2035 yılında 16.7 GTEP seviyesine ulaşması beklenmektedir [35].

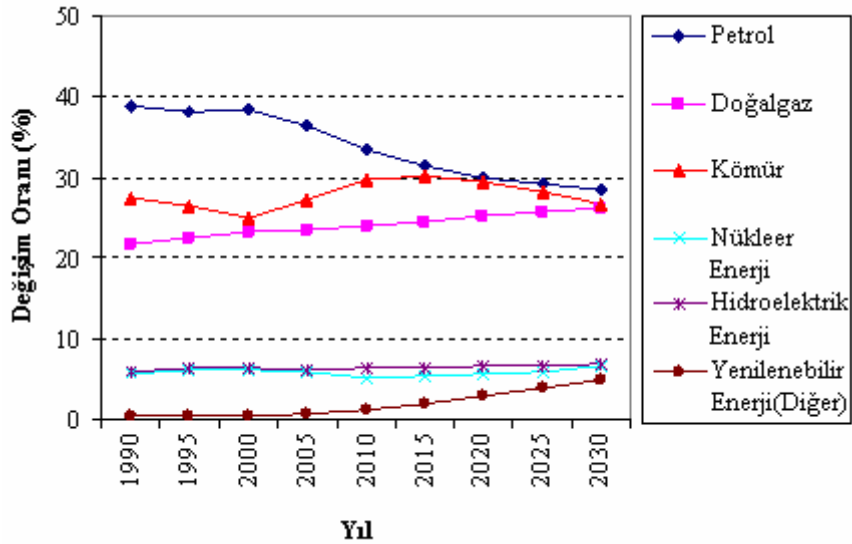
Şekil 2.1'de BP istatistik raporlarına göre hazırlanan dünya birincil enerji tüketimi değerlerinin 1990-2030 yılları senaryosu görülmektedir. Bu verilere göre, enerji tüketiminin sürekli artış gösterdiği anlaşılmaktadır. En yüksek enerji tüketiminin petrol, kömür ve doğalgaz ile gerçekleşeceği tahmin edilmektedir. Ancak hidroelektrik enerji, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji (hidroelektrik enerji dışında

kalan) kaynaklarının da enerji tüketiminde önemli bir yer alacağı öngörülmektedir [36].



Şekil 2.1. Dünya birincil enerji kaynaklarının 1990-2030 yılı projeksiyonu [36]

Şekil 2.2’de, gerçekleştirilen projeksiyona göre, dünyadaki birincil enerji türlerinin toplam enerji tüketimindeki oransal dağılımı görülmektedir.

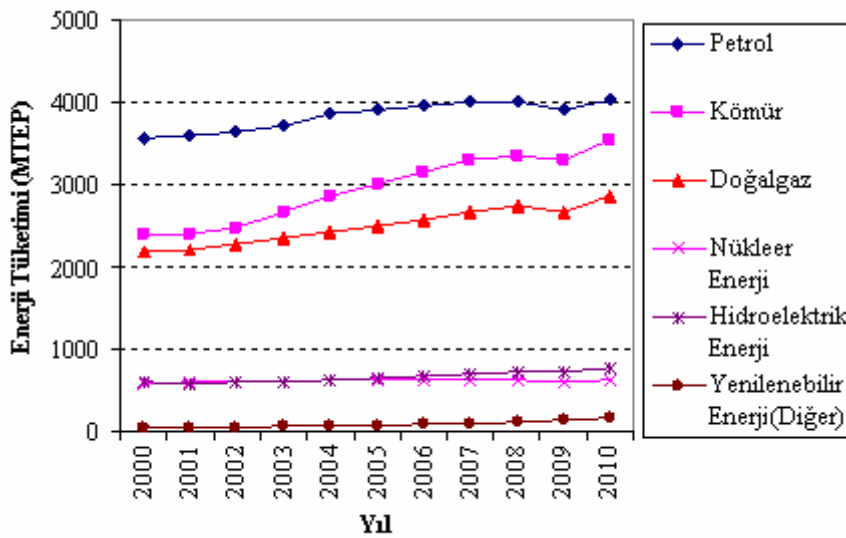


Şekil 2.2. Birincil enerji kaynaklarının toplam enerji tüketimindeki kullanım oranları projeksiyonu [36]

Bu projeksiyona göre, toplam enerji tüketimindeki petrol ve kömür kullanım oranının ileriki yıllarda azalacağı; doğalgaz, nükleer enerji, hidroelektrik enerjisi ve

yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında ise artışların gerçekleşeceği anlaşılmaktadır. Ayrıca ileriki yıllarda doğalgaz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında gerçekleşeceği öngörülen artış dikkat çekmektedir [36].

2000 ve 2010 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi sırasıyla petrol, kömür, doğalgaz, hidroelektrik enerjisi, nükleer enerji ve yenilenebilir enerji kaynakları ile sağlanmıştır. Şekil 2.3'te 2000–2010 yılları arasındaki dünya enerji tüketiminin kaynaklara göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.3. 2000-2010 yılları arasındaki dünya enerji tüketimi dağılımı [37]

2000–2010 yılları arasındaki enerji tüketim değerleri dikkate alındığında, tüm kaynaklar arasında ihtiyaç duyulan enerjinin önemli bölümü sırasıyla petrol, kömür ve doğalgaz tüketimleri ile karşılanmıştır. 2000 yılındaki enerji tüketimi verilerine göre, tüm enerji kaynakları arasında petrol tüketimi %38.1'lik payla ilk sırada yer almıştır. Petrolü %25.6 oranla kömür tüketimi ve %23.2 oranla doğalgaz tüketimi izlemiştir. 2010 yılı verileri incelendiğinde ise 2000 yılına göre petrol tüketiminde %11.84 oranında bir düşüş gerçekleşmiş ve petrol tüketimi tüm enerji kaynakları arasında %33.6 tüketim oranına sahip olmuştur. 2000 yılı verilerine göre, 2010 yılında kömür ve doğalgaz tüketimleri artış göstererek sırasıyla %29.6 ve %23.8 tüketim oranlarına ulaşmıştır. Geriye kalan enerji tüketimi ise yenilenebilir enerji, nükleer enerji ve hidroelektrik enerji kaynaklarının kullanımıyla gerçekleşmiştir.

Tüm enerji kaynakları arasında 2000 ve 2010 yılları arasındaki en belirgin tüketim artışı %136 oranında yenilenebilir enerji kaynaklarında görülmüştür [37].

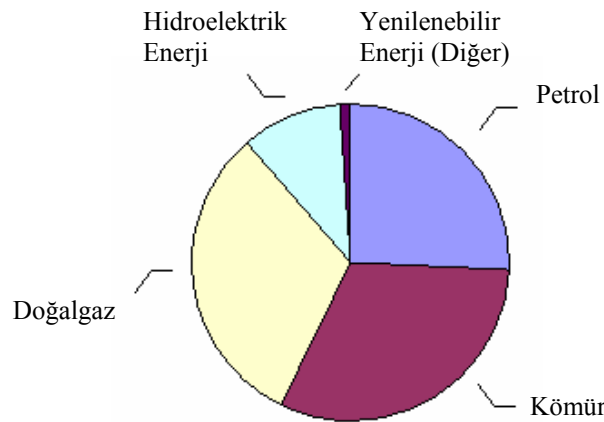
Günümüzdeki tüketimi geçmiş yıllara göre azalsa da, tüm enerji kaynakları arasında en çok kullanılan enerji kaynağı petroldür. 2010 yılı sonu verilerine göre ispatlanmış petrol rezervi 188.8 milyar ton'dur ve bu rezervin yaklaşık %54'lük payı orta doğu ülkelerinden sağlanmaktadır [37].

2.2. Türkiye'de Enerji

Ülkemizde enerji tüketimi giderek artan bir eğilime sahiptir. 2000 yılında 76.7 milyon ton petrol eşdeğerinde (MTEP) olan birincil enerji tüketimi değerleri 2010 yılında 110.9 MTEP değerlerine ulaşarak %69.16 oranında artmıştır (Tablo 2.1). Fosil yakıt kaynaklarının yoğun olarak kullanıldığı ülkemizde, 2010 yılındaki fosil yakıt kullanım oranı %98'ken, %2 oranındaki kalan kısım hidroelektrik enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynakları tarafından karşılanmıştır. Şekil 2.4'te Türkiye birincil enerji kaynakları görülmektedir [37].

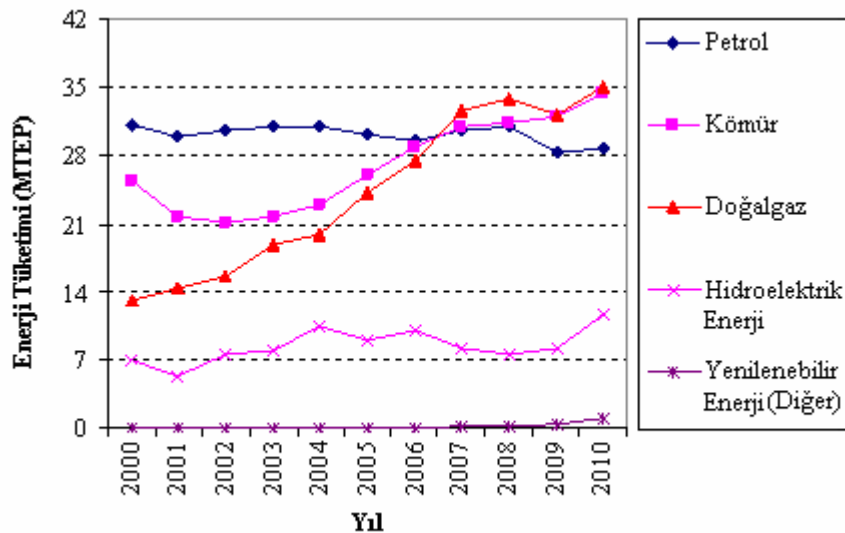
Tablo 2.1. 2000-2010 yılları arasında Türkiye birincil enerji tüketimi değerleri (MTEP) [37]

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Birincil Enerji Tüketimi	76.7	71.6	75.2	79.7	84.4	89.5	95.8	102.2	103.8	101	110.9



Şekil 2.4. Türkiye birincil enerji kaynakları dağılımı [37]

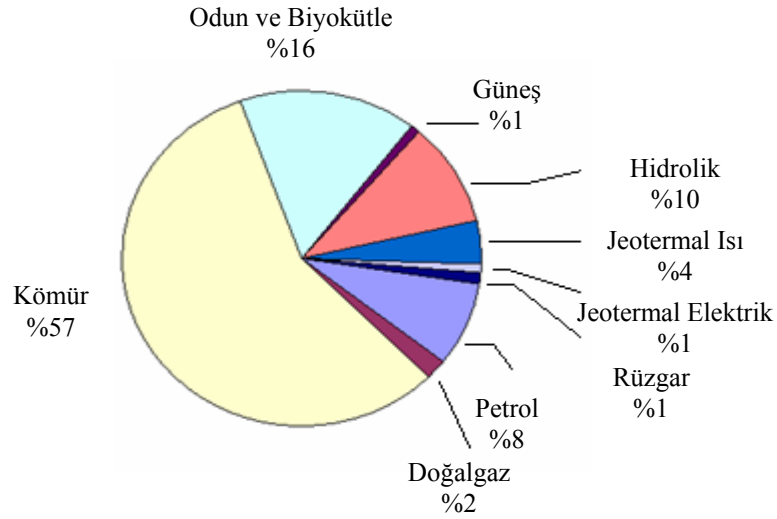
Şekil 2.5'te 2000-2010 yılları arasında Türkiye'deki enerji tüketiminin enerji kaynaklarına göre dağılımı görülmektedir. Petrol, kömür ve doğalgaz tüketimleri Türkiye'deki enerji dağılımında en önemli paya sahiptir. 2006 yılına kadar petrol tüketimi en üst seviyede iken, 2006 yılından sonra doğalgaz kullanımı artış göstererek petrol tüketiminin üzerine çıkmıştır. 2000 yılındaki enerji tüketiminin %40.49'unu petrol tüketimi, %33.20'sini (25.5 MTEP) kömür tüketimi, %17.06'sını (13.1 MTEP) doğalgaz tüketimi oluşturmuştur. Geriye kalan %9.24'lük enerji tüketimi ise hidroelektrik enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarıyla sağlanmıştır. 2010 yılındaki petrol tüketimi 2000 yılına göre %7.72 oranında azalarak 28.7 tona düşmüştür. 2010 yılındaki petrol tüketimi toplam enerji tüketiminin %25.88'ini karşılamıştır. 2000 yılındaki verilere göre kömür, doğalgaz, hidroelektrik enerjisi ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarındaki tüketim değerleri artmıştır. Bu verilere göre, 2010 yılındaki kömür tüketimi %34.90 artarak, 25.5 MTEP değerlerine ulaşmıştır. En belirgin artışlar doğalgaz tüketimi ve yenilenebilir enerji tüketiminde gerçekleşmiştir. 2000 yılındaki değerlere göre doğalgaz tüketimi %167.94 artarak 35.1 MTEP değerlerine, yenilenebilir enerji tüketimi ise %900 artarak 1 MTEP değerlerine ulaşmıştır. Hidroelektrik enerji tüketiminde ise %67.14 oranında artış gerçekleşmiştir [37].



Şekil 2.5. 2000-2010 yılları arasındaki Türkiye enerji tüketimi dağılımı [37]

Şekil 2.6'da, Türkiye 2009 yılı birincil enerji üretimi, enerji türleri ve oransal değişimleri ile birlikte sunulmuştur. Enerji üretimi içerisinde %67'lik oranda fosil

yakıtlar, %43 oranında ise yenilenebilir enerji kaynakları yer almıştır. Türkiye yenilenebilir enerji kaynakları arasında en büyük pay odun, biyokütle ve biyoyakıt üretimi tarafından sağlanmıştır [38].



Şekil 2.6. Türkiye birincil enerji üretimi (%) – 2009 [38]

Türkiye enerji ihtiyacının karşılanmasında dışa bağımlı bir konumda yer almaktadır. 2009 yılı verilerine göre enerji tüketiminin 30.40 MTEP'inin yerel üretimden karşılandığı anlaşılmaktadır. Bu durum Türkiye enerji tüketiminin %72.4'ünün ithal edildiğinin bir göstergesi olarak ortaya çıkmaktadır [38].

BÖLÜM 3. ALTERNATİF YAKIT GEREKSİNİMİ VE DİZEL MOTORLARINDA KULLANILAN ALTERNATİF YAKITLAR

3.1. Alternatif Yakıt Gereksinimi

Dünya, fosil yakıtların tükenmesi ve çevresel kirlenme gibi birbiriyle ilişkili iki önemli sorunla karşı karşıyadır. Günümüzde aşırı derecede kullanılan fosil yakıtlar yerel, bölgesel ve global ölçekte çevreye zarar vermektedir. Yerel anlamda hava kirlenmesi, bölgesel anlamda asit yağmurlarının oluşumu ve havadaki patojenler (enfeksiyonlar, parçacıklar ve çeşitli kimyasallar), global anlamda ise sera gazı etkisi çevreye zararlı olan bu etkiler arasında yer almaktadır [39].

Alternatif yakıt çalışmalarının iki önemli nedeni bulunmaktadır. Birincisi yakıt kaynaklarının hızla azalması ve artan petrol fiyatları, diğeri ise bu yakıtları kullanan içten yanmalı motorlardan kaynaklanan zararlı egzoz emisyonlarının azaltılma gereksinimidir [40]. İçten yanmalı motorlarda kullanılan alternatif yakıtlarla ilgili çalışmalar özellikle 1970'lerden sonra artış göstermiştir [41]. Enerji kaynaklarının büyük ölçüde petrole bağımlı olması nedeniyle, 1973 yılında yaşanan krizle birlikte, ülkeler önemli bir çıkmaza doğru sürüklenmiş ve tüm dünya bu krizden etkilenmiştir. Petrol İhraç Eden Arap Ülkeleri Birliği'nin (OAPEC) petrol üretimi ve satışında diğerk ülkelere uyguladığı ambargo nedeniyle meydana gelen bu kriz, diğerk ülkeleri sonraki yıllarda yaşanabilecek benzer sorunlara karşı önlemler almaya itmiştir.

3.1.1. Emisyon sınırlamaları

Petrol temininde yaşanan sorunların ve petrol kaynaklı yakıtların kullanımı sonucunda meydana gelen çevre kirliliğinin azaltılması hususunda, ülkelerin ve

hükümetlerin ortaklaşa ya da yerel olarak aldıkları çeşitli tedbirler bulunmaktadır. Bu tedbirler arasında, yasal yönetmelikler ve emisyon sınırlamaları dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, alternatif yakıt çalışmaları için hükümetlerin verdiği teşvikler de önemli bir yere sahiptir.

Hava kirliliği ve emisyon sınırlamaları ile ilgili, Kyoto Protokolü ve bölgesel emisyon standartları etkin uygulamalar arasında görülmektedir. Kyoto Protokolü, küresel ısınma ve iklim değişikliği konusunda mücadeleyi sağlamaya yönelik uluslararası bir çerçevedir. Tüm kirleticileri kapsamamasına rağmen anlaşmaya imza atan ülkeleri sera gazı etkisine sahip gaz salınımlarını azaltmaları yönünde zorlayan bir yönetmeliği oluşturmaktadır. Bu protokol, çevre ve kirlilik etkilerinin önemszenmesi ve yasal bir düzenleme oluşumu açısından önemli bir örnektir. Taşıt kaynaklı hava kirliliğinin önlenmesi açısından önemli bir yasal düzenleme olan Euro Standartları, taşıtlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarını sınırlandırmaktadır. Alınan kararlardaki emisyon değerlerine bağlı olarak, Avrupa Birliği üyesi ülkelerin ilgili zaman dilimleri içerisinde bu standartları sağlama zorunluluğu bulunmaktadır. Tablo 3.1’de ağır hizmet tipi araçlar için, Tablo 3.2’de ise binek araçlar için uygulanan Euro standartları yer almaktadır. Günümüzdeki taşıtların Euro V değerlerini taşıması gerekmektedir. 2008 yılında uygulanmaya başlanan Euro V standartlarında, bir önceki standarda göre en belirgin değişimin NO_x emisyonlarında gerçekleştirildiği görülmektedir. 2005 yılında yürürlüğe giren Euro IV standardına göre Euro V standardında, NO_x’in yaklaşık olarak %43 azaltılması zorunlu kılınmıştır. 2008 yılında resmi tasarısı gerçekleşen ve 2013 yılında tüm araçlara uygulanması zorunlu hale getirilen Euro VI standardı ise, Euro V’e göre HC emisyonlarında %71, NO_x emisyonlarında %80 ve PM emisyonlarında %58 oranlarında azalma zorunluluğunu gerektirmektedir [42].

AB üyesi ve AB adayı ülkeler haricinde, kendi yasal düzenlemelerini getiren ve belirli standartlar hazırlayan ülkeler de bulunmaktadır. Bunlar arasında en bilinenleri Amerika ve Japonya tarafından uygulanan emisyon standartlarıdır. Amerika’da uygulanan standartlar arasında, FTP (Federal Test Prosedure), HWFET (Highway Fuel Economy Test Driving Schedule), CU (California United), NYCC (New York City Cycle) sürüş çevrimleri kapsamında uygulanan EPA Tier II, LEV II standartları

yer almaktadır. Japonya’da ise JC08, JE05, 13 mode ve 6 mode’luk sürüş çevrimleri ile gerçekleştirilen, en düşük ve en yüksek değerlerle belirlenen standartlar bulunmaktadır [42].

Tablo 3.1. Ağır hizmet tipi araçlar için Euro Standartları [43]

	Tarih	Test Çevrimi	CO (g/kWh)	HC) (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PM (g/kWh)	İs (m ⁻¹)	
Euro I	1992<85 kW	ECE R-49	4.5	1.1	8.0	0.612	-	
	1992>85 kW		4.5	1.1	8.0	0.36	-	
Euro II	1996.10		4.0	1.1	7.0	0.25	-	
	1998.10		4.0	1.1	7.0	0.15	-	
Euro III	2000.10		ESC&ELR	2.1	0.66	5.0	0.10 0.13*	0.8
Euro IV	2005.10			1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Euro V	2008.10	1.5		0.46	2.0	0.02	0.5	
Euro VI¹	2013.01 ²	1.5		0.13	0.4	0.01	-	
Euro III	2000.10	ETC	5.45	0.78 ³	5.0	0.16 0.21*	-	
Euro IV	2005.10		4.0	0.55 ³	3.5	0.03	-	
Euro V	2008.10		4.0	0.55 ³	2.0	0.03	-	
Euro VI¹	2013.01 ²		4.0	0.16	0.4	0.01	-	

* Silindir hacmi 0.75 lt’den düşük ve en yüksek güç hızı >3000 d/d olan araçlar için
¹ Resmi tasarı 16/12/2008 ² Tüm modeller için 2014.10 ³ Metan içermeyen hidrokarbonlar (NMHC)

Tablo 3.2. Binek araçlar için Euro Standartları [43]

		Tarih	CO	HC + NO _x	NO _x	PM
M ₁ *	Euro 1	1992.07	2.72	0.97	-	0.14
	Euro 2, IDI	1996.01	1.00	0.70	-	0.08
	Euro2, DI	1996.01 ^a	1.00	0.90	-	0.10
	Euro 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05
	Euro 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025
	Euro 5	2009.09 ^b	0.50	0.23	0.18	0.005 ^c
	Euro 6	2014.09	0.50	0.17	0.08	0.005 ^c
N ₁ , Sınıf I <1305 kg**	Euro 1	1994.10	2.72	0.97	-	0.14
	Euro 2, IDI	1998.01	1.00	0.70	-	0.08
	Euro2, DI	1998.01 ^a	1.00	0.90	-	0.10
	Euro 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05
	Euro 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025
	Euro 5	2009.09 ^b	0.50	0.23	0.18	0.005 ^c
	Euro 6	2014.09	0.50	0.17	0.08	0.005 ^c

Tablo 3.2. Binek araçlar için Euro Standartları (devamı) [43]

N ₁ , Sınıf II 1305-1760 kg**	Euro 1	1994.10	5.17	1.40	-	0.19
	Euro 2, IDI	1998.01	1.25	1.00	-	0.12
	Euro2. DI	1998.01 ^a	1.25	1.30	-	0.14
	Euro 3	2001.01	0.80	0.72	0.65	0.07
	Euro 4	2006.01	0.63	0.39	0.33	0.04
	Euro 5	2010.09 ^d	0.63	0.295	0.235	0.005 ^c
	Euro 6	2015.09	0.63	0.195	0.105	0.005 ^c
N ₂ , Sınıf III >1760 kg**	Euro 1	1994.10	6.90	1.70	-	0.25
	Euro 2, IDI	1998.01	1.50	1.20	-	0.17
	Euro2. DI	1998.01 ^a	1.50	1.60	-	0.20
	Euro 3	2001.01	0.95	0.86	0.78	0.10
	Euro 4	2006.01	0.74	0.46	0.39	0.06
	Euro 5	2010.09 ^d	0.74	0.35	0.28	0.005 ^c
	Euro 6	2015.09	0.74	0.215	0.125	0.005 ^c
* Euro 1-4 basamaklarında, yolcu araçları>2500 kg N1 araçları olarak uygun bulunan çeşitler						
** Euro 1,2:Sınıf ≤1250 kg, Sınıf II 1250-1700 kg, Sınıf III>1700kg için N1 ref. sınıfında						
^a 1999.09.30'a kadar (bu tarihten sonra DI motorları IDI sınırlarına ulaşacak)						
^b Tüm modeller için 2011.01						
^c Kullanılan PMP prosedürü 0.003 g/km ye değiştirilmesi önerilecek						
^d Tüm modeller için 2012.01						

Taşıt kaynaklı kirliliğin temelini oluşturan egzoz emisyonlarının azaltılması için çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmektedir. Bunlar yanma esnasında alınan önlemler, yanma sonrası önlemler ve yanma öncesi önlemler olarak üç biçimde incelenebilmektedir. Yanma esnasında alınan önlemler yanmanın iyileştirilmesi için uygulanan ve motor aksamında gerçekleştirilen uygulamaları içermektedir. Bu önlemler arasında farklı yanma odası şekillerinin kullanılması, egzoz gazı resirkülasyonu (EGR) kullanımı, motor parametrelerinin değiştirilmesi (avans, püskürtme basıncı vb.) gibi uygulamalar yer almaktadır. Yanma sonrası önlemler, yanma oluşumundan sonraki aşamada, yanma ile engellenemeyen kirliticileri azaltmak için uygulanan yöntemleri kapsamaktadır. Katalitik konvertörlerin ve partikül filtrelerinin kullanımı gibi uygulamalar yanma sonrası önlemler arasında yer almaktadır. Emisyonların azaltılması hususunda alınan önlemlerden bir diğeri ise, yanma öncesinde gerçekleştirilen uygulamalardır. Bu uygulamalar, kullanılan yakıt bileşimlerinin hazırlanmasıyla ilgili çalışmaları kapsamaktadır. Alternatif yakıtların doğrudan ya da katkı yakıtı olarak kullanılması gibi uygulamalar bu kapsamda yer alan çalışmalardır [44].

3.1.2. Motorlu taşıt kullanımı

Motorlu taşıtları ulaşım biçimine, kullanılan yakıt türüne ve kullanım amacına göre sınıflandırmak mümkündür. Ulaşım biçimine göre kara, hava, deniz ve demiryolu taşıtları olarak incelenen motorlu taşıtlar arasında, kullanım yoğunluğu bakımından karayolu taşıtları öne çıkmaktadır. Karayolu taşıtları ise yakıt türüne göre benzinli, dizel, LPG'li ve doğalgazlı olarak sınıflandırılabilir.

Ülkemizde kaydı gerçekleştirilen karayolu taşıtları, kullanılan yakıt türüne göre benzinli, dizel ve LPG'li taşıtlar olarak sınıflandırılmıştır. Bunun yanı sıra, günümüzde doğalgazlı taşıtların da şehir taşımalarında kullanıldığı bilinmektedir. 2004–2010 yılları arasında, ülkemizdeki karayolu taşıt dağılımının bu sınıflandırmaya göre yapıldığı, satışı gerçekleşen ancak trafik tescil kaydı gibi sorunları bulunan araçların ise bilinmeyen taşıtlar adıyla ayrı bir sınıfta değerlendirildiği görülmektedir. Tablo 3.3'te, Türkiye'deki yakıt türüne göre karayolu taşıt sayıları yer almaktadır. 2004 yılında yaklaşık 10 milyon olan araç sayısı, 2010 yılı sonunda 15 milyonu aşmıştır. 2004 ve 2010 yıllarındaki taşıt sayılarına göre en belirgin değişim LPG'li ve dizel motorlu taşıtlarda gerçekleşmiştir. 2004 yılında 819 bin olan LPG'li taşıt sayısı %263 artarak 2.973 milyona, 2004 yılında 3.346 milyon olan dizel motorlu taşıt sayısı %85 artarak 6.195 milyona ulaşmıştır. Benzin motorlu taşıt sayısındaki artış oranı ise %3.46 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 3.3. 2004–2010 yılları arasında yakıt türüne göre Türkiye'deki taşıt dağılımı [7]

Yıl	Genel toplam	Benzin	Dizel	LPG	Bilinmiyor
2004	10 236 357	5 569 192	3 346 355	819 007	501 803
2005	11 145 826	5 606 321	3 836 399	1 298 830	404 276
2006	12 227 393	5 935 725	4 372 042	1 569 951	349 675
2007	13 022 945	5 980 516	4 850 837	1 880 023	311 569
2008	13 765 395	5 952 746	5 323 478	2 276 283	212 888
2009	14 316 700	5 887 559	5 654 350	2 592 695	182 096
2010	15 095 603	5 762 156	6 195 898	2 973 832	163 717

2009 yılına kadar benzin motorlu taşıtlara göre daha az kullanılan dizel motorlu taşıtların sayısı, 2010 yılında benzin motorlu taşıt sayısını %7.53 oranında aşmıştır. Bu artışın geçmiş yıllarda daha çok sanayi alanında kullanılan dizel motorlu taşıtların günümüzde binek otomobillerde de yaygınlaşması neticesinde gerçekleştiği düşünülmektedir.

Dizel motorları, verim ve uygulama kolaylıkları nedeniyle taşımacılık, ulaşım, otomotiv sanayi, tarım uygulamaları ve endüstriyel sektör gibi pek çok alanda kullanılmaktadır [45]. Dizel motorları, benzin motorlarına göre daha iyi efektif verime ve daha yüksek güce sahiptirler [46]. Dizel motorlarının benzinli motorlara göre önemli bir avantajı da daha az yakıt tüketimleri ve bundan dolayı daha düşük çalışma maliyetine sahip olmalarıdır [47]. Dizel motorlarında, benzin motorlarına göre daha az CO ve HC emisyonu elde edilmektedir [48–50]. Ancak, NO_x ve is emisyonlarının artış göstermesi dizel motorlarının önemli sorunları arasında yer almaktadır [51–53]. Dizel motorlarında görülen emisyon değişiminde motor dizaynı ve egzoz kontrol sisteminin varlığı önemlidir. Bu hususta, benzinli motorlara göre dizel motorları ile elde edilen NO_x emisyonlarının 2–20 kat, is emisyonlarının ise 30–100 kat oranında artış göstermesi mümkündür [54].

Egzoz emisyonlarını azaltmak ve yakıt tüketimini düşürmek alternatif yakıt çalışmalarındaki odak noktalarıdır [55, 56]. Bunun yanı sıra, enerji tüketimindeki artışlara karşılık, alternatif yakıtların geliştirilerek enerji güvenliğinin sağlanmasına gerek duyulmaktadır [57].

3.2. Dizel Motorlarında Kullanılan Alternatif Yakıtlar

Dizel motorlarında kullanılabilecek alternatif yakıtlar hususunda pek çok çalışma gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalar arasında, bitkisel yağlar ve biyodizel, biyogaz, doğalgaz, LPG, alkol ve alkol türevi yakıt uygulamaları dikkat çekmektedir.

Etanol ve metanol dizel motorlarında kullanılabilen alkol yakıtlar arasında yer almaktadır. Alkol yakıtlar motorine göre daha düşük viskoziteye sahiptir ve bu özellikleri ile daha iyi atomize olarak havayla daha kolay karışabilmektedirler.

Yüksek oranda oksijen içermeleri, düşük C/H oranına sahip olmaları ve düşük oranda kükürt içermeleri egzoz emisyonlarının iyileştirilmesinde etkili özellikleridir [58, 59]. Yapılan çalışmalarda, alkol yakıtların kullanımı ile CO, HC ve is emisyonlarının motorine göre azaldığı, NO_x emisyonlarının motorun yük ve devir gibi çalışma şartlarına göre değişkenlik gösterdiği ifade edilmektedir [59]. Alkol yakıtların bu özelliklerinin yanı sıra, motorine göre daha düşük setan sayısına, daha yüksek buharlaşma ısısına ve daha yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahip olmaları dizel motorlarında kullanımını sınırlandırmaktadır [60].

Alkol yakıtların dizel motorlarında kullanımı için üç yöntem belirtilmektedir [61]; alkol yakıtların fumigasyon yöntemiyle motora uygulanması, alkol yakıtların çift yakıt yöntemiyle motora uygulanması ve dizel yakıt yerine enjekte edilen alkol yakıtın buji ile tutuşturulması. Bunun yanı sıra, alkol yakıtların hacimsel karışım yöntemiyle dizel yakıtına belirli oranlarda karıştırılarak kullanımı da mümkündür.

Alkol türevi yakıtlar da dizel motorlarında kullanılabilir. Etanol ve metanol kullanımında olduğu gibi, katkı yakıtı ya da karışım yakıtı olarak kullanılmaları mümkündür. Bu yakıtların tercihinde fiziksel ve kimyasal özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bütil eter, etil heksil eter, metil heptil eter ve di metoksi heksan katkıları yüksek setan sayıları nedeniyle [62], di metil eter yüksek oksijen içeriği, düşük kaynama noktası ve yüksek setan sayısı nedeniyle [63] tercih edilmektedir. İzobütanol ise oksijen içeriğiyle, etanol ve metanol gibi alkollere göre daha yüksek ısı değere sahip olmasıyla ve herhangi bir karışım sorunu oluşturmaması nedeniyle dizel motorlarında kullanılabilen alkol türevi yakıtlar arasında yer almaktadır [64].

Biyogaz, atık ürünlerden üretilen ve petrolden bağımsız kaynak oluşumu sağlayan bir yakıttır. İçeriğinin çoğunu metan ve CO₂'in oluşturduğu biyogaz, dizel motorlarında çift yakıt yöntemiyle kullanılabilen alternatif bir yakıt kaynağıdır. Yapılan çalışmalarda, dizel motorlarında biyogaz kullanımının CO, HC ve CO₂ emisyonlarını arttırdığı ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra NO emisyonlarının biyogazın kullanıldığı motora göre değişkenlik gösterdiği, HCCI motorlarda NO_x emisyonlarının azaldığı ifade edilmektedir [65, 66].

Dizel motorlarında kullanılabilen alternatif yakıtlar arasında yer alan LPG özellikle dizel motorlar için önemli bir sorun olan NO_x , is ve PM emisyonlarını azaltmaktadır. Ancak LPG kullanımının CO ve HC emisyonlarını arttırdığı ifade edilmektedir [61, 67]. Dizel motorlarında LPG kullanımıyla ilgili farklı yakıtlarla desteklenen çalışmalar da bulunmaktadır. Özellikle ana yakıt olan LPG'nin yanması sonucu oluşan tutuşma gecikmesi ve yanma süresinin uzaması gibi sorunların iyileştirilmesi amacıyla LPG ve hidrojenin de birlikte kullanıldığı çalışmalar dikkat çekmektedir [68, 69].

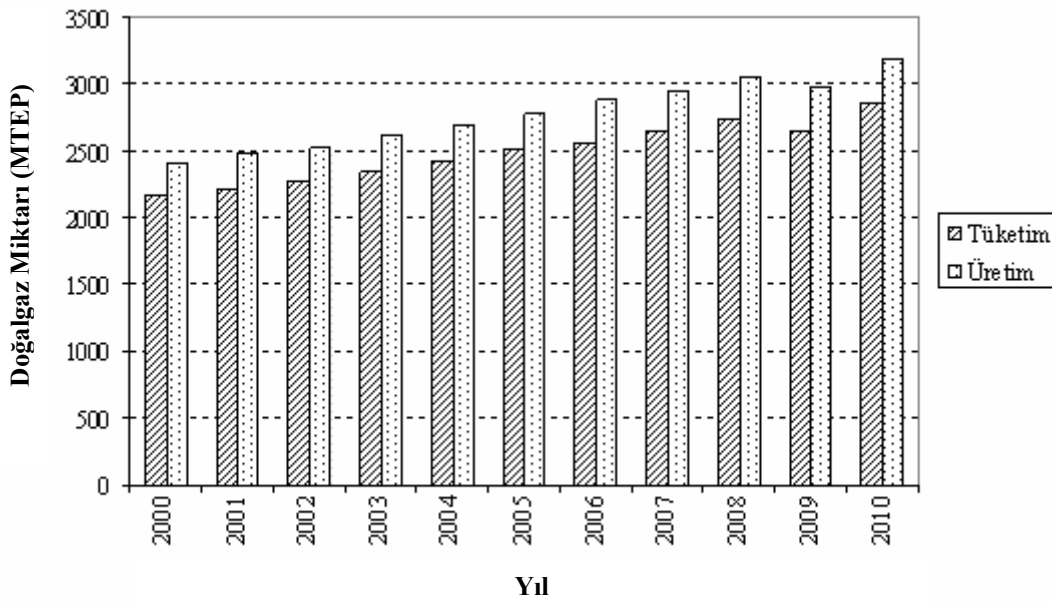
Dizel motorlarında, motorine alternatif olarak kullanılabilen yakıtlardan bir diğeri biyodizeldir. Yerel kaynaklardan üretilebilmesi, yenilenebilir ve dışa bağımlılığı azaltıcı bir yakıt olması biyodizelin öne çıkan özellikleri arasında yer almaktadır [70]. Aynı zamanda, üstün yağlayıcı özellikleri ile dizel motorlarında sürtünmeyi azaltıcı etkisi ile motor parçalarının daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır [71]. Biyodizel bitkisel ve hayvansal yağlardan da üretilebildiği gibi [72] atık yağlardan da üretilebilmektedir. Bu özelliği ile atık yağlardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılmasında etkilidir. Atık yağlar geri kazanılarak yeniden kullanıldığından ekonomik açıdan da yarar sağlanmaktadır [73]. Biyodizel oksijen içeriğine sahip olması ile egzoz emisyonlarının azaltılmasında etkili bir yakıttır. Yapılan çalışmalarda, özellikle saf biyodizel kullanımı ile HC, CO ve is emisyonlarının iyileştiği, NO_x emisyonlarının genel olarak artış gösterdiği ifade edilmektedir [74-76]. Motor performansı açısından ise biyodizel kullanımıyla motorine göre yakıt tüketiminin arttığı, bunun yanı sıra efektif verimin artış gösterdiği belirtilmektedir [77]. Biyodizel dizel motorlarında saf olarak ya da motorinle belirli oranlarda karıştırılmak suretiyle kullanılabilir. [78].

Doğalgaz, dizel motorlarında kullanılabilen gaz yakıtlardan biridir. Dizel motorlarında özellikle çift yakıt olarak kullanımı tercih edilen doğalgaz, yeterli rezerv yapısı, kolay uygulanabilirliği ve uygun fiyatı ile araştırmacıların ilgi odağında bulunan alternatif bir yakıttır [78].

BÖLÜM 4. DOĞALGAZ VE MOTORLARDA KULLANIMI

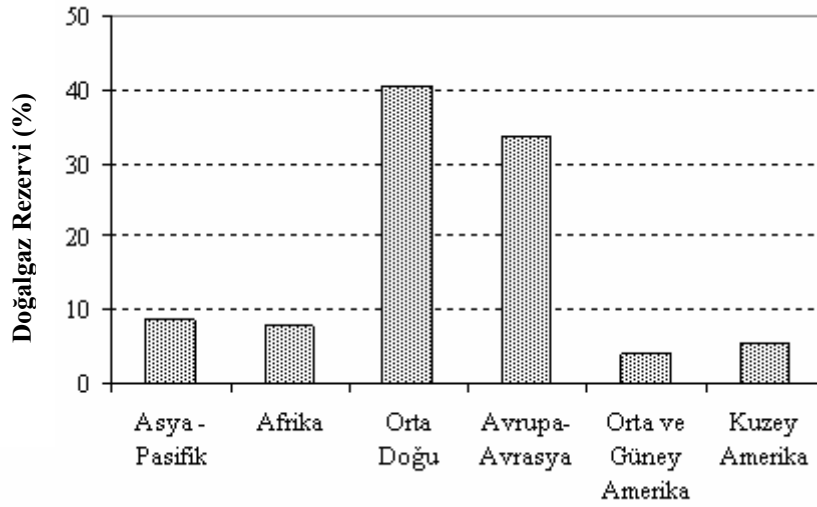
4.1. Dünyada ve Türkiye’de Doğalgaz

Doğalgaz, tüketim yoğunluğu bakımından petrol ve kömürden sonra tercih edilen önemli enerji kaynaklarından biridir. Ayrıca doğalgaz kullanımı hususunda son yıllarda giderek artan bir ilgi olduğu dikkat çekicidir. Yapılan çalışmalarda, bu ilginin ileriki yıllarda da artış göstereceği ifade edilmektedir. Şekil 4.1’de dünya genelinde doğalgaz kullanımının 2000–2010 yılları arasındaki üretim ve tüketim miktarları görülmektedir. 2000 yılı sonunda 2176.2 MTEP seviyelerinde gerçekleşen doğalgaz tüketimi, %23.85 oranında artış göstermiş ve 2010 yılında 2858.1 MTEP değerine ulaşmıştır. Doğalgaz, 2010 yılı enerji talebinin %23.81’ini karşılamıştır [37]. Gerçekleştirilen projeksiyonlarda, 2030 yılında doğalgaz tüketiminin 4312.4 MTEP seviyelerine kadar çıkacağı ve doğalgaz kullanımının toplam enerji ihtiyacının %26.24’ünü karşılayacağı tahmin edilmektedir [36].



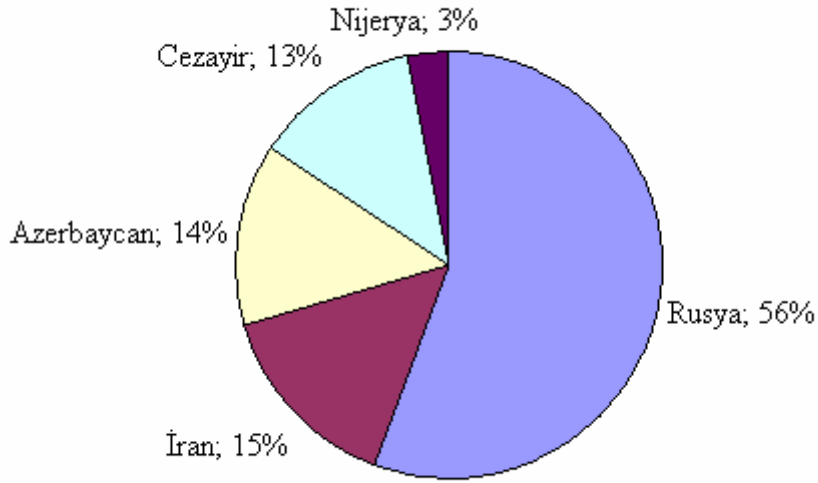
Şekil 4.1. 2000-2010 yılları arasında dünya doğalgaz tüketimi [37]

Dünya doğalgaz rezervi, 2010 yılı sonu itibariyle 187.1 trilyon m³ olarak belirlenmiştir. Gerçekleştirilen istatistiklere göre, bu rezervlerin %40.5'i Orta Doğu ülkelerinde (Bahreyn, İran, Irak, Kuveyt, Umman, Katar, Suudi Arabistan, Suriye, Birleşik Arap Emirlikleri Yemen vb.), %33.7'si ise Avrupa ve Avrasya ülkelerinde (Azerbaycan, Danimarka, Almanya, İtalya, Kazakistan, Hollanda, Norveç, Polonya, Romanya, Rusya, Türkmenistan, Ukrayna, İngiltere, Özbekistan vb.) yer almaktadır. Şekil 4.2'de doğalgaz rezervlerinin dünya üzerindeki dağılımı görülmektedir [37].



Şekil 4.2. Doğalgaz rezerv dağılımları [37]

2009 yılı sonunda ülkemizdeki doğalgaz rezervi 17.5 milyar m³ olarak belirlenmiştir. Bu değer 11.3 milyar m³'ü kullanılmış olup, 2009 sonu kalan rezervimiz 6.2 milyar m³'tür. Bu değer yeni keşifler olmaması halinde 2 aylık ihtiyacımızı karşılar düzeydedir. Türkiye doğalgaz ihtiyacının önemli bölümünü ithal etmektedir. 2009 yılında yerli üretimimiz 0.729 milyar m³'ken, ithal edilen doğalgaz miktarı 35.8 milyar m³ olarak gerçekleşmiştir. Türkiye doğalgaz ithalatının %56'sını Rusya, %15'ini İran ve %14'ünü Azerbaycan'dan karşılamıştır. Geri kalan kısmının ise LNG olarak Nijerya ve Cezayir'den sağlandığı bilinmektedir [79]. Şekil 4.3'te Türkiye'nin doğalgaz ithal ettiği ülkeler ve dağılım oranları görülmektedir.



Şekil 4.3. Türkiye'nin doğalgaz ithal ettiği ülkeler ve dağılım oranları [79]

4.2. Doğalgaz Kullanımı ve Özellikleri

Doğalgazın ilk kullanımı, MS 221-263 yıllarında Shu Han hanedanlığı zamanında gerçekleşmiştir. Bu zamanda, doğalgazın sığ kuyulardan elde edilerek bambu çubuklarıyla taşındığı belirtilmektedir. Doğalgazın asıl gelişimi 17. yy'dan sonra İtalya'da başlamıştır. Kuzey İtalya'da ışıklandırma ve ısıtma kaynağı olarak kullanılmaya başlanan doğalgaz, sonraki yıllarda Kuzey Amerika, Yeni Zelanda ve Avrupa'nın diğer ülkelerine yayılmıştır. Doğalgazın ticari bir ürün oluşu 20. yy.'da başlamıştır. Önemli kaynakların Asya ve Ortadoğu ülkelerinde çıkarılmaya başlanmasıyla kullanımı daha da artmıştır [80].

Doğalgaz günümüzde enerji kaynakları arasında yaygın olarak kullanılan bir yakıt konumundadır. Isıtma ve soğutma sistemleri, endüstriyel sistemler, elektrik üretimi, fırınlar, mekanik güç üretimi ve taşımacılık sektörü gibi pek çok alanda kullanılabilir. Doğalgazın özellikle ısıtma ve elektrik üretimindeki payı büyüktür. Doğalgazın %75'i ısıtma amaçlı, %15'i ise elektrik üretiminde kullanılmaktadır. Ancak ileriki yıllarda doğalgaz kullanımının diğer alanlarda da artacağı düşünülmektedir [81].

Doğalgaz yeraltında kayaçların arasındaki gözeneklerde bulunan, içerisinde bütan ve pentan gibi ağır hidrokarbonların bulunduğu karışık bir gazdır. Çıkarılması, doğalgazın kayaçlar arasından süzülerek oluşturduğu toplanma kuyularından ya da havzalardan sağlanmaktadır. Doğalgaz, havzalarda petrol ile birlikte bulunabildiği gibi tek başına gaz halinde de bulunabilmektedir. Kullanımı için çıkarıldıktan sonra içerisinde bulunan ağır hidrokarbonların ayrıştırılması gerekmektedir [82].

4.2.1. Doğalgazın özellikleri

Doğalgaz farklı gaz bileşenlerinden oluşan bir yakittir. Ana bileşenini metan (CH_4) oluşturmaktadır. Metan haricinde çok düşük oranlarda etan, propan, bütan gibi hidrokarbonlar da yer almaktadır [83, 84]. Ayrıca doğalgaz içerisinde nitrojen, helyum, karbondioksit, hidrojen sülfat ve su da bulunabilmektedir [83]. Türkiye'deki doğalgaz bileşenleri Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Türkiye'de kullanılan doğalgaz bileşenleri [85]

Bileşenler	Kimyasal Formül	Hacimsel İçerik (%)	Kütleli İçerik (%)
Metan	CH_4	En düşük, 92.98	En düşük, 85
Etan	C_2H_6	En yüksek, 4.04	En yüksek 7
Propan	C_3H_8	En yüksek 1.17	En yüksek 3
Bütan	C_4H_{10}	En yüksek 0.59	En yüksek 2
Azot	N_2	En yüksek 1.62	En yüksek 2.6
Karbondioksit	CO_2	En yüksek 1.19	En yüksek 3

Tablo 4.2'de doğalgazın yakıt özellikleri yer almaktadır. Doğalgazın içeriğinin önemli bir bölümünün metan olması nedeniyle, yüksek oranda metan özellikleri sergilemektedir.

Tablo 4.2. Doğalgazın yakıt özellikleri [86]

	Doğalgaz
Kimyasal denklemi	CH_4
C/H oranı	0.25
Molekül ağırlığı	16.04

Tablo 4.2. Doğalgazın yakıt özellikleri (devamı) [86]

Özgül ağırlığı (g/cm ³)	
Sıvı	0.424
Gaz	0.78 x 10 ⁻³
Stokiyometrik karışım	
Hava/Yakıt (kütlesele)	17.2
Hava/Yakıt (hacimsel)	9.53
kJ/lt	3.4
molürün/molreaktantlar	1.00
Isıl değeri	
(kJ/kg)	50800
(kJ/lt)	20800
Buharlaşma ısısı (MJ/kg)	0.509
Tutuşma sınırları	
(% hacim)	5 – 15.4
Hava fazlalık katsayısı	0.59 – 2.00
Laminar alev hızı (m/s)	0.37
Adyabatik alev sıcaklığı (°C)	1954
Difüzyon katsayısı (m ² /s)	0.16
Kaynama noktası (°C)	-161.3
Kendi kendine tutuşma sıcaklığı (°C)	632
Oktan sayısı	
ROS	130
MOS	105

Doğalgaz, renksiz ve kokusuz bir gazdır. Ancak, oluşabilecek kaçakların tespiti amacıyla içerisine koku verici maddeler eklenmektedir. Doğalgazın içeriğinde düşük oranda da olsa karbon bulunmaktadır. Yanma esnasında karbondan kaynaklanan mavi alev meydana gelmektedir.

Doğalgazın yoğunluğu oldukça düşüktür ve havadan hafif bir gazdır. Bunun yanı sıra, difüzyon katsayısı oldukça yüksektir. Doğalgazın difüzyon katsayısı 0.08 olan benzinin yaklaşık iki katı kadardır. Bu durum doğalgazın havaya kolay ve hızlı bir şekilde karışmasını ve yayılmasını sağlamaktadır. Doğalgaz yüksek hava fazlalığında

yanabilmektedir. Kütlesel hava/yakıt oranı benzinde 14.7 ve motorinde 14.5'ken, doğalgazın sahip olduğu kütlesel hava/yakıt oranı 17.2'dir. Doğalgaz bu özelliği ile fakir karışımlarda yanabilme yeteneğine sahiptir. Bu durum, yakıt ekonomisi açısından doğalgaz kullanımına önemli bir avantaj sağlamaktadır. Doğalgazın laminar alev hızı benzin-hava karışımına göre düşüktür. Bu durum doğalgazın yanma süresinin biraz daha uzun olmasına neden olmaktadır. Doğalgaz tutuşma sınırları geniş bir yakıttır. Tutuşma sınırları benzin için 1.4–7.6, motorin için 0.7–5.0, doğalgaz içinse yaklaşık 5–15 değerleri arasındadır. Hava içerisinde %5'in altındaki ve %15'in üzerindeki karışım oranlarında doğalgazın yanması mümkün olmamaktadır. Doğalgazın kaynama sıcaklığı oldukça düşüktür. Bu nedenle, yüksek basınç altında depolanabilmektedir. Doğalgazın kendi kendine tutuşma sıcaklığı benzin ve motorin değerlerinden yüksektir. Benzinin kendi kendine tutuşma sıcaklığı 27–216 °C ve motorinin kendi kendine tutuşma sıcaklığı 160–382 °C iken, doğalgazın kendi kendine tutuşma sıcaklığı yaklaşık 632 °C'dir. Bu durum, güvenlik açısından doğalgaz kullanımına önemli bir avantaj sağlamaktadır. Doğalgazın C/H oranı benzin ve motorine göre düşüktür. Benzinin ve motorinin sahip olduğu C/H oranı yaklaşık olarak 0.5 değerlerindeyken, doğalgazın C/H oranı 0.25'tir. Bu nedenle doğalgaz kullanımı karbon içerikli kirleticilerin ve özellikle CO₂ oluşumunun azalmasında etkilidir. Doğalgaz ısı değeri benzin ve motorine göre yüksek olan bir yakıttır. Benzinin ve motorinin alt ısı değeri yaklaşık 43 MJ/kg değerlerindeyken, sıvı haldeki doğalgaz için bu değer yaklaşık 50 MJ/kg değerlerindedir. Bu durum birim enerji içeriğini sağlayan yakıt maliyetini azaltmaktadır [87].

4.2.2. Taşıtlarda doğalgaz kullanımı

Doğalgazın taşıtlarda alternatif yakıt olarak kullanımı oldukça yaygındır. Pek çok ülke, doğalgazın taşıtlarda kullanımını teşvik etmekte ve desteklemektedir. Doğalgazın taşıtlarda kullanımı üzerinde çalışmalar yapan pek çok kuruluş da bulunmaktadır. Bu hususta öne çıkan kuruluşlar, Uluslararası Doğal Gazlı Araçlar Birliği (IANGV) ve Avrupa Doğal Gazlı Araçlar Birliği (ENGVA)'dir. Hükümet destekleri ve bu kuruluşların çalışmalarının da katkısıyla doğalgazlı taşıt sayısı

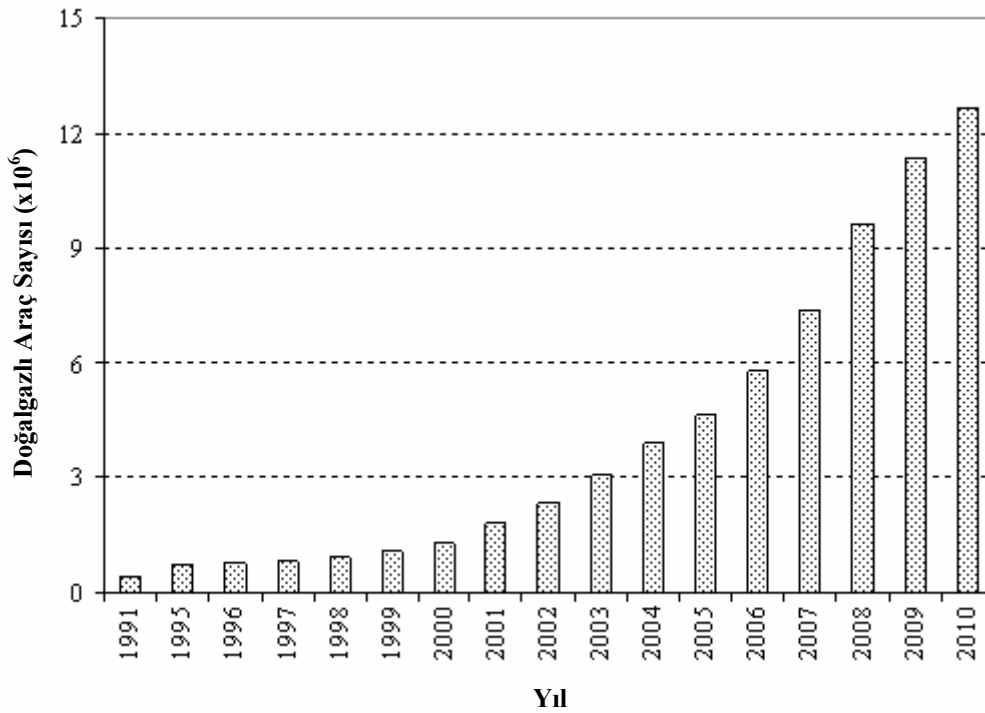
önemli oranda artış göstermiştir. Avrupa'da 2020 yılına kadar tüm taşıtların %23'ünün doğalgazlı olması hedeflenmiştir [88].

Doğalgazlı taşıt kullanımında Pakistan öne çıkmaktadır. 2010 yılı verilerine göre Pakistan'ın doğalgazlı taşıt sayısı 2.7 milyonu aşmıştır. Doğalgazlı araç kullanımını Pakistan'ın ardından İran, Arjantin, Brezilya, Hindistan, İtalya, Çin, Kolombiya, Tayland ve Ukrayna izlemektedir. Doğalgazlı taşıt sayılarına göre dünya genelinde yer alan ilk 10 ülke Tablo 4.3'te verilmektedir [89].

Tablo 4.3. 2010 yılı verilerine göre en çok doğalgazlı taşıta sahip ülkeler [89]

Ülke	NG'li araç sayısı	Kullanım oranı (%)
Pakistan	2 740 000	21.6
İran	1 954 925	15.4
Arjantin	1 901 116	15.0
Brezilya	1 664 847	13.1
Hindistan	1 080 000	8.5
İtalya	730 000	5.8
Çin	450 000	3.6
Kolombiya	340 000	2.7
Tayland	218 459	1.7
Ukrayna	200 000	1.6

Dünya genelindeki doğalgazlı taşıt sayıları incelendiğinde, 1991 yılından itibaren 2010 yılına kadarki süre içerisinde ciddi bir artışın gerçekleştiği görülmektedir. 1991 yılında yaklaşık 400 bin olan doğalgazlı taşıt sayısının, 2010 yılı sonunda 12.7 milyona ulaştığı kaydedilmiştir (Şekil 4.4) [89].



Şekil 4.4. 1991 yılından günümüze dünya genelinde doğalgazlı taşıt trendi [89]

Doğalgazlı taşıtlarda yakıt olarak kullanan ilk ülke İtalya'dır. 1930'lu yıllardan itibaren çalışmaları devam etmektedir. Gerek yakıt olarak doğalgaz kullanımında, gerekse ekipman üretiminde İtalya kendini önemli ölçüde geliştirmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde, Avrupa'da 2020 yılına kadar 20 milyon aracın CNG kullanacağı planlanmaktadır [88]. Son yıllarda Almanya'nın da doğalgazlı taşıt kullanımında önemli çalışmalar yürüttüğü görülmektedir. Bu hususta, Alman hükümeti doğalgazlı taşıtlar konusunda çalışmalar yapmak üzere bir konsorsiyum kurmuştur. Bunun yanı sıra doğalgazlı taşıt kullanımının çeşitli yatırımlarla teşvik edilmesi ve doğalgaz istasyonlarının artırılması gibi uygulamalar dikkat çekmektedir [90].

4.2.2.1. Doğalgaz kullanım maliyeti

Maliyet, yakıt kullanımı açısından somut ve soyut maliyetler olarak iki kısımda incelenebilir. Somut maliyetler yakıtın türüne göre (benzin, motorin, doğalgaz, LPG vb.) değişkenlik gösteren satın alma fiyatlarından, altyapı sistem maliyetlerinden (istasyonlar, dağıtım hatları, taşımacılık vb.), motor yenileştirme işlemleri ile ilgili

maliyetlerden ve bakım maliyetlerinden, soyut maliyetler ise yakıt türüne göre değişkenlik gösteren güvenlik ile ilgili maliyetlerden oluşmaktadır [91].

Doğalgaz enerji eşdeğeri bakımından benzin ve motorine göre oldukça uygun bir fiyata sahiptir. Doğalgaz litre bazında benzin ve motorine göre, bölgeden bölgeye değişen doğalgaz fiyatlarına ve kullanıldığı araca göre %15-%60 arasında daha ucuzdur. Gerçekleştirilen bir çalışmada, Almanya’da benzinli bir aracın 100 km’deki yakıt tüketim maliyetinin yaklaşık 12 € olduğu, doğalgazlı bir aracın aynı koşuldaki yakıt tüketim maliyetinin ise yaklaşık 5 € olduğu ifade edilmiştir. Bir başka çalışmada, doğalgaz dönüşümü gerçekleştirilen Volvo V70’in 100 km’deki yakıt tüketim maliyetinin 6.70 €, aynı aracın dizel motorlu versiyonunun 100 km’deki yakıt tüketim maliyetinin 7.41 € ve yine aynı aracın benzin motorlu versiyonunun 100 km’deki yakıt tüketim maliyetinin ise 11.79 € olduğu ifade edilmiştir. Doğalgaz sisteminin satın alma fiyatı benzinli ve dizel motorlu taşıtlardan 1000–6000 \$ daha yüksektir. Bu fiyatın araç tipine, kullandığı sisteme ve ekipmana göre değiştiği belirtilmektedir. Doğalgazlı taşıtların bakım süreleri benzinli motorlara göre yaklaşık iki kat artmakta ve bu durum doğalgazlı taşıtların bakım maliyetlerinin azalmasını sağlamaktadır. [85].

4.2.2.2. Doğalgaz kullanım güvenliği

Doğalgazın taşıtlarda kullanım güvenliği dört alanda incelenebilmektedir [92];

- Yakıt özellikleri
- Dolum sırasında karşılaşılabilecek tehlikeler
- Dolum istasyonlarında karşılaşılabilecek tehlikeler
- Taşıttaki CNG tankının güvenliği

Doğalgaz, düşük yoğunluğa sahiptir ve havadan daha hafif bir yakıttır. Bu özelliği ile havaya hızlı bir şekilde karışıp yayılabilmekte ve herhangi bir kaçak olması durumunda tehlike yaratmamaktadır. Doğalgazın yanması sadece %5-%15 oranları arasındaki doğalgaz/hava karışımlarında gerçekleşebilmektedir. Bu oranların dışındaki değerlerde yanma oluşmamaktadır. Doğalgaz zehirli bir gaz değildir ve biyolojik olarak inerttir. Ayrıca yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına ve yüksek

tutuşma limitlerine sahiptir. Bu nedenle, egzoz manifoldu gibi sıcak yüzeylere temas etmesi durumunda yangın ve patlama tehlikesi yoktur. Bu hususta, dizel yakıtıyla benzerlik taşımaktadır [9, 61].

Doğalgaz sistemlerinde kullanılan elemanların üretimi belirli standartlara sahiptir. Bu nedenle, üretimleri kontrollü bir şekilde gerçekleşmekte ve bu durum doğalgaz kullanımını daha güvenli hale getirmektedir. Doğalgaz sistemleri ülkemizde de TSE tarafından belirlenen standartlarla tanımlanmıştır. Doğalgazın taşıtlarda kullanımıyla ilgili 30'a yakın standart bulunmaktadır, bu standartlardan bazıları Tablo 4.4'te görülmektedir.

Tablo 4.4. Doğalgazın taşıtlarda kullanımıyla ilgili TSE standartları [93]

TSE ECE R 110:2002 Motorlu Taşıtlar - Tahrik sisteminde sıkıştırılmış doğal gaz (cng) kullanan motorlu taşıtların özel aksamalarının, tahrik sisteminde sıkıştırılmış doğal gaz kullanımı için tip onaylı özel aksamaların montajı konusunda taşıtların onayı ile ilgili hükümler
TSE ECE R 115:2006 Motorlu Taşıtlar I. Tahrik sistemlerinde LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) kullanılması amacıyla motorlu taşıtlara monte edilecek sonradan takılan özel LPG sistemlerinin II. Tahrik sistemlerinde CNG (sıkıştırılmış doğal gaz) kullanılması amacıyla motorlu taşıtlara monte edilecek sonradan takılan özel CNG sistemlerinin onayı ile ilgili hükümler
TS 12664-2 Karayolu taşıtları yakıt sistemlerinin, sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) kullanımı için dönüşümünü yapan yerler – Genel kurallar
TS 12873 Yetkili Servisler- Pompalar (Atık ve temiz su, yağ, akaryakıt, LPG, CNG) için kurallar
TS ISO 14469-1 Karayolu Taşıtları – Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) doldurma bağlantısı – Bölüm 1: 20 MPa (200 bar) bağlantı
TS ISO 15500-1 → TS ISO 15500-19 Kara Yolu Taşıtları – Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) yakıt sistemi bileşenleri (çek valf, vana, enjektör, basınç göstergesi, regülatör vb.), performans ve deney metotları, güvenlik özellikleri
TS ISO 15501-1 Karayolu Taşıtları – Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) yakıt sistemleri – Bölüm 1: Güvenlik özellikleri
TS ISO 15501-2 Karayolu Taşıtları – Sıkıştırılmış doğal gaz (CNG) yakıt sistemleri – Bölüm 2: Deney metotları
TS 12664-2/T1 İş Yerleri - Karayolu taşıtları yakıt sistemlerinin, sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) kullanımı için dönüşümünü yapan yerler - Genel kurallar
TS 12664-2 İş Yerleri - karayolu taşıtları yakıt sistemlerinin, sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) kullanımı için dönüşümünü yapan yerler - Genel kurallar

Tablo 4.4. Doğalgazın taşıtlarda kullanımıyla ilgili TSE standartları (devamı) [93]

TS 12664

İş Yerleri - Motorlu taşıtların yakma sistemlerinin, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) veya sıkıştırılmış doğalgaz (CNG) kullanımı için dönüşümünü yapan - Genel kurallar

Doğalgaz dolumu, kapalı bir sistemle yapılmakta ve sistem dolum bitiminde kendini otomatik olarak kapatmaktadır. Bu nedenle dökülme, fazla dolum gerçekleşmesi, kaçak gibi sorunlar meydana gelmemektedir [92].

Dolum istasyonları belirli kriterlere göre kurulmalıdır. Bunlar, hazırlanan standartlarda da belirtilmektedir. En belirgin kriterler arasında; sorunlu ve riskli bölgelerin tespit edilmesi, standartlarda belirtilen yerleşim planının yapılması, asgari mesafelerin talimatlara uygun olarak düzenlenmesi, elektrik şartnamelerinin uygun yapılması, yıldırım korumaları, acil durum kontrol vanalarının yerleştirilmesi, istasyonun düzenli olarak bakım ve onarımlarının yapılması gibi önlemler yer almaktadır [94, 95].

CNG tankları, doğalgaz sistemlerinin önemli bir parçasıdır. Üretimlerinde ve kullanımlarında maliyet, ağırlık ve ömürlerinin yanı sıra güvenlik de önemli bir faktördür. CNG tankları, belirli standartlara ve testlere göre imal edilmektedir. CNG tank standartları arasında; uluslararası ISO 11439, Avrupa'da uygulanan ECE-R 110, ABD'de uygulanan FMVSS 304, DOT CFFC, ABD, Japonya, Meksika ve Arjantin'de uygulanan NGV2, Kanada, Macaristan, Avusturya ve İngiltere'de uygulanan CSA B51 standartları yer almaktadır. CNG tankları üzerinde; patlama, devir, asit şartlandırma, yanma, balistik, hata toleransı, yüksek sıcaklık, serbest düşüş, geçirgenlik, emniyet vanası performansı testleri yapılmaktadır [96].

4.2.2.3. Doğalgazın çevreye etkileri

Doğalgaz kullanımının çevresel etkilerini, doğalgaz kullanımı öncesinde oluşan etkiler ve doğalgaz kullanımı sonrasında oluşan etkiler olarak iki kısımda incelemek mümkündür. Depolama, doldurma ve taşınma gibi işlemler esnasında oluşan etkiler

doğalgaz kullanımı öncesi etkileri, yanma sonucu oluşan kirletici emisyonlar ise doğalgaz kullanımından sonra meydana gelen etkileri ifade etmektedir.

Doğalgazın depolandığı yakıt tank ömürlerinin belirli olması, bu süreden sonra tankların kullanılmamasını gerektirmektedir. Ancak ömrünü tamamlayan tankların arıtma ve atık dönüşüm sistemlerinde dönüşümü mümkün olduğundan herhangi bir çevresel kirliliğe neden olmamaktadır. Doğalgazlı taşıtların taşıma ve dolun sistemleri yalıtılmış olduğundan, herhangi bir kaçak ya da sızıntı gerçekleşmemektedir [97]. Bunun yanı sıra, doğalgaz herhangi bir toksit ya da kanserojen etkiye sahip değildir [98]. Doğalgaz kullanımıyla meydana gelen egzoz salınımları belirlenen emisyon standartlarını karşılayabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, doğalgazlı taşıtların Amerikan standartları arasında yer alan ultra düşük emisyonlu taşıt standartlarını (ULEV) ve süper ultra düşük emisyonlu taşıt standartlarını (SULEV) [97], Avrupa emisyon standartları arasında yer alan Euro standartlarını karşılayabildiği belirtilmektedir [85].

Doğalgazın taşıtlarda kullanımındaki ana sebeplerden biri çevresel faydalarıdır. Özellikle son yıllarda artan ilginin önemli nedenlerinden biri de budur. Benzinli ve dizel motor yakıtlarının kullanımı ile karşılaştırıldığında, doğalgazın kentsel hava kirliliğini oluşturan kirletici emisyonların azaltılmasındaki etkileri dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, doğalgaz kullanımı su ve toprak kirliliğini oluşturan zararlı atık üretimini azaltıcı etki göstermektedir [9].

4.2.2.4. Doğalgazın depolama ve dağıtım özellikleri

Doğalgaz, üç farklı biçimde depolanmakta ve bu depolama biçimlerine göre adlandırılmaktadır [99];

- Doğalgazın sıkıştırılarak depolanması: Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG),
- Doğalgazın sıvılaştırılarak depolanması: Sıvılaştırılmış doğalgaz (LNG),
- Doğalgazın aktif karbon petekleri içerisine absorbe edilerek depolanması: Absorbe edilmiş doğalgaz (ANG).

Sıkıştırılmış doğalgaz (CNG), yüksek basınç altında tanklara sıkıştırılarak elde edilmektedir. Normal şebeke hattından düşük basınçta alınan doğalgaz, yüksek basınç üniteleri ile yaklaşık 200 bar basınç altında tanklara doldurulmaktadır [100, 101]. CNG tanklarının önemli bir dezavantajı boyutlarının büyük olması ve ağırlıklarının fazla olmasıdır. Şekil 4.5'te farklı CNG tankları yer almaktadır.



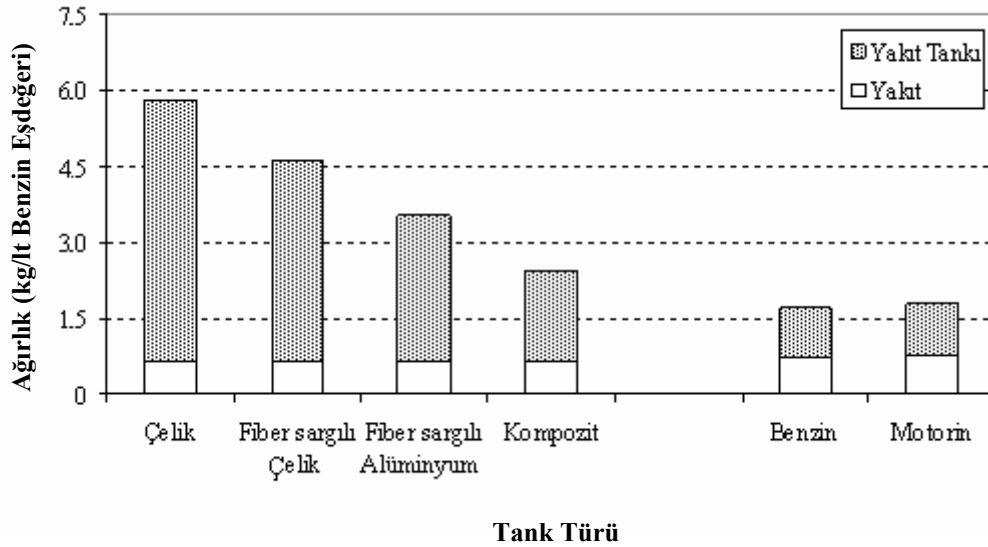
Şekil 4.5. CNG Tankı (a. Farklı boyutlarda CNG tankları [90], b. CNG tankının araca yerleştirilmiş biçimi [102])

CNG tankları yapım biçimlerine göre dört sınıfa ayrılmaktadır [9];

- Çelikten üretilen tanklar
- Fiber sargılı çelikten üretilen tanklar
- Fiber sargılı alüminyumdan üretilen tanklar
- Kompozit malzemelerden üretilen tanklar

Aynı miktardaki yakıtı depolamak için kullanılan CNG tanklarının ağırlıkları karşılaştırıldığında, çelikten yapılan tankların en ağırı olduğu bilinmektedir. Bu tanklar, taşıt ağırlığını önemli oranda arttıran unsurlardır. Bu durum ise yakıt tüketimini ve performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Fiber sargılı çelik tanklar, çelik tank ağırlığını %23 kadar azaltabilmektedir. Çelik tanklara göre fiber sargılı

alüminyum tanklar %44, tamamen kompozit malzemeden üretilen tanklar ise %65'e kadar ağırlıkta azalma sağlayabilmektedir [9]. Şekil 4.6'da eşdeğer benzin içeriğine sahip CNG tanklarının ağırlık bakımından dizel ve benzin tanklarına göre değişimi görülmektedir. CNG kullanımında depolama sorununun giderilmesi için daha hafif ve daha güvenilir ileri teknoloji ürünü tankların yapılması gibi farklı çalışmalar yürütülmektedir. Örneğin HiPer-tex tarafından üretilen fiberglas CNG tankı ile çelik tanklara göre yaklaşık %57 oranında ağırlık azaltılmıştır [103]. MCS teknoloji tarafından karbon fiber epoksi matris malzemeden üretilen CNG tankı ile de ağırlıkta %55 oranında azalma sağlanmıştır [104].



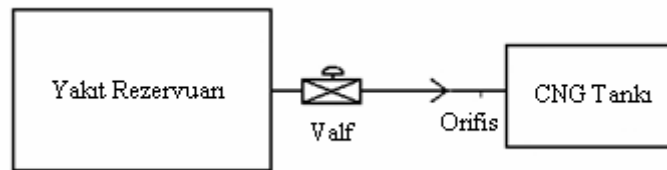
Şekil 4.6. CNG, motorin ve benzin tanklarına ait yakıt ve depolama ağırlıklarının karşılaştırılması [9]

LNG, doğalgazın düşük sıcaklık ve basınç altında sıvı olarak depolanmış halidir. LNG yönteminde, depo içerisinde sıkıştırılmış forma göre daha fazla yakıt depolanması mümkündür. Belirli bir hacimde, oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta sıvı halde olan doğalgazın miktarı, gaz haldeki doğalgaz miktarının 600 katı daha fazladır [105]. LNG tanklarına daha hızlı dolum gerçekleştirilebilmesine rağmen, LNG depolama tankları CNG tanklarına göre daha karmaşık yapıya sahiptir [85]. Doğalgazın yaklaşık -160°C olan kaynama sıcaklığı nedeniyle özellikle küçük tanklarda ısı transferi engellenememekte ve buharlaşma sorunu yaşanmaktadır. Bu durum ise LNG kullanımının tercih edilmesini güçleştirmektedir [106].

Doğalgazın depolanması hususunda CNG'ye alternatif olarak geliştirilen bir diğer yöntem, doğalgazın aktif karbon içerisine emdirilmesidir (absorbe edilmiş doğalgaz - ANG). Doğalgaz bu yöntemde hafif silindirler içerisindeki absorban gözeneklere nispeten düşük basınçlarda (2–4 MPa) depolanmaktadır. ANG yöntemi ile CNG'den daha fazla miktarda doğalgaz depolanabilmekte, bu özelliği ile son yıllarda doğalgaz taşımacılığında ve doğalgaz depolanmasında dikkat çekmektedir [107].

Dolum kapasitesi doğalgazlı araçlarda önemli bir problemdir. Dolum esnasında doğalgaz karışımı nedeniyle meydana gelen sıcaklık artışı doğalgazın yoğunluğunu düşürebilmektedir. Bu durum dolumun tam gerçekleşmemesine ve aracın katedeceği mesafenin düşmesine neden olmaktadır. Şebeke hatlarında yaklaşık olarak 4 bar basınçta bulunan doğalgazın tanklara dolum işlemi yüksek basınç altında yapılmaktadır. Dolum istasyonlarında yüksek basıncın elde edilebilmesi için ilave bazı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

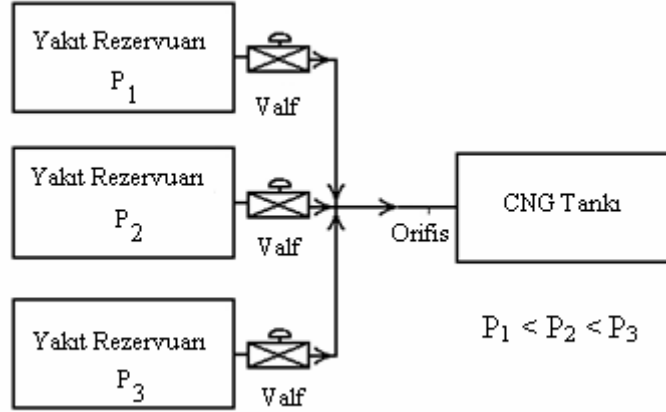
Depolama sistemine göre dolum işlemi, tampon dolum sistemi ve kademeli dolum sistemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Tampon dolum sisteminde, tek bir basınç rezervuarı bulunmaktadır ve CNG tankının dolumu bu rezervuardaki doğalgazla yapılmaktadır. Şekil 4.7'de tampon dolum sisteminin basitleştirilmiş şeması görülmektedir.



Şekil 4.7. Tampon depolama sistemi şeması

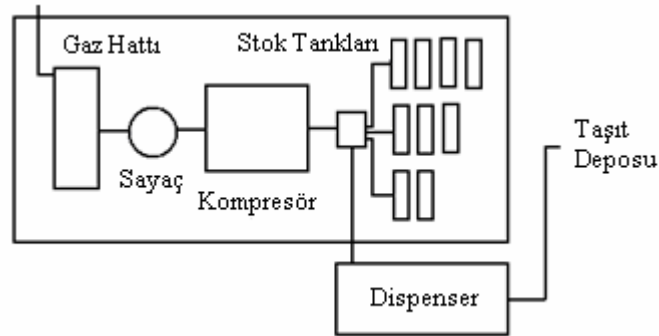
Şekil 4.8'de kademeli dolum sisteminin basitleştirilmiş şeması yer almaktadır. Kademeli dolum sisteminde düşük basınç, orta basınç ve yüksek basınç olmak üzere üç tip rezervuar bulunmaktadır. Dolum işlemi, sırasına göre düşük, orta ve yüksek rezervuar bağlantılarıyla gerçekleştirilmektedir. Kademeli dolum işleminin dolum verimini arttırdığı ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra kullanılan otomatik valflerle

yüksek basınç tankında her zaman maksimum gazın kalabileceği ve araca mümkün olan verilebilecek tüm yakıtı aktarabileceği belirtilmektedir [108].



Şekil 4.8. Kademeli depolama sistemi şeması

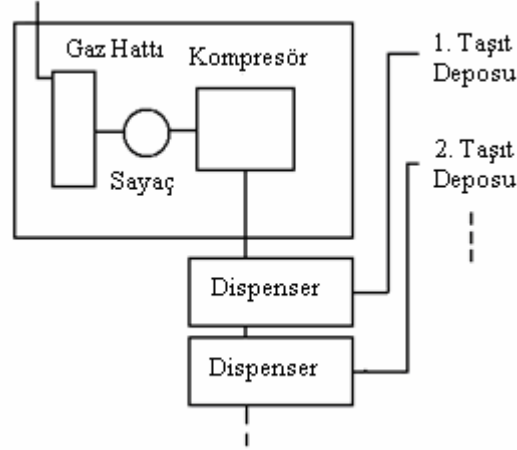
Doldurma biçiminin yanı sıra doğalgaz dolum işlemi hızına göre, yavaş dolum ve hızlı dolum olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Kısa bir süre içerisinde gerçekleştirilen hızlı dolum işlemi halka açık istasyonlarda uygulanmaktadır. Hızlı dolum yönteminde araç tanklarının dolumu için daha önceden basıncı arttırılarak doldurulan doğalgaz tankları kullanılmaktadır. Şekil 4.9'da hızlı dolum sisteminin şematik resmi görülmektedir [94].



Şekil 4.9. Hızlı dolum sistemi şeması [109]

Yavaş dolum sistemleri daha çok filo tipi araçlara sahip kuruluşlar için uygulanan dolum yöntemidir. Yavaş dolum işlemi daha uzun sürmekte ve bu yöntem özellikle çok sayıda aracın aynı anda dolum işleminin gerçekleştirilmesinde

kullanılmaktadır [94]. Şekil 4.10'da yavaş dolum sisteminin basitleştirilmiş şeması yer almaktadır.



Şekil 4.10. Yavaş dolum sistemi şeması [109]

Doğalgazlı araçların dolum işlemleri istasyonlar haricinde evlerdeki doğalgaz hatlarından da yapılabilmektedir. Evdeki doğalgaz hattına doğrudan bağlanan basit bir ünite ile taşıt tankının yaklaşık 10-12 saat içerisinde dolumu yapılabilmektedir [94].

4.2.2.5. İçten yanmalı motorlarda doğalgaz uygulamaları

Doğalgaz içten yanmalı motorlarda herhangi bir kimyasal işlem gerektirmeden, şebeke hattından doğrudan alındığı biçimde kullanılabilir [110]. Doğalgazın motorlarda kullanımı üç farklı alanda incelenebilmektedir [61];

- Doğalgaz motorları
- Mevcut benzinli motorlara doğalgaz uygulaması
- Mevcut dizel motorlara doğalgaz uygulaması

Doğalgaz motorları:

Doğalgaz motorları, sadece doğalgaz ile çalışan ve sadece doğalgaz kullanımı için imal edilmiş motorlardır. Doğalgaz motorları kullanılacak taşıta göre imal edildiğinden dolayı daha uygun motor gereksinimini karşılamaktadır. Mevcut benzin

motorlu ve dizel motorlu taşıtlardaki dönüşümlerine göre daha yüksek güç ve daha düşük yakıt tüketimi elde edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, CNG tüpleri için daha uygun yerin temin edilebilmesi ve yönetim programlarının daha etkin kullanılabilmesi mümkündür. Ancak doğalgaz motorlarının daha yüksek üretim maliyeti gerektirmesi, kat edecekleri mesafenin diğer dönüşüm sistemlerine göre daha düşük olması ve tek yakıt kullanım zorunluluğu hususunda doldurma istasyonlarına bağımlı olmaları gibi olumsuz yönleri de bulunmaktadır [85].

Doğalgaz motorlarının imalatı benzin motorlarının [85] ve dizel motorlarının dönüşümünden de yapılabilmesine rağmen, bu motorların çoğu yeni olarak imal edilmektedir. Doğalgaz motorlarının sıkıştırma oranları 10.5-13.2 arasındadır ve doğalgazın yanmasını sağlamak amacıyla bir ateşleme sistemi kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra doğalgazlı motorlarda aşırı doldurma ve intercooler kullanımları da mevcuttur. En çok bilinen doğalgaz motor üreticileri arasında Cummins, MAN, Volvo ve Iveco gibi firmalar yer almaktadır [111].

Benzin motorlarında doğalgaz kullanımı:

Benzin motorlarının doğalgaz dönüşümünde dört farklı doğalgaz yakıt sistemi kullanılmakta olup, bu sistemler gelişen motor teknolojisine adapte edilerek adlandırılmıştır.

Birinci nesil sistemlerde, doğalgaz emme havasına karıştırılarak silindire gönderilmektedir. Doğalgazın emme havasına karıştırılması işlemi için basit bir ventüri kullanılmaktadır. Katalitik konvertörü bulunmayan ve eski tip karbüratörlü taşıtlarda kullanılan sistemlerdir [85].

İkinci nesil doğalgaz sistemleri, kapalı devre karbüratör kullanılan taşıtlarda ve tek nokta enjeksiyonlu taşıtlarda kullanılabilen sistemlerdir. Bu sistemin kapalı devre lambda kontrolü bulunmaktadır. Yakıt hava karışım ayarı sistem tarafından otomatik olarak yapılabilmektedir. Bu sistemler Euro 1 ve Euro 2 normlarını karşılayabilmektedir [102].

Üçüncü nesil doğalgaz sistemleri, çok nokta enjeksiyon sistemine sahip taşıtlarda kullanılmaktadır. Bu sistemlerde doğalgaz doğrudan emme manifolduna bir enjektör yardımıyla püskürtülmektedir. Üçüncü nesil doğalgaz sistemleri Euro 2 ve Euro 3 normlarını karşılayabilmektedir [88].

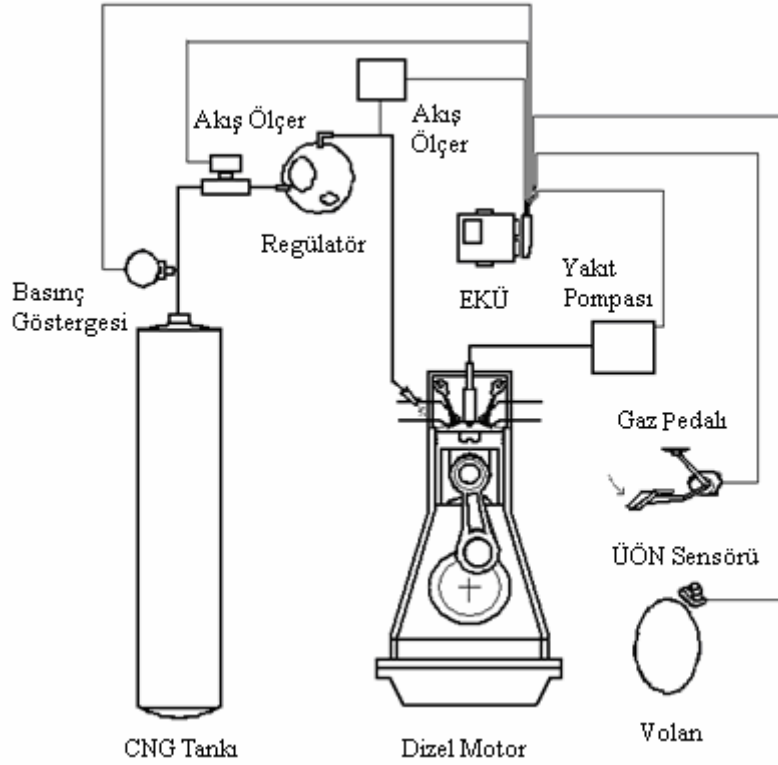
Dördüncü nesil doğalgaz sistemleri, Euro 3 ve Euro 4 normlarını karşılayabilen gelişmiş sistemlerdir. Dördüncü nesil kapalı devre sıralı çok nokta enjeksiyonlu gaz sistemidir [85].

Dizel motorlarında doğalgaz kullanımı:

Dizel motorlarında doğalgaz kullanımı için iki yöntem uygulanmaktadır. Birinci yöntem, dizel motorunun yenileştirme işleminden geçirilmesi ve tek yakıt olarak sadece doğalgazla çalışabilir bir duruma getirilmesidir. Bu yöntemde, dizel motorunun yakıt püskürtme sistemi iptal edilmekte, yerine bir ateşleme sistemi yerleştirilmektedir. Bunun yanı sıra dizel motorunun sıkıştırma oranının düşürülmesi gerekmektedir. Doğalgaz motorunun çalışma koşulları, dönüşümü gerçekleştirilen dizel motorunda yenileştirme işlemi sonrasındaki şartlara göre programlanmaktadır. Doğalgazın dizel motorlarında kullanımı için uygulanan diğer yöntem çift yakıt yöntemidir. Bu yöntemde, dizel motoru hem doğalgazla hem de motorinle çalıştırılmaktadır. Herhangi bir yenileştirme işlemi gerçekleştirilmeyen bu yöntemde, doğalgazın yanması silindire püskürtülen küçük miktardaki pilot dizel yakıtıyla sağlanmaktadır [61]. Sıkıştırma zamanı sonunda püskürtülen pilot dizel yakıtı, sıkıştırma sonu sıcaklığının etkisiyle ilk tutuşma reaksiyonlarını hızlı bir şekilde geliştirerek yanmakta ve ardından silindir içerisindeki doğalgaz-hava karışımını tutuşturur. Çift yakıt sistemlerinin birinci yönteme göre maliyetinin oldukça düşük olması ve istenildiğinde tek yakıtle, istenildiğinde çift yakıtle çalıştırılabilir olması önemli bir avantajdır. Bu nedenle çift yakıt sistemlerinin kullanımı daha çok tercih edilmektedir [85, 88].

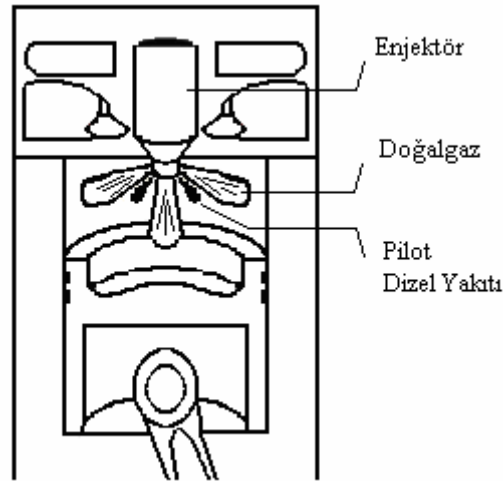
Çift yakıt motorlarının performansları ve emisyon değerleri, motorun çalışma şartlarına ve çift yakıt sisteminin kontrol mekanizmasına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [85]. Çift yakıt sisteminde, doğalgazın emme manifoldu aracılığıyla

emme havasına karıştırılması ve doğrudan yanma odasına püskürtülmesi gibi iki farklı uygulama biçimi bulunmaktadır. Şekil 4.11’de doğalgazın emme havasına püskürtülerek kullanıldığı bir sistemin basitleştirilmiş şekli yer almaktadır.



Şekil 4.11. Çift yakıt sistemi şeması [88]

Sistem CNG tankı, doğalgaz regülatörü, gaz açma-kapama valfi, gaz enjektörü ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Sistemin çalışması, gaz pedalından, volandan, gaz akış ölçerinden, gaz basınç ölçerinden ve yakıt pompasından alınan bilgiler doğrultusunda kontrol ünitesi tarafından gerçekleştirilmektedir. Doğalgazın doğrudan yanma odasına püskürtülerek uygulandığı sistemde çift yakıt enjektörü kullanılmaktadır. Direk püskürtmeli bu sistemin emme havasına karıştırılarak kullanılan doğalgaz sistemine göre tek farkı bu enjektörün kullanılmasıdır. Çift yakıt enjektörünün çalışma biçimi Şekil 4.12’de görülmektedir. Doğalgazın yanması benzer şekilde pilot dizel yakıtı ile gerçekleştirilmektedir. Bu tip enjektörler doğalgazı ve pilot yakıtı doğrudan silindir içerisine püskürtme yeteneğine sahiptir. Bu hususta, ilerleyen teknoloji ile birlikte gelişen kontrol sistemleri motor performans ve emisyonlarında iyileşmeler sağlayabilmektedir [111].



Şekil 4.12. Çift yakıt enjektörünün çalışma biçimi [111]

4.3. Motor Yakıtı Olarak Doğalgaz

Doğalgaz sahip olduğu uygun yakıt özellikleri ile içten yanmalı motorlarda kullanılacak bir yakıttır. Yüksek oktan sayısına sahip olması doğalgazın yüksek sıkıştırma oranlarında dahi motorlarda kullanılmasını sağlamaktadır [83]. Doğalgazın yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına sahip oluşu dizel motorlarında kullanımı için önemli bir özelliktir [17]. Bazı çalışmalarda, doğalgazın sahip olduğu yüksek oktan sayısı nedeniyle efektif verimde iyileşme sağlanabildiği belirtilirken [83, 112], bazı çalışmalarda doğalgazın yavaş yanma hızının ve zayıf yanma yeteneğinin efektif verim değerlerinde azalmaya neden olabildiği ifade edilmektedir [113]. Doğalgaz motorine göre daha geniş yanma oranına sahip bir yakıttır [98]. Kimyasal olarak inert bir gaz olan doğalgazın zehirleyici etkisi yoktur. Özellikle, is ve NO_x emisyonlarının azaltılmasında etkilidir [13, 114]. Doğalgazın CO_2 salınımını azaltıcı bir etkisi bulunmaktadır [13, 115]. Düşük C/H oranına sahip oluşu CO_2 emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır [112].

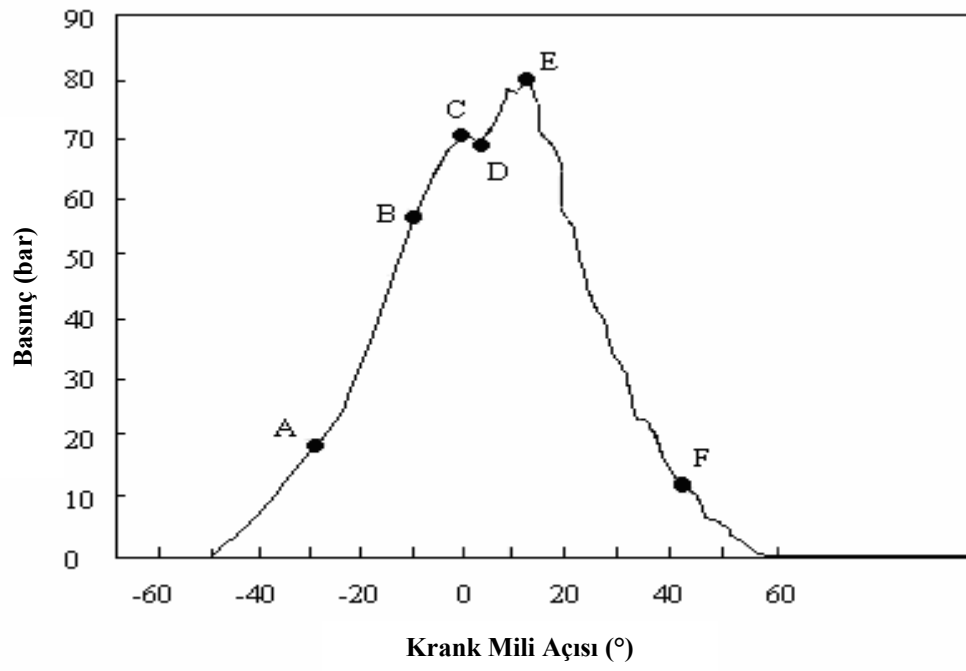
Doğalgazın uygulama biçimi önem taşımaktadır. Emme havasından karıştırılan doğalgaz emme havası kapasitesinin yani volümetrik verimin azalmasına sebep olabilmektedir [98]. Doğalgaz kullanımının bir dezavantajı da dizel motorlarında, yakıt olarak tek başına kullanılamamasıdır. Yanma oluşumunun sağlanabilmesi için mutlaka pilot dizel yakıtına ihtiyaç duyulmaktadır [116]. Çift yakıt kullanımında

doğalgazın önemli bir sorunu CO ve HC emisyonlarında görülen artışlardır. Özellikle düşük motor yüklerinde ve düşük sıcaklıklarda CO ve HC emisyonlarında görülen artışlar doğalgazın çift yakıt olarak kullanımında önemli bir sorundur [13, 85, 114, 117]. Bazı çalışmalarda, özellikle düşük yüklerde hava-yakıt karışımının kötüleştiği, bu durumun tutuşmayı ve yanmayı zorlaştırdığı da ifade edilmektedir [114].

4.3.1. Doğalgazın yanma özellikleri

Standart dizel motorlarında yakıtın yanması dört safhada gerçekleşmektedir. Bu safhalar tutuşma gecikmesi, ani (kontROLSÜZ yanma) yanma, kontrollü yanma ve art (geç) yanma safhalarıdır. Çift yakıt yanma safhaları ise beş kısımdan oluşmaktadır. Pilot yakıtın tutuşma gecikmesi (A-B), pilot yakıtın ön yanma safhası (B-C), ana yakıtın tutuşma gecikmesi (C-D), ana yakıtın ani (kontROLSÜZ) yanması (D-E) ve difüzyon kontrollü yanma (E-F) safhalarıdır [118]. Bu safhalar Şekil 4.13'te yer almaktadır.

Çift yakıt yanmasında elde edilen tutuşma gecikmesi süresi (A-B) standart dizel yanmasına göre daha uzundur. Bunun nedeni gaz yakıt konsantrasyonunun silindir içi oksijen miktarını azaltmasıdır. Ön yanma safhasında (B-C) çift yakıt yanmasında elde edilen basınç artış oranı standart dizel yanmasına göre biraz daha düşüktür. Bu durum, gaz yakıtın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek oluşu ve gaz yakıtın tutuşma gecikmesinin artması nedeniyle ve birinci-ikinci basınç artış oranlarının gelişimi arasındaki zamanın sınırlı oluşundan kaynaklanmaktadır. Ana yakıtın tutuşma gecikmesinde (C-D) fumige edilmiş gazın gerçek yanması başlayınca kadar basıncın bir miktar düştüğü görülmektedir. Pilot yakıtın yanması ve ana yakıtın yanmaya başlaması esnasında (D-E) alev yayılımı oldukça düzensizdir. Difüzyon kontrollü yanma safhası (E-F) hızlı basınç artışının sonunda başlamakta ve genişlemeye kadar devam etmektedir. Bu durum gaz yakıtların yavaş yanması ve pilot yakıtın seyrelmesinden dolayı gerçekleşmektedir. Bu safhalarda gaz-hava karışımının düşük oksijen konsantrasyonu, supap bindirmesi, alevin silindir cidarında ve segman boşluklarında sönmeye gibi nedenlerle yanma, tutuşma ve kaçak sorunları olabilmektedir. Bu safhanın başarısı öncelikle tutuşma gecikmesinin uzunluğuna bağlıdır [118].



Şekil 4.13. Doğalgazlı çift yakıt yanma safhaları [118]

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylere başlamadan önce, tek silindirli dizel motoru, doğalgaz-pilot yakıt kullanılabilir şekilde çift yakıtla çalışabilir duruma getirilmiş ve deney düzeneği oluşturulmuştur. Daha sonra, motorin ile ve çift yakıt yöntemiyle doğalgaz-motorin kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çift yakıt yöntemiyle motorin yerine pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve doğalgaza fumigasyon yöntemiyle diglyme katkısı uygulaması ile ilgili deneyler yapılmıştır.

5.1. Materyal

5.1.1. Deney yakıtları

Deney yakıtları olarak, motorin, doğalgaz (CNG), biyodizel (soya yağı metil esteri) ve diglyme (DGM) kullanılmıştır.

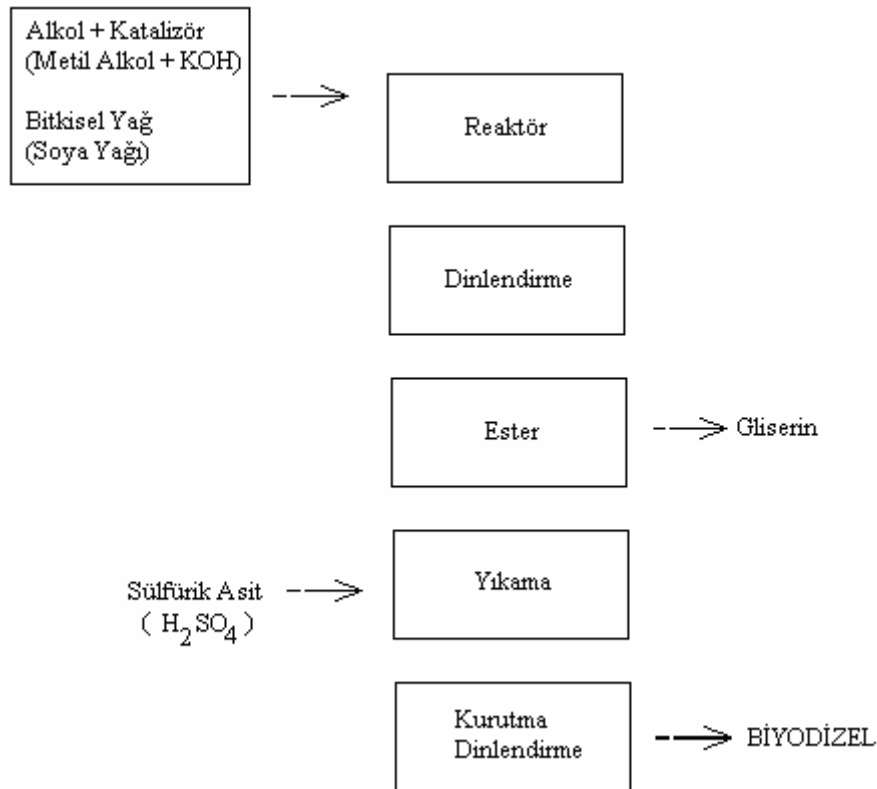
Deneylerde kullanılan doğalgaz yakıtı, Bayrampaşa/İstanbul'da bulunan bir CNG dolum istasyonundan temin edilmiştir. Tablo 5.1'de, deneylerde kullanılan doğalgazın yakıt özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan doğalgazın yakıt özellikleri*

Sıvılaştırma noktası	-163 °C
İzafi Yoğunluk (hava = 1.2931 kg/m ³)	0.6
Sıvı gazın yoğunluğu (su = 1)	0.44
Kritik nokta	-180 °C
Tutuşma noktası	630 °C
Yanma aralığı	% 5 - % 15
Teorik Yanma sıcaklığı	1960 °C
Maksimum yanma hızı (havada)	0.34 m/s
Üst ısıl değeri (kJ /m ³)	40993
Alt ısıl değeri (kJ /m ³)	33913

*İGDAŞ'tan alınan değerlerin ortalaması

Deneylerde kullanılan biyodizel, rafine soya yağından üretilmiştir. Biyodizelin üretim işlemi, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de, biyodizelin üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 5.1. Biyodizel üretim aşamaları

Biyodizel üretiminde, 10 lt rafine yağ için katalizör madde olarak 35 g KOH ve 2 lt metil alkol kullanılmıştır. Rafine soya yağı reaktöre konulmuş ve 1200 d/d’da karıştırılarak 70 °C’ye kadar ısıtılmıştır. Bu esnada, ayrı bir kaptaki metil alkol içerisinde KOH çözündürülmüştür. Ardından, sıcaklığı 70 °C’ye ulaşan soya yağı içerisine, metil alkol ve KOH bileşimi dökülerek 1 saat karıştırılmıştır. 1 saat sonunda elde edilen karışım, ayrı bir hazneye alınarak dinlenmeye bırakılmıştır. Dinlenme sonunda, çöken gliserin karışımdan ayrılmıştır. Gliserinden ayrılarak metil ester haline dönüştürülen karışım, yıkama fazına alınmıştır. Yıkama fazında, karışıma 1:1 ölçüde saf su eklenmiştir. Saf su ve metil ester karışımının içerisine, bir hava motoru yardımıyla hava üfleme uygulanmıştır. Bu esnada karışımın pH değeri kontrol edilmiş ve pH 7 olacak şekilde karışımın içerisine sülfürik asit (H₂SO₄) ilave

edilmiştir. Hava üfleme işlemi, 10-12 saat sürmüştür. Bu süre sonunda, dinlenmeye alınan metil ester-saf su karışımının üç faza ayrıldığı görülmüştür. En üstte biyodizel, ortada bir miktar sabun ve en alt tabakada saf su elde edilmiştir. Dinlenmenin ardından, biyodizel ayrı bir hazneye alınmış ve kurutma işlemine geçilmiştir. Kurutma işleminde, biyodizel yaklaşık 1 saat süresince 100 °C’de kaynatılmıştır. Kurutma işlemi gerçekleştirilen biyodizel, soğumaya bırakılarak deney motorunda kullanılabilir hale getirilmiştir.

Üretilen biyodizelden alınan numune, ODTÜ Petrol Araştırma Merkezinde analiz edilmiştir. Tablo 5.2’de biyodizel ve motorine ait bazı yakıt özellikleri sunulmuştur.

Tablo 5.2. Biyodizel ve motorinin özellikleri

ÖZELLİKLER	BİYODİZEL	MOTORİN*
Kinematik vizkozite 40°C’de (cst)	5.57	3.25
Alt ısıl değer (kJ/kg)	37034	42705
Yoğunluk 15°C’de (kg/lt)	0.8859	0.84
Alevlenme noktası (°C)	208	55

*TÜPRAŞ

Deneylerde, %99 saflık oranında, Merck marka DGM kullanılmıştır. Tablo 5.3’te DGM’nin yakıt özellikleri yer almaktadır.

Tablo 5.3. Diglyme (DGM) özellikleri [119]

Yoğunluk (g/cm ³)	0.94
Alt ısıl değer (kJ/kg)	24500
Kaynama noktası(°C)	161
Buharlaşma ısısı (kJ/kg)	322
Setan sayısı	126
Stokiometrik hava/yakıt oranı	11.24/1
Oksijen içeriği (ağırlıkça %)	35.8

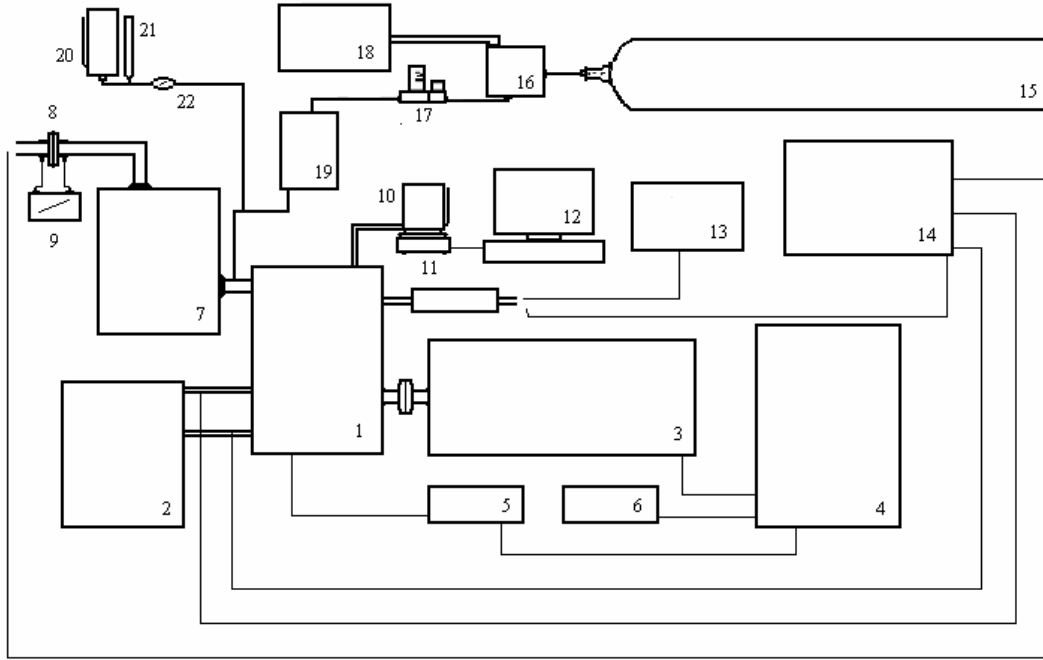
5.1.2. Deney düzeneği ve kullanılan cihazlar

5.1.2.1. Deney düzeneği

Motor deneyleri, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Anabilim dalı laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği; dizel motor, yakıt sistemleri ve kontrol sistemleri olarak üç kısımdan oluşmuştur. Yakıt sistemleri, doğalgaz için kurulan çift yakıt sisteminden ve katkı maddesi uygulamaları için kurulan, ilave hazne ve akış kontrol mekanizmasından oluşmaktadır. Deney düzeneği kontrol sistemi ise, dinamometre ve ölçüm mekanizmalarından meydana gelmektedir. Şekil 5.2’de deney düzeneği ve kontrol mekanizmalarının genel görünüşü, Şekil 5.3’te ise deney düzeneğinin şeması yer almaktadır.



Şekil 5.2. Deney düzeneği ve kontrol mekanizmalarının genel görünüşü



1. Dizel motor, 2. Soğutma kulesi, 3. Dinamometre, 4. Dinamometre paneli, 5. Motor devri ve motor yük kontrol mekanizması, 6. Dinamometre kontrol mekanizması, 7. Hava sönümleme tankı, 8. Orifis plakası, 9. Eğik manometre, 10. Yakıt tankı, 11. Hassas terazi, 12. Bilgisayar, 13. Egzoz gazı analiz cihazı, 14. Sıcaklık, devir ve yük göstere paneli, 15. CNG tankı, 16. Regülatör, 17. Doğalgaz akış ölçeri, 18. Regülatör ısıtma tertibatı, 19. Doğalgaz sönümleme tankı, 20. İlave yakıt tankı, 21. Ölçekli beher, 22. İlave yakıt akış kontrol valfi

Şekil 5.3. Deney düzeneği şeması

5.1.2.2. Deney motoru

Deneylerde Super Star marka tek silindirli, direk püskürtmeli, doğal emişli ve su soğutmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Tablo 5.4'te deney motorunun teknik özellikleri, Şekil 5.4'te ise deney motorunun görünüşü yer almaktadır.

Tablo 5.4. Deneylerde kullanılan dizel motorunun teknik özellikleri

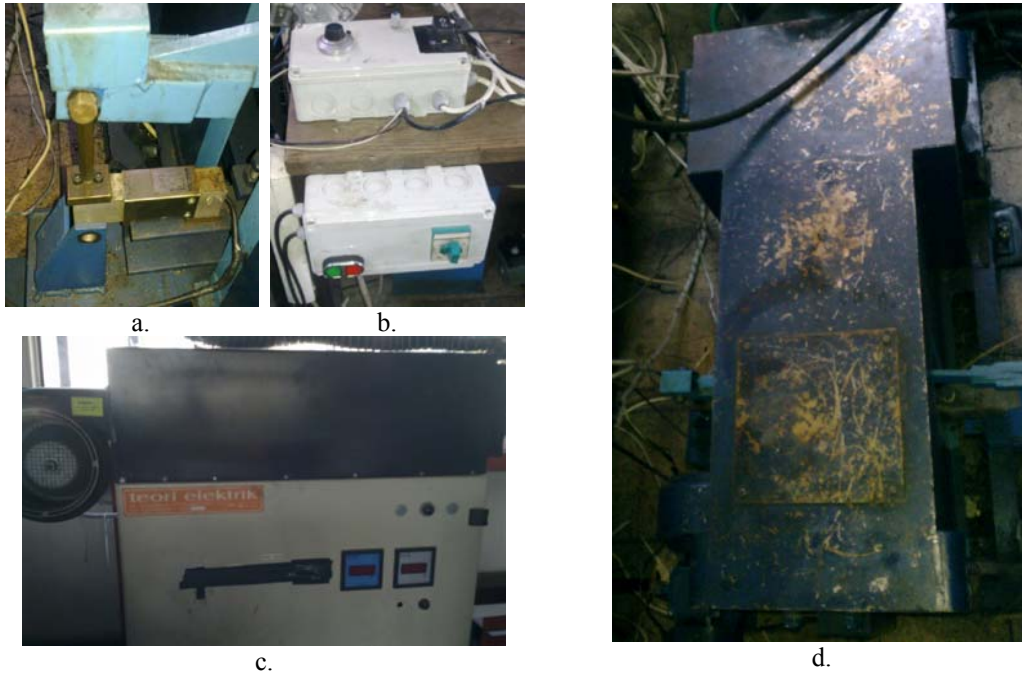
Marka ve model	Super Star
Çalışma prensibi	4 zamanlı, su soğutmalı, direk enjeksiyonlu
Silindir sayısı	1
Silindir çapı (mm)	108
Silindir yüksekliği (mm)	100
Sıkıştırma oranı	17/1
Maksimum Motor gücü (kW)	16 BG (11.7 kW)
Püskürtme avansı ($^{\circ}$ KMA)	28



Şekil 5.4. Deney motoru

5.1.2.3. Dinamometre

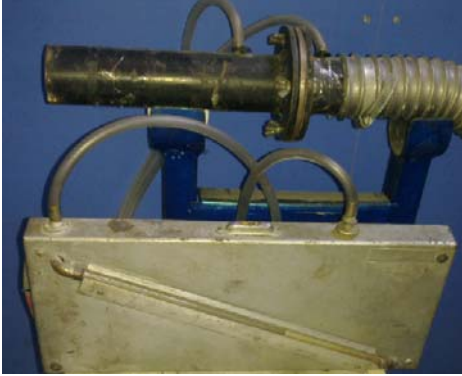
Deneysel, elektrikli bir dinamometre kullanılmıştır. Kuvvet ölçümü, dinamometre ile bağlantılı bir yük hücresi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Motor devrinin ölçümü, dinamometre çıkışına bağlı bir devir sensörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5'te deneylerde kullanılan dinamometrenin genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 5.5. Elektrikli dinamometre (a. Yük hücresi ve moment kolu, b. Motor devri ve dinamometre yük kontrol mekanizmaları, c. Dinamometre paneli, d. Dinamometre gövdesi)

5.1.2.4. Hava debi ölçeri

Deneyleyler esnasındaki hava tüketiminin ölçümü için, 0–75 mm su sütunu olarak taksimatlandırılmış eğik manometre ve bir orifis plakası kullanılmıştır. Bunun yanı sıra, daha etkin bir ölçüm gerçekleştirilebilmesi amacıyla motor ve ölçüm tertibatı arasına bir hava sönümleme tankı yerleştirilmiştir (Şekil 5.6).



a.



b.

Şekil 5.6. Hava debi ölçeri (a. Orifis ve eğik manometre, b. Hava sönümleme tankı)

5.1.2.5. Yakıt tüketimi ölçümü

Yakıt tüketiminin belirlenebilmesi için, CAS marka 3 kg kapasiteli ve 0.1 g hassasiyetinde ölçüm yapabilen, hassas bir terazi kullanılmıştır (Şekil 5.7). Hassas terazi ile elde edilen bilgiler, bir program vasıtasıyla, anlık yakıt tüketimini veya toplam yakıt tüketimini gösterecek şekilde, bilgisayara aktarılabilir.



Şekil 5.7. Hassas terazi ve yakıt tankı

5.1.2.6. Çift yakıt sistemi

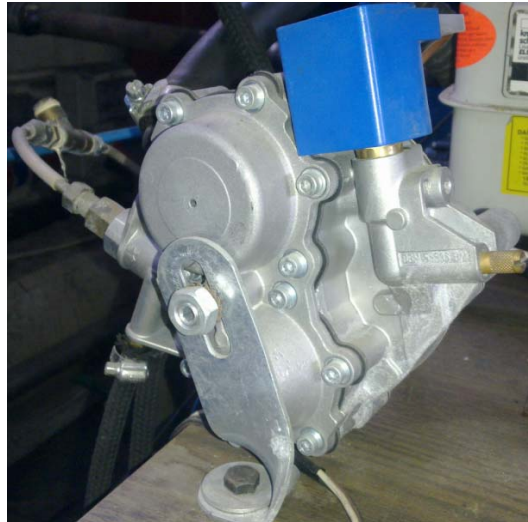
Doğalgazın dizel motorunda kullanılması için kurulan çift yakıt sistemi; CNG tankı, basınç regülatörü, regülatör ısıtma sistemi, gaz akış ölçer ve CNG sönümleme tankından oluşmaktadır.

Çift yakıt sisteminde kullanılan CNG tankının görünüşü Şekil 5.8’de verilmektedir. CNG tankı, yaklaşık 220 bar basınçta gaz dolumu gerçekleştirilebilen bir yapıdadır. Tank gövdesi, açma-kapama valfi ve basınç göstergesi olarak üç kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 5.8. CNG tankı

Basınç regülatörü, CNG tankında yüksek basınçta depolanan doğalgazın, sistemde kullanılabilir uygun basınç değerine düşürülmesini sağlamaktadır. Şekil 5.9’da basınç regülatörünün görünüşü yer almaktadır.



Şekil 5.9. Basınç regülatörü

Deneyler esnasında, motora gönderilen doğalgaz miktarının ölçülebilmesi için, Alicat Scientific marka bir akış ölçer kullanılmıştır. 0.01 lt/d hassasiyetinde ölçüm gerçekleştirilebilen akış ölçerin, akış ayarlama özelliği bulunmaktadır. Üzerinde bulundurduğu oransal vana ile, istenilen değerde doğalgaz akışı sağlanabilmektedir. Deneylerde kullanılan akış ölçerin görünüşü Şekil 5.10'da yer almaktadır.



Şekil 5.10. Doğalgaz akış ölçeri

Deney motorunun tek silindirli oluşu, hava akışında olduğu gibi, gaz hattında da darbeli bir emiş oluşturmaktadır. Bu nedenle, akış darbesini önlemek ve ölçüm cihazına yansımaları engellemek amacıyla, hava akışında olduğu gibi bir sönümleme tankı kullanılmıştır (Şekil 5.11).



Şekil 5.11. Doğalgaz sönümleme tankı

5.1.2.7. İlave yakıt sistemi

Deneyleyler esnasında, farklı oranlarda kullanılacak DGM katkısının, fumigasyon yöntemiyle doğalgaza karıştırılması için ilave yakıt sistemi oluşturulmuştur (Şekil 5.12). Sistem; ilave yakıt haznesi, ilave yakıt tüketiminin belirlenebilmesi için kullanılan ölçekli beher ve akış valfinden oluşmaktadır. Bunun yanı sıra ilave yakıt tüketiminin kontrolü için dijital bir kronometre kullanılmıştır.



a.



b

Şekil 5.12. İlave yakıt sistemi (a. İlave yakıt haznesi ve ölçekli beher, b. İlave yakıt akış kontrol valfi)

5.1.2.8. Sıcaklık göstergeleri ve termokupllar

Şekil 5.13'te sıcaklık gösterge paneli yer almaktadır.



Şekil 5.13. Sıcaklık kontrol paneli

Deneyleer esnasında, egzoz gazı sıcaklığı, motor soğutma suyu giriş sıcaklığı, motor soğutma suyu çıkış sıcaklığı ve emme havası sıcaklığı ölçülmüştür. Egzoz gazı sıcaklıklarının belirlenmesinde 1 °C hassasiyetinde, diğeer sıcaklıkların belirlenmesinde ise 0.1 °C hassasiyetinde K tipi termokupllar kullanılmıştır.

5.1.2.9. Egzoz emisyon cihazı

Deneyleer esnasında ortaya çıkan egzoz emisyonlarının belirlenebilmesi için, MRU Delta 1600 L marka bir emisyon cihazı kullanılmıştır. Analizlerde, egzoz emisyonları % ve ppm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.14'te egzoz emisyon cihazının genel görünüşü, Tablo 5.5'te ise ölçümü gerçekleştirilen emisyonlar ve emisyon cihazının özellikleri yer almaktadır.



Şekil 5.14. Egzoz emisyon cihazı

Tablo 5.5. Ölçümü gerçekleştirilen emisyonlar ve egzoz emisyon cihazının özellikleri

Kirletici Bileşen	Ölçüm şekli	Ölçüm aralığı	Ölçüm Hassasiyeti
HC	ppm	0-20000	± 12 ppm veya ölçümün ± % 5'i
CO	% - hacimsel	0-15	± %0.06 veya ölçümün ± % 5'i
CO ₂	% - hacimsel	0-20	± %0.5 veya ölçümün ± % 5'i
NO	ppm	0-2000	± 5 ppm veya ölçümün ± % 5'i

5.2. Deneysel Yöntem

Deneyleer, dizel motorunun standart çalışma şartları (enjeksiyon basıncı, sıkıştırma oranı, avans, supap ayarı vb.) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneyleere

başlamadan önce, deney motorunun bir süre çalıştırılarak, rejim sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Deney motoru, tam yük değişik devir (TY) ve sabit devir değişik yük (kısmi yük) deneylerine tabi tutulmuştur. Tam yük şartlarındaki deneyler 1200, 1400, 1600, 1800, 2000 ve 2200 d/d'lerde gerçekleştirilmiştir. Kısmi yük şartlarındaki deneyler için tam yük deneyleri ile belirlenen, standart dizel motorunda en yüksek motor döndürme momentinin ve en düşük özgül yakıt tüketiminin elde edildiği 1400 d/d, en yüksek efektif motor gücünün elde edildiği 2200 d/d ve bu iki devir arasında yer alan 1800 d/d dikkate alınmıştır. Kısmi yükte gerçekleştirilen deneyler, belirlenen bu devirlerde, standart dizel motoruyla elde edilen yük değerlerinin %20, %40, %60, %80'i referans alınarak yapılmıştır.

Öncelikle, motorin yakıtı kullanılarak deneyler yapılmış ve motorun standart değerleri belirlenmiştir. Daha sonra, aynı deney şartlarında çift yakıt olarak doğalgaz-motorin kullanılarak (standart çift yakıt) deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler incelenerek, doğalgaz kullanımından kaynaklanan sorunlar ve bu sorunların olduğu çalışma koşulları belirlenmiştir. Daha sonra, bu sorunlu çalışma koşullarında, çift yakıt yönteminde motorin yerine pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve doğalgaza fumigasyon yöntemiyle DGM katkısı uygulamaları ile ilgili deneyler yapılmıştır. Deneyler, aynı yakıtlarla üç kez tekrar edilmiştir. Sonuçlar grafikler yardımıyla karşılaştırmalı olarak yorumlanarak sunulmuştur.

5.2.1. Deneysel tasarım

Gerçekleştirilen deneylerde yer alan çok sayıda değişkenin birbiriyle etkileşiminin ve bu değişkenlerin motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonlarında meydana getirdiği etkilerinin yorumlanmasını kolaylaştırmak amacıyla, bir deneysel tasarım yönteminden faydalanılmıştır. Deneyler genel olarak üç farklı değişkenden oluşmaktadır. Bunlar; motor yükü, motor devri ve kullanılan doğalgaz uygulamasındaki orandır. Aynı zamanda, bu değerlerin her biri, kullanılan deney yakıtları ile bağlantılıdır. Bu nedenle çalışma her bir deney için, yakıt türü, motor yükü, motor devri ve doğalgaz oranı değişkenlerini içermektedir. Bu değişkenlerin her biri için özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi, efektif verim, HC, CO, CO₂, NO ve egzoz gaz sıcaklığı üzerindeki etkilerin irdelenmesi söz konusudur.

Gerçekleştirilen deneysel tasarım, ANOVA (varyans analizi) ve S/N değerlerinin belirlenmesinden oluşmaktadır. Ortogonal dizi içerisindeki tüm parametrelerin ve tüm verilerin birbirleri ile etkileşimleri, deney değişkenlerinin (yakıt türü, motor yükü, motor devri ve doğalgaz oranı faktörleri) motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri ve güven aralıklarının belirlenebilmesi için ANOVA (varyans analizi) uygulanmıştır. Etkinlik düzeylerinin belirlenebilmesi için ise S/N (sinyal / gürültü) oranları belirlenmiştir. S/N oranı tanımlamasında üç farklı kriter bulunmaktadır. Bu kriterler elde edilen sonuçların yorumlama biçimlerini ifade etmektedir. Düşük olan sonuçlar en iyidir, nominal olan sonuçlar en iyidir ve en yüksek olan sonuçlar en iyidir şeklinde tanımlanan bu kriterler, S/N değerlerinin oluşturulması ve deney sonuçlarının yorumlanması açısından tanımlayıcıdır.

S/N oranının hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

$$\text{Yüksek sonuçlar en iyidir için, } S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5.1)$$

$$\text{Düşük sonuçlar en iyidir için, } S / N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5.2)$$

n = Deneyin tekrar sayısı

y_i = Ölçüm değerleri

i = Ortogonal dizideki tasarım parametrelerinin sayısı

ANOVA tablosunun oluşumunda aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

$$SS_T = \left[\sum_{i=1}^N (S / N)_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.3)$$

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.4)$$

$$V_{\text{toplam}} = N - 1 \quad (5.5)$$

$$V_{\text{faktör}} = \frac{SS_{\text{faktör}}}{v_{\text{faktör}}} \quad (5.6)$$

$$F_{faktör} = \frac{V_{faktör}}{V_{hata}} \quad (5.7)$$

SS_T = Varyasyonların kareler toplamı

SS_A = A faktörünün kareler toplamı

K_A = A faktörünün seviyelerinin sayısı

A_i = A'nın i. seviyelerinin toplamı

n_{Ai} = A faktörünün i. seviyesi için numune sayısı

T = Deneylelerdeki S/N oranlarının toplamı

$V_{toplama}$ = Serbestlik derecesi

$V_{faktör}$ = Faktörlerin varyansı

$SS_{faktör}$ = Faktörlerin kareler toplamı

$F_{faktör}$ = Faktörlerin F değeri

Çalışmada, efektif verim en yüksek olan en iyidir kriteri ile, özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi değerleri ile HC, CO, CO₂, NO emisyonları ise en düşük olan en iyidir kriteri tanımlanmaktadır. Bu şartlarda çift yakıt yöntemiyle doğalgaz-motorin yakıtlarının kullanımı (standart çift yakıtlar) ile elde edilen ANOVA değerleri (motor devri, motor yükü ve doğalgaz oranlarından oluşan üç faktör) Tablo 5.6'da, pilot yakıt değişimi ve katkı maddesi uygulamaları ile elde edilen ANOVA değerleri (yakıt türü, motor devri, motor yükü ve doğalgaz oranlarından oluşan dört faktör) ise Tablo 5.7'de sunulmuştur.

Tablo 5.6. Çift yakıt yöntemiyle doğalgaz-motorin yakıtlarının kullanımı sonucu elde edilen ANOVA tablosu

	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı (S)	Serbestlik Derecesi (f)	Kareler Ortalaması	F _{teorik}	F _{istatistiksel}
ÖYT	[A]Motor devri	10.53	2	5.26	11.21	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	419.58	4	104.89	223.36	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	47.46	4	11.87	25.27	3.65 ^a
	Toplam	477.56	10.00	122.02		
	e	30.06	64.00	0.469609814		
ÖET	[A]Motor devri	11.44	2	5.72	37.19	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	403.95	4	100.99	656.55	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	12.46	4	3.11	20.25	3.65 ^a
	Toplam	427.85	10.00	109.82		
	e	9.84	64.00	0.153816911		
EFEKTİF VERİM	[A]Motor devri	11.44	2	5.72	37.19	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	403.95	4	100.99	656.55	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	12.46	4	3.11	20.25	3.65 ^a
	Toplam	427.85	10.00	109.82		
	e	9.84	64.00	0.153816911		
HC	[A]Motor devri	284.99	2	142.50	42.12	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	95.32	4	23.83	7.04	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	5174.74	4	1293.68	382.38	3.65 ^a
	Toplam	5555.04	10.00	1460.01		
	e	216.53	64.00	3.383212213		
CO	[A]Motor devri	110.00	2	55.00	4.79	3.93 ^b
	[B] Motor yükü	357.69	4	89.42	7.79	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	613.70	4	153.42	13.36	3.65 ^a
	Toplam	1081.39	10.00	297.85		
	e	734.97	64.00	11.48395211		
CO ₂	[A]Motor devri	11.84	2	5.92	68.87	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	1007.55	4	251.89	2929.32	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	42.28	4	10.57	122.93	3.65 ^a
	Toplam	1061.68	10.00	268.38		
	e	5.50	64.00	0.085988675		
NO	[A]Motor devri	64.91	2	32.46	10.59	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	1111.73	4	277.93	90.68	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	38.37	4	9.59	3.13	2.18 ^c
	Toplam	1215.01	10.00	319.98		
	e	196.15	64.00	3.064863684		
EGZOZ GAZI SICAKLIĞI	[A]Motor devri	66.26	2	33.13	1018.30	4.98 ^a
	[B] Motor yükü	631.18	4	157.79	4849.72	3.65 ^a
	[C] CNG oranı	4.08	4	1.02	31.32	3.65 ^a
	Toplam	701.52	10.00	191.95		
	e	2.08	64.00	0.032536826		

^a%99 Güven aralığı^b%97.5 Güven aralığı^c%90 Güven aralığı

Tablo 5.7. Pilot yakıt değişimi ve katkı maddesi uygulamalarıyla elde edilen ANOVA tablosu

	Değişim Kaynağı	Kareler Toplamı (S)	Serbestlik Derecesi (f)	Kareler Ortalaması	F _{teorik}	F _{istatistiksel}
ÖYT	[A]Yakıt türü	27.09	4	6.77	96.44	3.48 ^a
	[B]Motor devri	18.43	2	9.21	131.19	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	723.86	2	361.93	5153.50	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	0.97	2	0.49	6.91	4.79 ^a
	Toplam	770.35	10.00	378.40		
e	8.71	124.00	0.070229526			
ÖET	[A]Yakıt türü	2.34	4	0.59	8.29	3.48 ^a
	[B]Motor devri	18.96	2	9.48	134.16	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	723.58	2	361.79	5120.72	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	18.11	2	9.06	128.18	4.79 ^a
	Toplam	763.00	10.00	380.91		
e	8.76	124.00	0.070652418			
EFEKTİF VERİM	[A]Yakıt türü	2.34	4	0.59	8.29	3.48 ^a
	[B]Motor devri	18.96	2	9.48	134.16	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	723.58	2	361.79	5120.72	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	18.11	2	9.06	128.18	4.79 ^a
	Toplam	763.00	10.00	380.91		
e	8.76	124.00	0.070652418			
HC	[A]Yakıt türü	750.63	4	187.66	91.95	3.48 ^a
	[B]Motor devri	256.03	2	128.01	62.72	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	581.24	2	290.62	142.40	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	1656.38	2	828.19	405.80	4.79 ^a
	Toplam	3244.27	10.00	1434.48		
e	253.07	124.00	2.0409026			
CO	[A]Yakıt türü	68.42	4	17.10	21.05	3.48 ^a
	[B]Motor devri	57.90	2	28.95	35.63	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	223.89	2	111.94	137.78	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	371.77	2	185.89	228.79	4.79 ^a
	Toplam	721.98	10.00	343.88		
e	100.75	124.00	0.812495798			
CO ₂	[A]Yakıt türü	20.40	4	5.10	47.44	3.48 ^a
	[B]Motor devri	30.53	2	15.26	141.97	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	734.67	2	367.33	3416.46	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	19.67	2	9.84	91.49	4.79 ^a
	Toplam	805.27	10.00	397.54		
e	13.33	124.00	0.107519267			
NO	[A]Yakıt türü	76.48	4	19.12	16.53	3.48 ^a
	[B]Motor devri	170.54	2	85.27	73.73	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	997.78	2	498.89	431.38	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	22.43	2	11.21	9.70	4.79 ^a
	Toplam	1267.23	10.00	614.50		
e	143.41	124.00	1.156511698			
EGZOZ GAZI SICAKLIĞI	[A]Yakıt türü	2.43	4	0.61	16.97	3.48 ^a
	[B]Motor devri	128.24	2	64.12	1793.64	4.79 ^a
	[C]Motor yükü	438.38	2	219.19	6131.61	4.79 ^a
	[D]CNG oranı	3.84	2	1.92	53.76	4.79 ^a
	Toplam	572.89	10.00	285.84		
e	4.43	124.00	0.035747556			

^a%99 Güven aralığı

5.2.2 Belirsizlik analizi

Kullanılan cihazların hassasiyetleri ve ölçüm esnasında meydana gelen farklılıklar, deneylerdeki belirsizliği meydana getirmektedir. Bu hususta, deney sonuçlarının doğruluğu açısından belirsizlik analizinin yapılması gerekmektedir.

Çalışmada gerçekleştirilen belirsizlik analizi, ölçümden kaynaklanan belirsizlikler (rastgele belirsizlik) ve kullanılan cihazlardan kaynaklanan belirsizlikler (sistemik belirsizlik) dikkate alınarak yapılmıştır. Hesaplanan rastgele ve sistemik belirsizliklerden ise toplam belirsizlik hesaplanmıştır. Belirsizlik hesaplarında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

Tek değişken içeren ve n tekrarlı ölçümün ortalaması;

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.8)$$

x_m = n tekrarlı ölçümün ortalaması

n = Yapılan tekrar sayısı

Tek değişken içeren ve n tekrarlı ölçümün standart sapması;

$$\sigma = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n d_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.9)$$

σ = n tekrarlı ölçümün standart sapması

Tek değişken içeren ve N tekrarlı ölçüm için ortalamadaki belirsizlik;

$$S_x \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (5.10)$$

S_x = N tekrarlı ölçümün ortalama belirsizliği ya da ortalamanın standart hatası

Sistemik belirsizliğin olmadığı durumlarda sonlu sayıdaki verinin ortalaması;

$$x_i = \bar{x}_m \pm t_{v,99} S_x = \bar{x}_m \pm P_{xi} \quad (5.11)$$

x_i = Sonlu sayıdaki veri ortalaması

$t_{v,99} S_x$ = Ölçümün ortalamasındaki rastgele belirsizlik

P_{xi} = Güvenirlilik aralığındaki kesinlik

v = Serbestlik derecesi, ($v = N - 1$)

Birden fazla değişken içeren parametrelerin belirsizliği (u_r), sistemik belirsizliğin (S_x) ve rastgele belirsizliğin (R_x) bir fonksiyonudur ve aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır;

$$u_r = (R_{x1}, R_{x2}, \dots, R_{xm}, S_{x1}, S_{x2}, \dots, S_{xm}) \quad (5.12)$$

Ölçümün rastgele belirsizliği;

$$R_x = \left(\sum_{i=1}^N (\theta_i R_{xi})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.13)$$

Sistemik belirsizlik;

$$S_x = \left(\sum_{i=1}^N (\theta_i S_{xi})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.14)$$

Toplam belirsizlik;

$$u_r = \pm [S_x^2 + (t_{v,99} R_x)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5.15)$$

θ = Duyarlılık indeksi

Çalışmadaki sistematik belirsizlikler ve hesaplanan toplam belirsizlikler Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.8. Sistematik ve toplam belirsizlikler

Paremetreler	Sistematik Belirsizlikler, ±
Yük, N	0.1
Motor devri, (d/d)	1
Zaman, s	0.01
Sıcaklık (egzoz gazı), °C	1
Sıcaklık (soğutma suyu), °C	0.1
Yakıt tüketimi, g	0.1
HC, ppm	± 12 ppm ya da ölçümün ± % 5’i
CO, %	± %0.06 ya da ölçümün ± % 5’i
CO ₂ , %	± %0.5 ya da ölçümün ± % 5’i
NO, ppm	± 5 ppm ya da ölçümün ± % 5’i
	Toplam Belirsizlikler, ±
Efektif motor gücü	% 1.1
Özgül yakıt tüketimi (motorin için, g/kWh)	% 1.2
Efektif verim (motorin için, %)	% 1.2
Efektif verim (std. çift yakıt için, %)	% 1.3
Efektif verim (F-DGM için, %)	% 1.5

5.3. Hesaplama Yöntemleri

5.3.1. Motor döndürme momenti ve efektif güç

Motor döndürme momenti ve efektif gücün belirlenebilmesi, elektrikli bir dinamometre aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Motor döndürme momentinin ve efektif motor gücünün hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikler kullanılmıştır;

$$Md = F \times l \quad (5.16)$$

$$P_e = \frac{F \times l \times n}{9549.3} \quad (5.17)$$

Md	= Döndürme momenti (Nm)
P _e	= Efektif güç (kW)
n	= Motor devri (d/d)
F	= Fren kuvveti (N)
l	= Moment kolu uzunluğu (m)

5.3.2. Özgül yakıt tüketimi ve özgül enerji tüketimi

Deneylerde, standart dizel motoruna ait yakıt tüketimi değerlerinin belirlenebilmesi için hassas terazi kullanılmıştır. Çift yakıt sistemindeki yakıt tüketimi ölçümleri için doğalgaz akış ölçeri, fumige DGM katkısı kullanımındaki yakıt tüketimlerinin belirlenebilmesi için ise ölçekli beher ve kronometre kullanılmıştır.

Deneyler sonucunda, özgül yakıt tüketimi değerlerinin belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$\dot{OYT} = \frac{3600 \times \dot{m}_y}{P_e} = \frac{3600 \times (\dot{m}_m + \dot{m}_{cng} + \dot{m}_k)}{P_e} \quad (5.18)$$

Deneyler sonucunda, özgül enerji tüketimi değerlerinin belirlenebilmesi için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$\dot{OET} = \frac{3.6 \times \dot{m}_y \times Hu}{P_e} = \frac{3.6 \times [(\dot{m}_m \times Hu_m) + (\dot{m}_{cng} \times Hu_{cng}) + (\dot{m}_k \times Hu_k)]}{P_e} \quad (5.19)$$

ÖYT	= Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
ÖET	= Özgül enerji tüketimi (kJ/kWh)
\dot{m}_y	= Yakıt tüketimi (g/s)
\dot{m}_m	= Motorin tüketimi (g/s)
\dot{m}_{cng}	= Doğalgaz tüketimi (g/s)
\dot{m}_k	= İlave yakıt tüketimi (g/s)
Hu	= Alt ısı değer (kJ/kg)

Hu_m = Motorinin alt ısı değeri (kJ/kg)

Hu_{cng} = Doğalgazın ısı değeri (kJ/kg)

Hu_k = İlave yakıtın ısı değeri (kJ/kg)

5.3.3. Efektif verim

Efektif verim değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$\eta_e = \frac{10^3 \times P_e}{\dot{m}_y \times Hu} = \frac{10^3 \times P_e}{[(\dot{m}_m \times Hu_m) + (\dot{m}_{cng} \times Hu_{cng}) + (\dot{m}_k \times Hu_k)]} \quad (5.20)$$

η_e = Efektif verim

BÖLÜM 6. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalarda öncelikle, motorin yakıtıyla ve çift yakıt olarak doğalgaz-motorin kullanımı ile, tam yük değişik devir (TY) ve sabit devir değişik yük (kısmi yük) deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tam yük şartlarında (1200 d/d - 2200 d/d arasında 200 d/d aralıklı olarak) en düşük özgül yakıt tüketimi, en yüksek efektif güç ve en yüksek motor döndürme momenti değerlerinin elde edildiği devirler belirlenmiştir. Tespit edilen bu motor devirlerinden kısmi yük deneyleri için 1400 d/d, 1800 d/d ve 2200 d/d'ler dikkate alınmıştır. Daha sonra, çift yakıt yöntemiyle doğalgaz kullanımından kaynaklanan olumsuzlukların meydana geldiği çalışma koşullarında, motorin yerine pilot biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarına ait deneyler yapılmıştır. Bu deneyler, doğalgaz kullanımından kaynaklanan olumsuzlukların meydana geldiği, düşük-orta motor yüklerindeki kısmi yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, grafikler yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuş, Ki Kare deneysel tasarım yöntemi kapsamında ANOVA ve S/N bulguları da dikkate alınarak yorumlanmıştır.

6.1. Motorin ve Doğalgaz Kullanımı

Çalışmanın bu aşamasında, deney yakıtları olarak, motorin ve farklı oranlardaki doğalgaz-motorin yakıtları kullanılmıştır. Yapılan deneylerde, çift yakıt içeriğindeki doğalgaz oranları %20, %40, %60 ve %80 olarak belirlenmiştir. Yakıtlar, içerdikleri doğalgaz oranına bağlı olarak adlandırılmıştır. %20 doğalgaz içerikli standart çift yakıt C20-D, %40 doğalgaz içerikli standart çift yakıt C40-D, %60 doğalgaz içerikli standart çift yakıt C60-D ve %80 doğalgaz içerikli standart çift yakıt C80-D olarak tanımlanmıştır.

Tam yük şartlarında gerçekleştirilen deneyler, motorların genel karakteristiğinin belirlenmesi için tam olarak yeterli olmamaktadır. Daha detaylı değerlendirmelerin

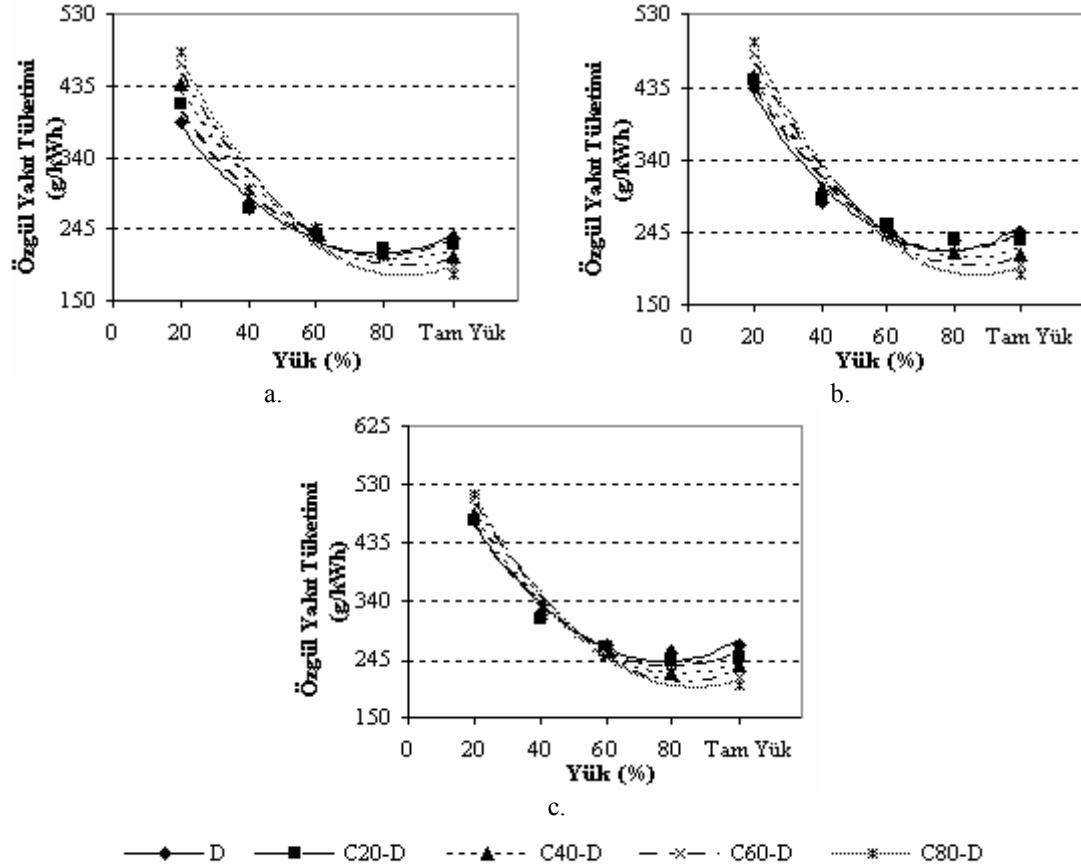
yapılabilmesi ve motorların farklı çalışma durumlarının belirlenebilmesi için kısmi yük deneylerinin yapılması gerekmektedir. Kısmi yük şartlarında gerçekleştirilen deneylerde, tam yük şartlarında elde edilen deney sonuçları referans alınmaktadır. Özellikle, belirli noktaların değerlendirilmesi esastır. Referans alınan bu noktalar arasında daha çok, tam yük şartlarında elde edilen en yüksek motor döndürme momentinin, en yüksek efektif motor gücünün ve en düşük özgül yakıt tüketiminin elde edildiği devirler tercih edilmektedir.

Çalışmada, kısmi yük deneylerinin değerlendirilmesi amacıyla 1400 d/d, 1800 d/d ve 2200 d/d'ler dikkate alınmıştır. 1400 d/d tam yük şartlarında en yüksek motor döndürme momentinin ve en düşük ÖYT değerinin, 2200 d/d tam yük şartlarında en yüksek motor gücünün elde edildiği devirdir. 1800 d/d ise, deneyleri biraz daha detaylandırmak amacıyla 1400 d/d ve 2200 d/d'ler arasında ara devir olarak seçilmiştir.

6.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

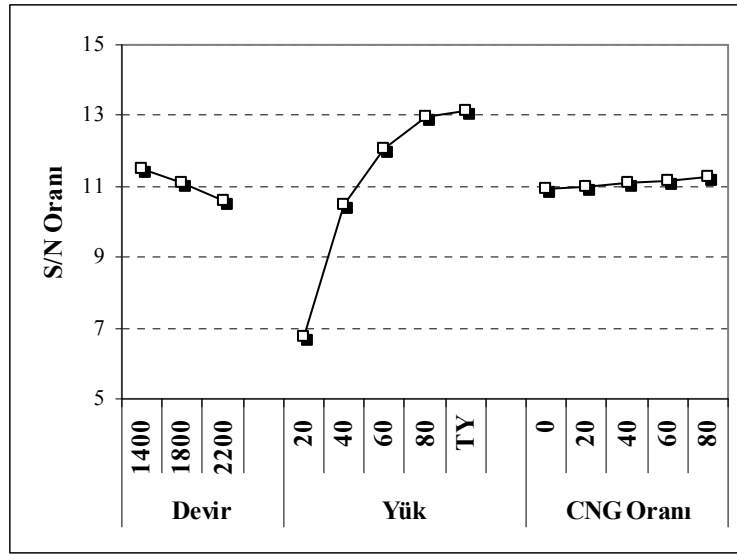
Farklı motor devirlerinde elde edilen, motor yüküne bağlı ÖYT değişimleri Şekil 6.1'de görülmektedir. Şekil 6.1.a'da 1400 d/d'de, Şekil 6.1.b'de 1800 d/d'de ve Şekil 6.1.c'de 2200 d/d'de meydana gelen ÖYT değişimleri yer almaktadır. Çift yakıt olarak doğalgaz kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin, motorin kullanımına göre düşük-orta motor yükleri arasında artış gösterdiği, orta yüklerden itibaren yük artışına bağlı olarak motorin kullanımına göre azaldığı saptanmıştır. Ayrıca motorun devir artışı doğalgaz kullanımı için ÖYT değerlerinde olumlu bir etki göstermiştir. Artan motor devri, ÖYT değerlerinin düşük-orta motor yükleri arasında motorine yaklaşmasını, orta-yüksek motor yükleri arasında ise motorinden daha düşük seviyelerde elde edilmesini sağlamıştır. Standart çift yakıtlarıyla, düşük-orta motor yükleri arasında en yüksek ÖYT değerleri yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla, en düşük ÖYT değerleri ise düşük doğalgaz oranına sahip C20-D yakıtıyla saptanmıştır. 1400 d/d'de ve %20-%60 motor yükleri arasında, C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %2.37 oranında, C80-D yakıtıyla %10.85 oranında artış gerçekleşmiştir. %60 ve üzerindeki motor yükleri arasında elde edilen ÖYT değerlerinde ise, C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre benzer değerler

sağlanırken, C80-D yakıtıyla motorin kullanımına göre ortalama olarak %8.96 oranında azalma belirlenmiştir. Tüm değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında, çift yakıtlar arasında en yüksek değişimin gerçekleştiği C80-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %1.99 oranında azalma belirlenmiştir. Düşük oranda doğalgaz içeren C20-D yakıtıyla ise belirgin bir değişim gerçekleşmemiştir.



Şekil 6.1. Motor yüküne bağlı özgül yakıt tüketimi değişimleri (a. 1400 d/d b. 1800 d/d c. 2200 d/d)

Deneylerde kullanılan değişkenler ve bu değişkenlerin Ki Kare Testi ile belirlenen etki düzeyleri Şekil 6.2’de sunulmuştur. Yapılan değerlendirme sonucunda, ÖYT değerlerinin motor devrinin artmasıyla ile arttığı, motor yükünün artışı ile önemli oranda azaldığı belirlenmiştir. Ortalama değerler dikkate alındığında, doğalgaz oranındaki artışın da ÖYT değerlerini bir miktar azalttığı görülmektedir. Tüm veriler dikkate alındığında, ÖYT değerleri açısından en elverişli çalışma şartlarının düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, yüksek oranda doğalgaz içeren çift yakıtların kullanımıyla sağlandığı tespit edilmiştir.



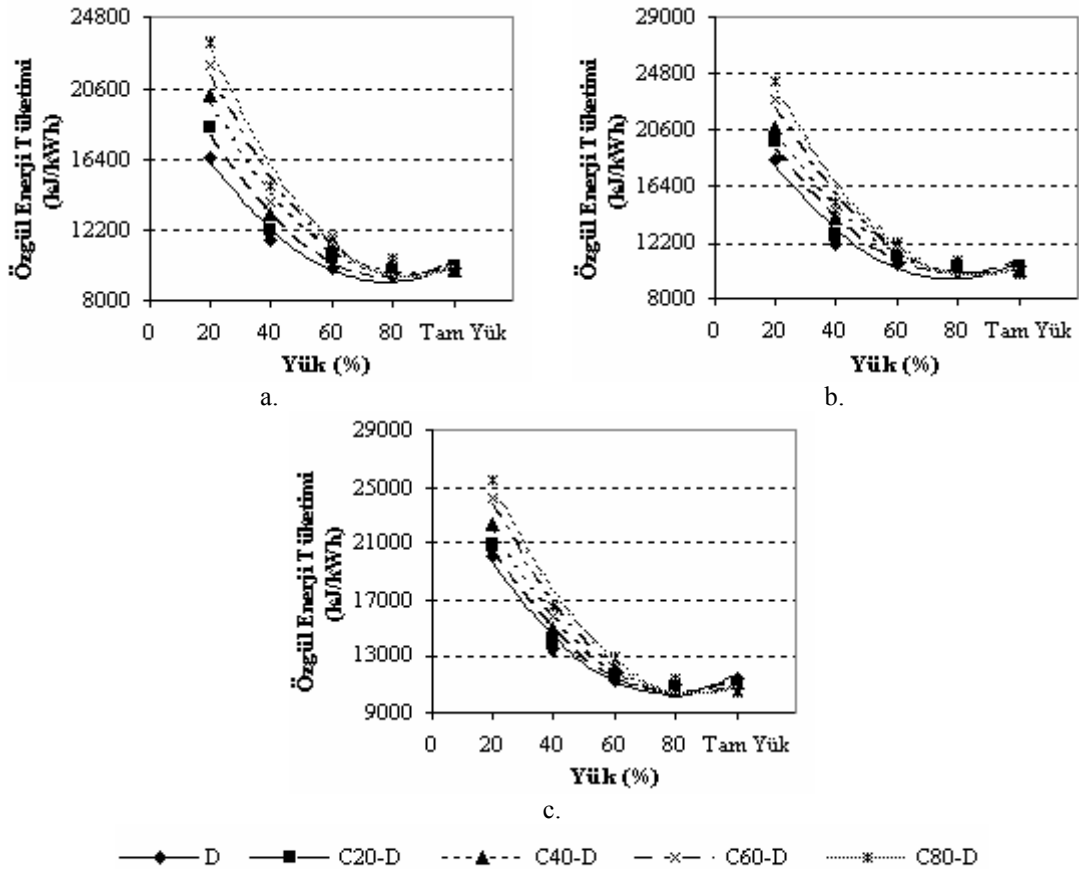
Şekil 6.2. Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

Çift yakıt kullanımı ile elde edilen ÖYT değerleri motorin değerleriyle karşılaştırıldığında, iki farklı oluşum dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki düşük-orta yüklerde meydana gelen artışlar, diğeri ise yüksek yüklerle doğru oluşan azalmadır. Düşük motor yüklerinde, standart çift yakıtların kullanımı ile elde edilen ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre daha yüksek olmasının nedeni, doğalgazın geç tutuşması ve daha yavaş yanması nedeniyle yanmanın kötüleşmesidir. Bu hususta, silindir içi sıcaklıklarının önemli bir etkisi bulunmaktadır. Düşük yüklerde silindir içi sıcaklıklarının da düşük oluşu, yanma oluşumunu kötüleştirir. Artan motor yükü ile silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerinin artış göstermesi, ÖYT değerlerinin azalma eğilimini ve özellikle yüksek yüklerde standart çift yakıt kullanımı ile ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre azalmasını sağlamıştır. Artan silindir içi sıcaklıkları, çift yakıt yanmasında tutuşma gecikmesini ve yanma süresini kısaltan bir etki göstermektedir [12]. Bu etki yüksek yük şartlarında yanma oluşumunu iyileştirmekte ve ÖYT'nin motorin kullanımına göre azalmasına neden olmaktadır. Silindir içi şartları yanında, yakıtların sahip olduğu ısıl değer de önemli bir özelliktir. Doğalgazın sahip olduğu ısıl değer motorine göre daha yüksektir. Bu durum, motorinle aynı ısıl değere sahip olan standart çift yakıtların daha az yakıt tüketimi ile benzer performans değerlerini yakalayabilmelerini sağlamaktadır. M. G. Galal ve ark. [16], doğalgazlı ve çift yakıtlı bir dizel motorunda ÖYT değerlerinin doğalgaz kullanımı ile motorin kullanımına göre arttığını, ancak yüksek yük şartlarında ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre azaldığını belirlemişlerdir. M. Ergeneman ve

ark. [23] çift yakıtlı bir otobüste, doğalgaz kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre bir miktar azaldığını belirtmişlerdir.

6.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET)

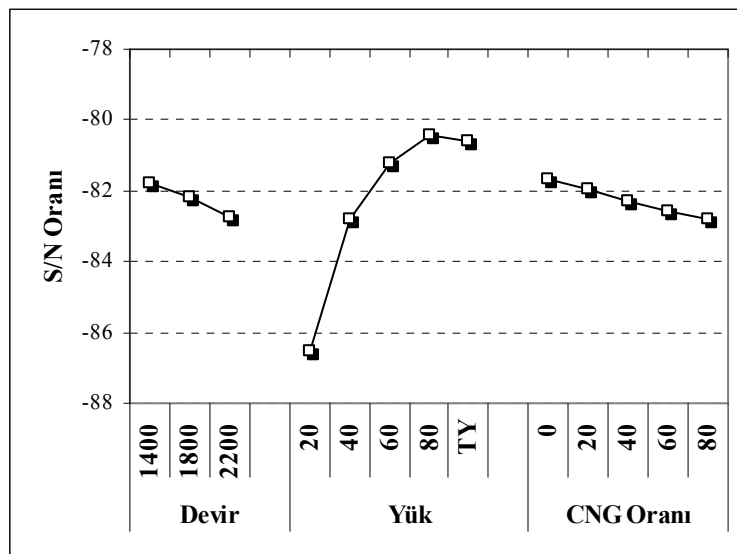
Şekil 6.3'te, farklı motor devirlerinde, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen motor yüküne bağlı ÖET değişimleri görülmektedir. ÖET değişimleri motor yükündeki artışa göre azalan bir eğilim göstermektedir. En düşük ÖET değerleri, düşük-orta motor yükleri arasında motorinle elde edilmiştir. Bu çalışma şartlarında en yüksek ÖET değerleri, yüksek oranlı doğalgaz kullanımıyla gerçekleşmiştir. Yüksek yüklerde ve özellikle tam yük şartlarında en yüksek ÖET değerleri motorinle sağlanırken, en düşük ÖET değerleri yüksek oranlı doğalgaz kullanımıyla belirlenmiştir.



Şekil 6.3. Motor yüküne bağlı özgül enerji tüketimi değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

Elde edilen veriler genel olarak değerlendirildiğinde, %20-%60 motor yükleri arasında çift yakıt içeriğindeki doğalgaz oranının artışı ile ÖET değerlerinin artış gösterdiği belirlenmiştir. Tam yük şartlarında artan doğalgaz oranına bağlı olarak, ÖET değerlerinin azaldığı saptanmıştır. 1400 d/d'de elde edilen veriler incelendiğinde, en yüksek ÖET değerlerinin C80-D yakıtıyla, en düşük ÖET değerlerinin ise C20-D yakıtıyla elde edildiği belirlenmiştir. Bu devirde, tüm yüklerin ortalaması dikkate alındığında, C80-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %18.71 oranında, C20-D yakıtıyla ise motorin kullanımına göre %5.07 oranında artış elde edilmiştir. Tüm değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında ise, C20-D ve C80-D yakıtlarıyla motorin kullanımına göre ortalama olarak sırasıyla %3.96 ve %15.23 oranlarında artış tespit edilmiştir.

Şekil 6.4'te farklı motor parametrelerinin ÖET değerleri üzerindeki etki düzeyleri sunulmuştur. ÖET değerlerindeki en etkili faktörün motor yükü olduğu belirlenmiştir. Motor yükündeki artışın ÖET değerlerini önemli oranda düşürdüğü saptanmıştır. Motor devri ve doğalgaz oranındaki artışlar ise ÖET değerlerinin artmasına neden olmuştur. Elde edilen tüm veriler dikkate alındığında, en elverişli ÖET değerlerinin düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde elde edildiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, motorin kullanımının daha elverişli ÖET değerleri sağladığı tespit edilmiştir.

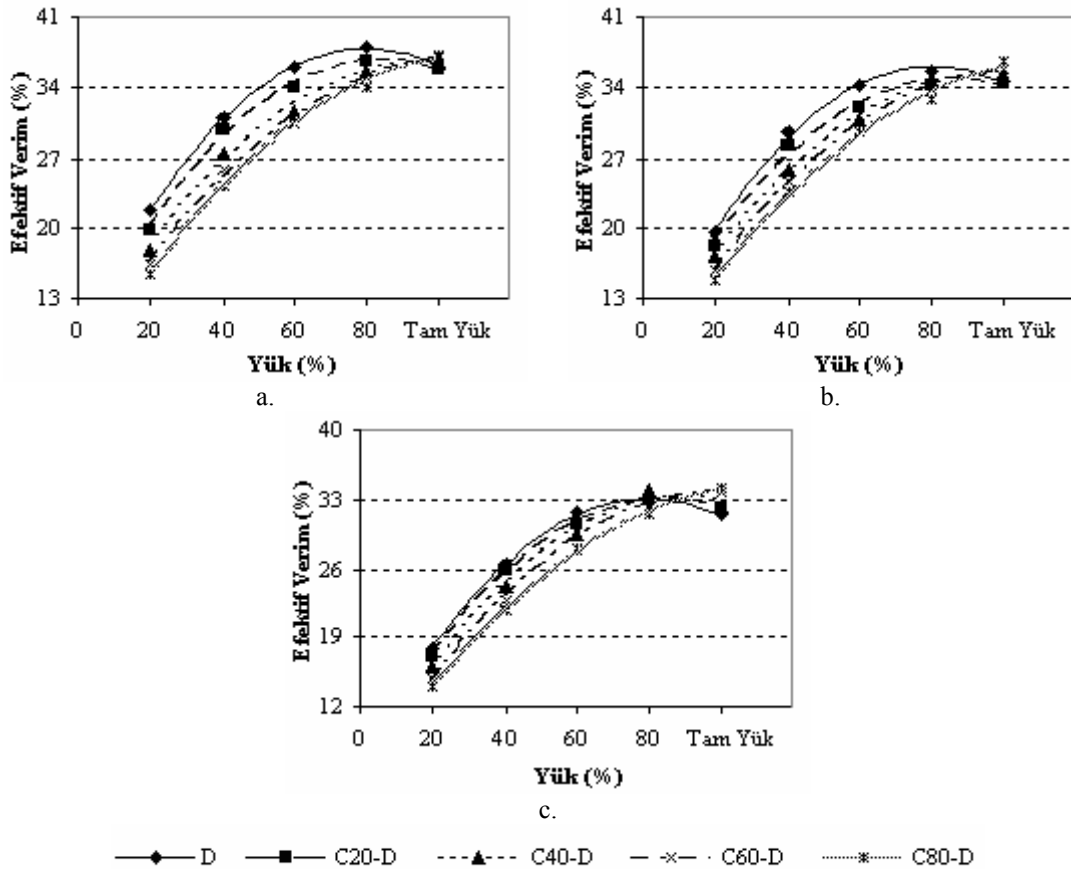


Şekil 6.4. Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

Standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen ÖET değerlerinin düşük yüklerde motorin kullanımına göre artış göstermesi, artan yakıt tüketimi nedeniyledir. Yüksek yüklerde iyileşen yakıt tüketimi değerleri ise, standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen ÖET değerlerinin motorin kullanımına göre azalmasını sağlamıştır.

6.1.3. Efektif verim

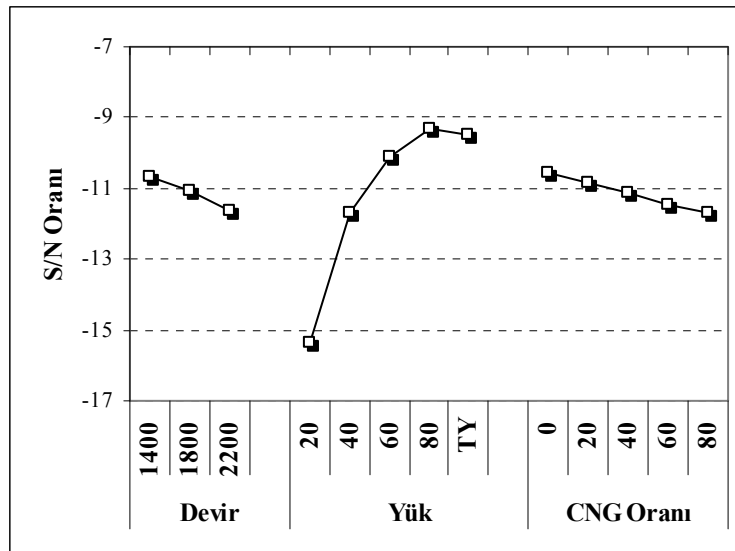
Şekil 6.5'te, farklı motor devirlerinde elde edilen, motor yüküne bağlı efektif verim değişimleri görülmektedir. Efektif verim değerleri motor yükünün artmasıyla birlikte artış göstermektedir. En yüksek efektif verim değerleri, düşük-orta motor yükleri arasında motorinle elde edilmiştir. Yüksek yüklerde, çift yakıt olarak doğalgaz kullanımı sonucu elde edilen efektif verim değerlerinin motorin değerlerine yaklaştığı ve tam yük şartlarında artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 6.5. Motor yüküne bağlı efektif verim değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

1400 d/d'de, %20-%80 motor yükleri arasında elde edilen efektif verim değerlerinde, düşük oranda doğalgaz içeren C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %5.66, yüksek doğalgaz içeriğine sahip C80-D yakıtıyla ise %18.73 oranında azalma saptanmıştır. Tam yük şartlarında, C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre benzer değerler elde edilirken, C80-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %2.88 oranında artış belirlenmiştir. 1400 d/d'de, tüm yük şartlarında elde edilen efektif verim değerlerinin ortalamaları dikkate alındığında, C20-D yakıtıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre %4.70 oranında, C80-D yakıtıyla ise %14.41 oranında azaldığı saptanmıştır. Standart çift yakıtların kullanımıyla 1800 d/d ve 2200 d/d'lerde elde edilen efektif verim değerlerinde, 1400 d/d değerleriyle benzer eğilimler gözlenmiştir. Tüm değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında, C20-D yakıtıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre %3.71 oranında, C80-D yakıtıyla ise motorin kullanımına göre %11.91 oranında azaldığı saptanmıştır.

Farklı motor parametrelerinin efektif verim üzerindeki etki düzeyleri Şekil 6.6'da görülmektedir. Elde edilen verilere göre, efektif verim değerlerindeki değişimde en etkili faktörün motor yükü olduğu saptanmıştır.



Şekil 6.6. Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

Motor yükündeki artışla birlikte, efektif verim değerlerinin de önemli oranda iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Motor devrinin artışı ve doğalgaz oranının artması

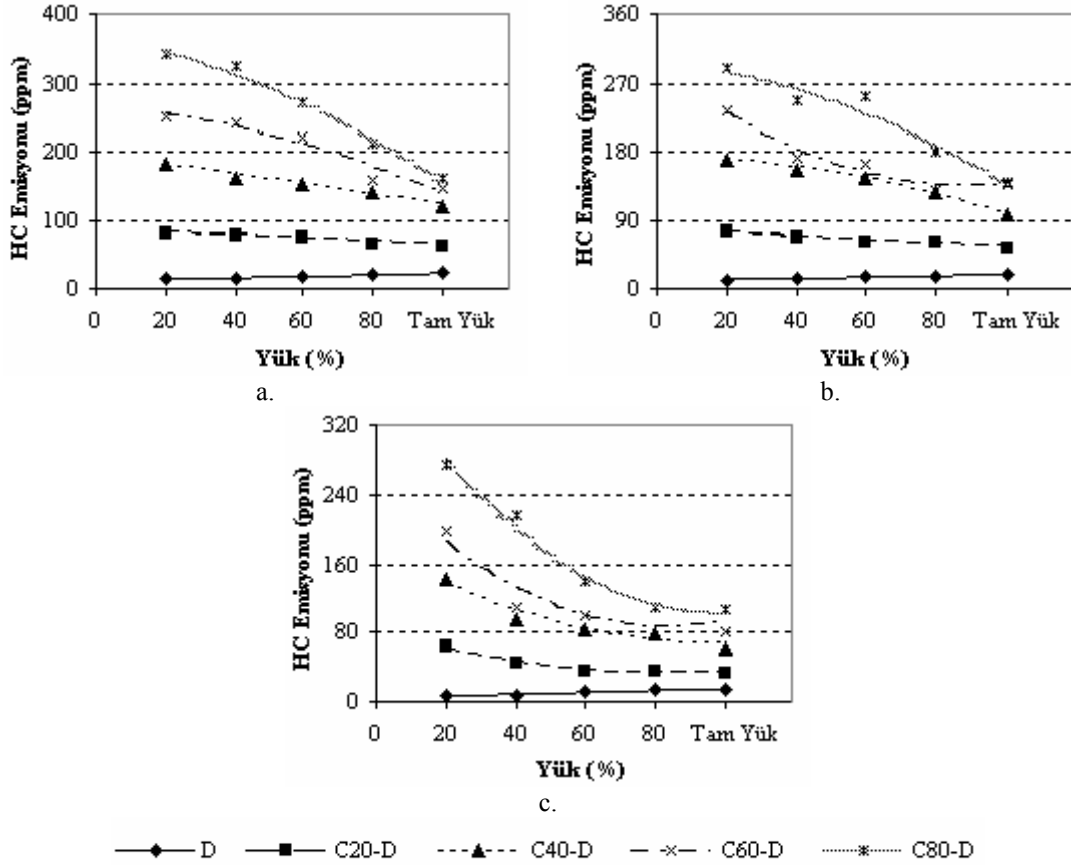
efektif verim değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Efektif verim değerleri açısından en elverişli çalışma koşullarının, düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde elde edildiği belirlenmiştir. Bununla birlikte, tüm motor yüklerinin ortalama değerleri dikkate alındığında motorin kullanımının daha yüksek efektif verim değerleri gösterdiği saptanmıştır.

Standart çift yakıtların kullanımıyla düşük-orta motor yüklerinde artan yakıt tüketimi değerleri, efektif verimin azalmasına yol açmıştır. Yüksek yüklerde çift yakıt kullanımı ile artan efektif verim değerleri ise, iyileşen yanma özelliklerine bağlı olarak azalan yakıt tüketimi nedeniyle gerçekleşmiştir. M. G. Galal ve ark. [16], çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının efektif verim değerlerini azalttığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında, artan motor yüküyle birlikte doğalgaz kullanımı ile elde edilen efektif verim değerlerinin motorin değerlerine yaklaştığını belirtmişlerdir.

6.1.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları

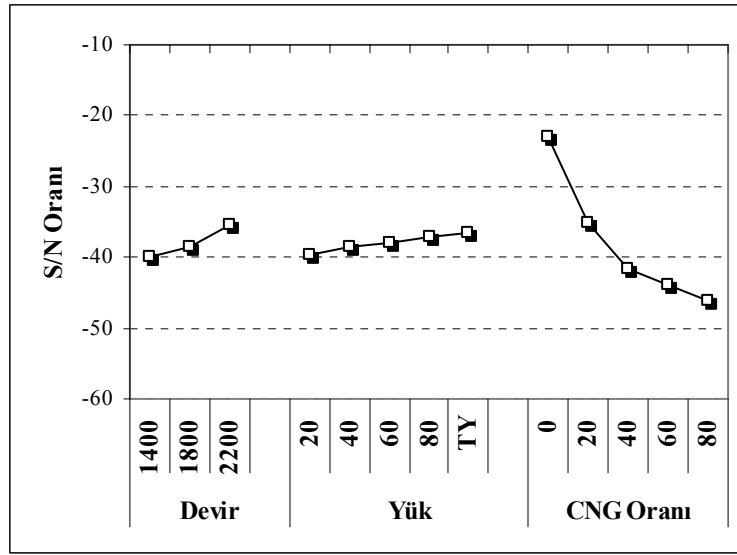
Şekil 6.7’de motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimleri görülmektedir. Farklı motor devirlerine bağlı değişimler Şekil 6.7’deki a, b ve c grafiklerinde yer almaktadır. Standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen HC emisyonlarının motor yükündeki artışa bağlı olarak önemli oranda azaldığı ve motorin değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Deneylerde, çift yakıtların içeriğindeki doğalgaz oranı artışının HC emisyonlarında önemli oranda artış meydana getirdiği belirlenmiştir. En yüksek HC emisyonu değerlerinin tüm yüklerde ve tüm devirlerde yüksek oranda doğalgaz içeriğine sahip C80-D yakıtıyla, en düşük değerlerin ise motorin kullanımıyla elde edildiği saptanmıştır. En yüksek motor döndürme momentinin elde edildiği 1400 d/d’de, %20 yük şartlarında motorinle 15 ppm olarak elde edilen HC emisyonu değerleri, düşük oranda doğalgaz içeren C20-D yakıtıyla 80 ppm ve yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla 344 ppm değerlerinde elde edilmiştir. Aynı devirde, tam yük şartlarında doğalgaz içerikli çift yakıtların kullanımıyla ölçülen HC emisyonu değerlerinde ise önemli oranda azalma eğilimi gözlenmiştir. Bu yük şartında, C20-D yakıtıyla 64 ppm, C80-D yakıtıyla ise 161 ppm değerlerinde HC emisyonu belirlenmiştir. Tam yük şartlarında elde edilen HC emisyonu değerlerinin %20 motor

yükünde elde edilen sonuçlara göre, C80-D yakıtında yaklaşık olarak %53.20 oranında, C20-D yakıtında ise %20.11 oranında azaldığı saptanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, diğer devirlerde ölçülen değerlerin de benzer bir eğilime sahip olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.7. Motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

Şekil 6.8'de, farklı motor parametrelerinin HC emisyonları üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. Ki Kare Testi sonucu belirlenen S/N değerlerine göre HC emisyonlarını etkileyen en önemli faktörün, kullanılan doğalgaz oranı olduğu saptanmıştır. Doğalgaz oranındaki artış, HC değerlerinde önemli oranda artışa neden olmuştur. Motor yükündeki ve motor devrindeki artış ise, HC emisyonlarını azaltan bir etki meydana getirmiştir. Elde edilen verilere göre, HC emisyonları açısından en elverişli çalışma şartları yüksek motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, motorin kullanımı ile saptanmıştır.



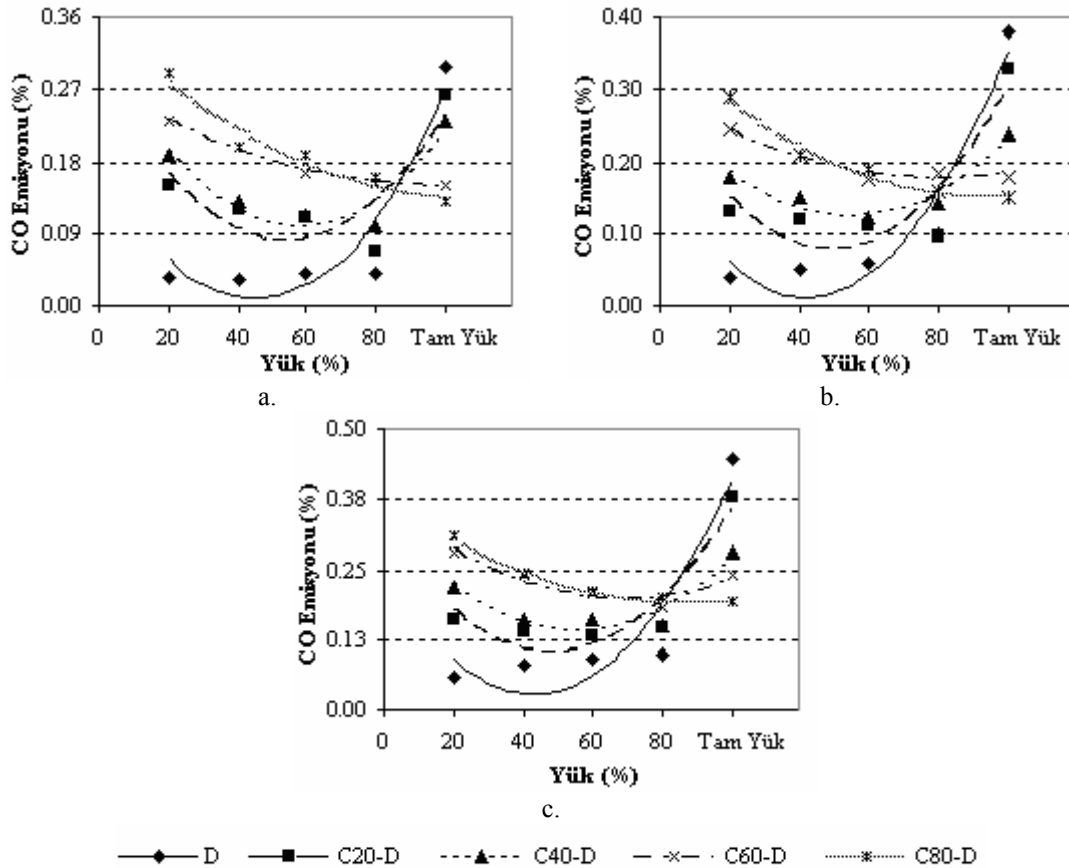
Şekil 6.8. Farklı motor parametrelerinin HC değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

Çift yakıt kullanımında, doğalgazın egzoz portundan supap bindirmesi esnasında kaçması, HC artışının önemli nedenlerinden biridir. Bununla birlikte, özellikle düşük motor yüklerinde ve devirlerinde, silindir içi sıcaklık ve basıncının düşük oluşunun yanı sıra, doğalgazın daha yavaş yanma oluşumuna yol açması, yanmayı kötüleştirerek HC artışına neden olmaktadır. Artan motor yükü, silindir içi sıcaklık ve basınç değerlerinin artmasıyla birlikte, tutuşma gecikmesi ve yanma süresini kısaltmakta, yanma şartlarının düşük motor yüklerine göre iyileşmesine neden olmaktadır. Bu durum ise, daha fazla yakıtın yanmasını ve HC emisyonlarının düşük yük şartlarına göre iyileşmesini sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, artan yanmış gaz sıcaklığı da yanmamış hidrokarbonların oksidize olmasına destek olarak, HC emisyonlarının yüksek yüklerde azalmasına katkı sağlamaktadır. M. Y. E. Selim ve ark. [13] bir dizel motorunda çift yakıt olarak doğalgaz kullanımı sonucu elde edilen HC emisyonlarının motorin kullanımına göre artış gösterdiğini belirtmişlerdir. Fritz ve ark. [31] çift yakıtlı bir dizel motorunda, doğalgaz kullanımıyla elde edilen HC emisyonlarının motorin değerlerine göre önemli oranda arttığını ifade etmişlerdir.

6.1.5. Karbon monoksit (CO) emisyonları

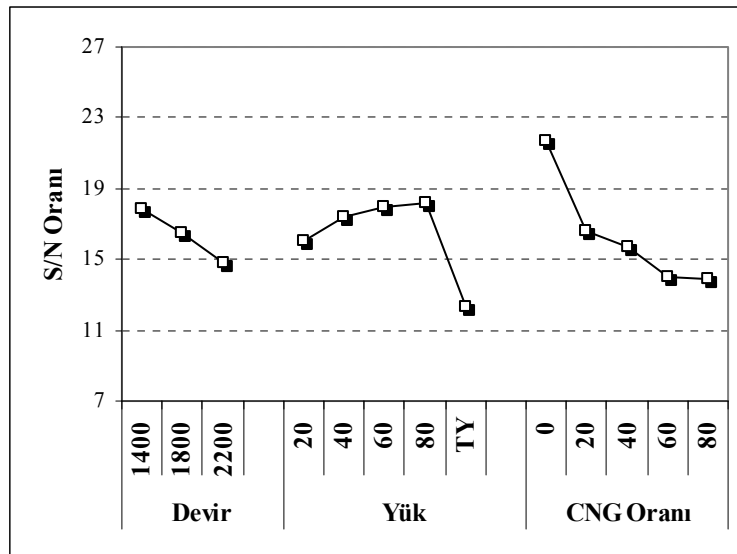
Farklı devirlerde, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimleri Şekil 6.9'da görülmektedir. Çift yakıt olarak

doğalgaz kullanımı, CO emisyonlarında motorin kullanımına göre önemli oranda artış meydana getirmektedir. Bu artış, motorin değerlerine göre, özellikle düşük motor yüklerinde çok daha yüksek seviyelerdedir. Motor yükündeki artışa bağlı olarak, doğalgaz kullanımı sonucu artan CO emisyonlarının önemli oranda iyileştiği ve tam yük şartlarında motorin kullanımına göre azalma gösterdiği belirlenmiştir. Artan devir sayısına bağlı olarak, doğalgaz kullanımıyla elde edilen CO emisyonları, motorin değerlerine yaklaşmaktadır. En yüksek motor döndürme momentinin ve en düşük ÖYT değerlerinin sapatıldığı 1400 d/d'de elde edilen ve %20 motor yükü şartlarındaki CO değerleri dikkate alındığında, en yüksek değerlerin C80-D yakıtıyla, en düşük değerlerin ise motorinle sağlandığı belirlenmiştir. Bu motor yükünde, motorinle %0.04 olarak elde edilen CO değerleri C20-D yakıtıyla %0.15, C80-D yakıtıyla %0.29 değerlerinde ölçülmüştür. Tam yük şartlarında ve aynı devirde elde edilen CO değerleri ise, C20-D yakıtıyla %0.27, C80-D yakıtıyla %0.13 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.9. Motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

Şekil 6.10'da, farklı motor parametrelerinin CO emisyonlarındaki etki düzeyleri görülmektedir. Elde edilen verilere göre, kullanılan doğalgaz oranındaki değişimin CO emisyonlarını etkileyen en önemli faktör olduğu belirlenmiştir. Doğalgaz oranındaki ve motor devrindeki artışın CO değerlerini arttırdığı, motor yükündeki artışın ise %80 yüke kadar önemli oranda azalmaya neden olurken, tam yük şartlarında artış gösterdiği saptanmıştır. En elverişli CO değerleri motorinle elde edilmiştir. Tüm değerler dikkate alındığında, %80 motor yükünde ve düşük motor devirlerinde daha elverişli CO değerlerinin elde edildiği saptanmıştır.

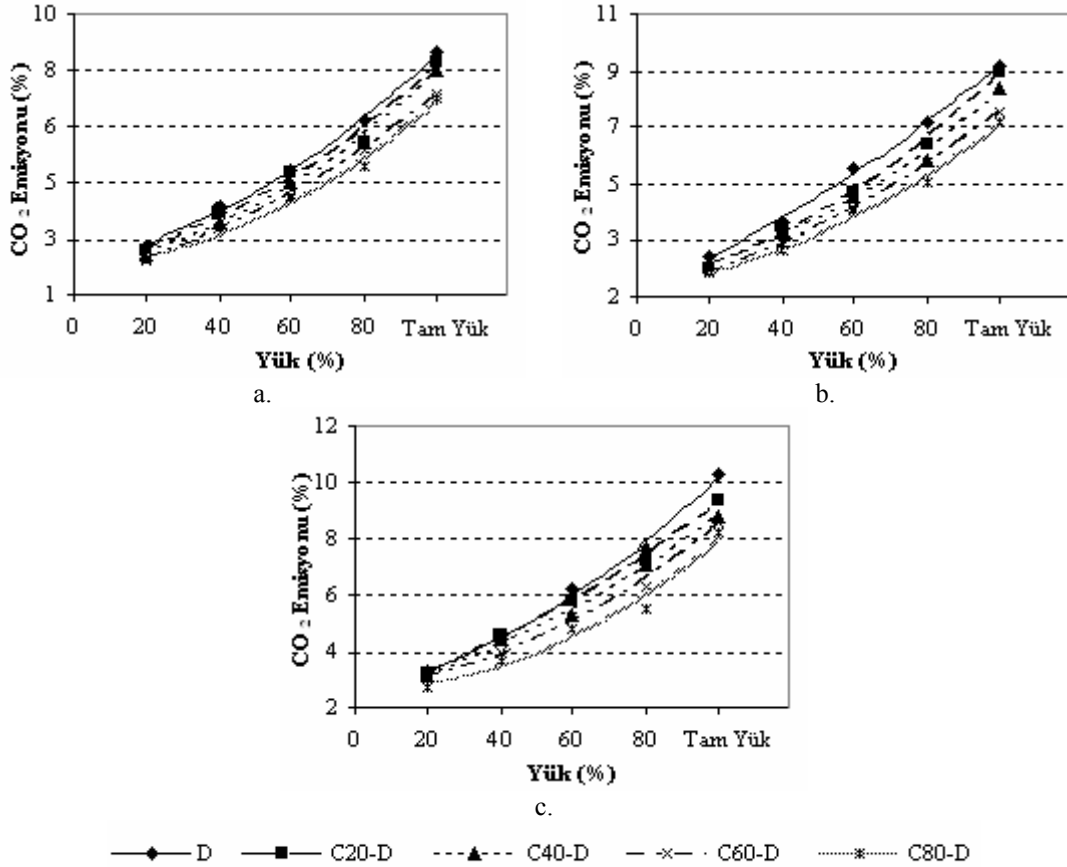


Şekil 6.10. Farklı motor parametrelerinin CO değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

CO oluşumu, yakıtın ayrışması ve oksidasyonu üzerinde etkili olan, karışım sıcaklığı ve yanmamış gaz yakıt varlığının bir fonksiyonudur. Düşük motor yüklerinde, doğalgaz kullanımı sonucu tutuşma gecikmesinin artması ve yavaş yanma, gaz yakıt karışımının oksidasyonunu güçleştirmekte ve CO oluşumuna yol açarak motorin değerlerine göre artışa neden olmaktadır. Artan motor yüküyle birlikte, silindir içi sıcaklığı da artmakta, bunun yanı sıra daha hızlı yanma oluşumu sağlanmaktadır. Bu durum ise yanmayı iyileştirmekte ve CO emisyonlarının oksidize olarak azalmasına neden olmaktadır. Bu durumun sonucu olarak da, doğalgaz kullanımı sonucu artan motor yüküyle birlikte CO değerleri motorin değerlerine yaklaşmakta ve tam yük şartlarında motorin değerlerinin altına düşmektedir.

6.1.6. Karbon dioksit (CO₂) emisyonları

Motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen, motor yüküne bağlı CO₂ emisyonu değişimleri Şekil 6.11'de görülmektedir. Farklı motor devirlerine göre değişen CO₂ emisyon değerleri ise, Şekil 6.11'deki a, b ve c grafiklerinde verilmiştir.

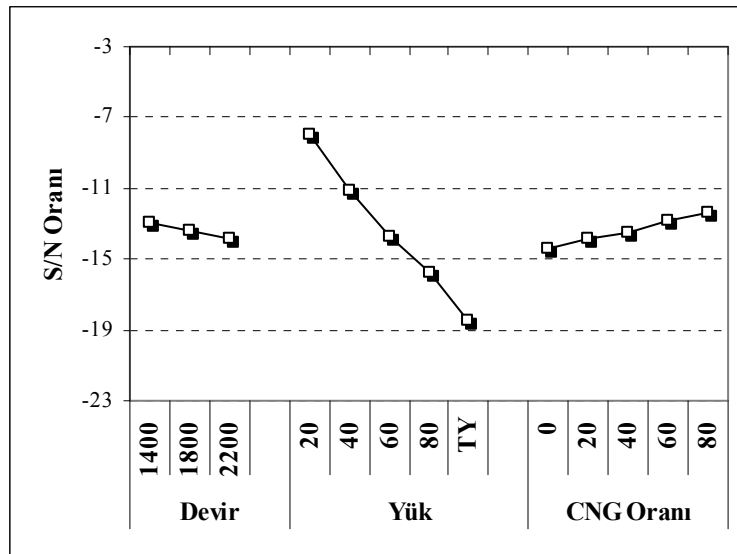


Şekil 6.11. Motor yüküne bağlı CO₂ emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

Motor yükünün ve motor devrinin artmasına bağlı olarak, CO₂ emisyonları artış göstermiştir. Yapılan deneyler sonucunda, çift yakıt olarak doğalgaz kullanımının CO₂ emisyonlarının azaltılmasında önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. En düşük CO₂ emisyonu değerlerinin yüksek oranlı doğalgaz kullanımıyla sağlandığı, en yüksek CO₂ değerlerinin ise motorinle elde edildiği belirlenmiştir. Deneylerde, doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak, CO₂ emisyonlarının azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. En yüksek motor döndürme momentinin elde edildiği 1400 d/d'de elde edilen CO₂ emisyonlarının, motorin kullanımına göre düşük oranda doğalgaz içeren C20-D yakıtıyla %5.27, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D

yakıtıyla %18.51 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen tüm CO₂ emisyonu verileri genel olarak değerlendirildiğinde ise, C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %6.3 ve C80-D yakıtıyla %21.8 oranlarında azalma meydana gelmiştir.

Motor devri, motor yükü ve doğalgaz oranı değişkenlerinin CO₂ emisyonları üzerinde meydana getirdiği etki düzeyleri Şekil 6.12’de görülmektedir. Ki Kare Testi ile elde edilen verilere göre, CO₂ emisyonları üzerindeki en yüksek etki motor yüküne bağlı olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen S/N değerlerine göre, CO₂ emisyonlarının motor devrindeki ve motor yükündeki artışa bağlı olarak arttığı, kullanılan doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak azaldığı saptanmıştır. CO₂ emisyonları açısından en elverişli çalışma şartlarının, düşük motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde kullanılan yüksek oranlı doğalgaz ile sağlandığı belirlenmiştir.



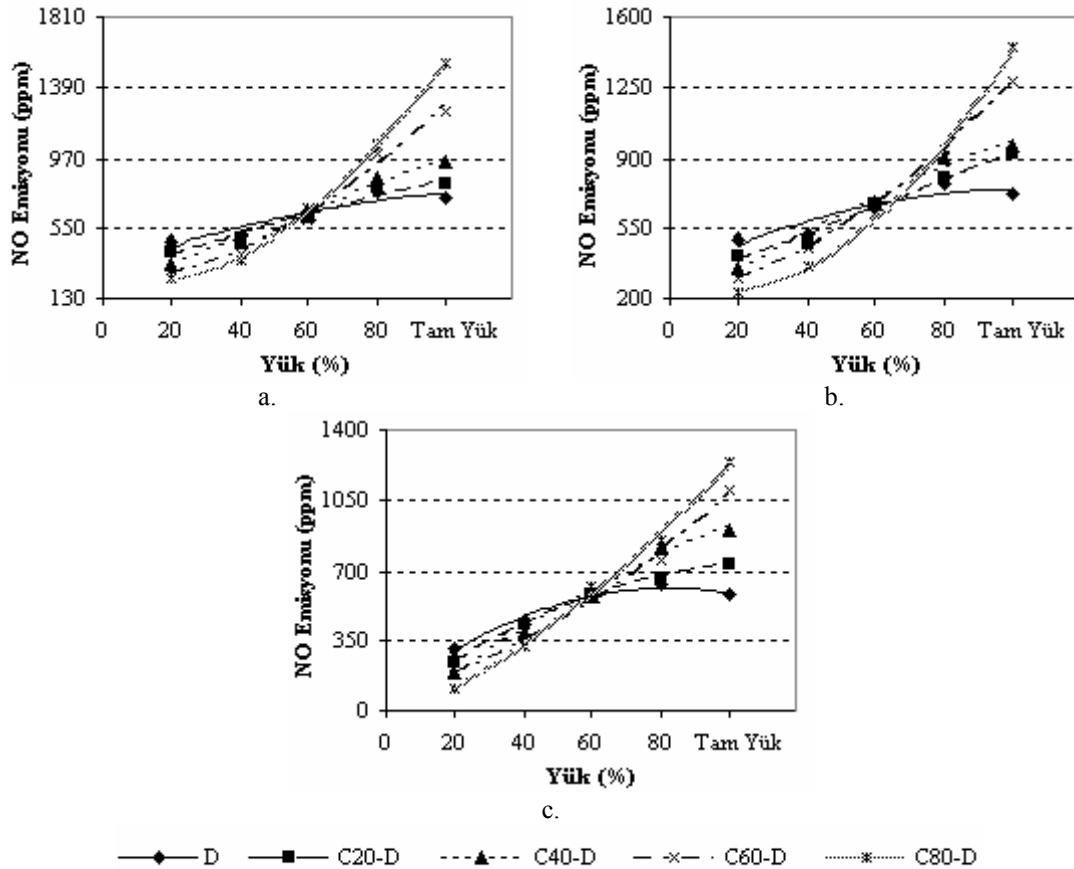
Şekil 6.12. Farklı motor parametrelerinin CO₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Doğalgazın sahip olduğu C/H oranının motorine göre daha düşük olması, çift yakıt kullanımı ile elde edilen CO₂ emisyonlarının motorin kullanımına göre azalmasına neden olmuştur. Doğalgaz oranındaki artışla birlikte azalan C/H oranı da, CO₂ değerlerinin doğalgaz oranı artışı ile azalmasını sağlamıştır. M. G. Galal ve ark. [16] çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımıyla elde edilen CO₂ emisyonlarının motorin kullanımına göre azaldığını belirlemişlerdir. Bu durumun doğalgazın motorine göre daha düşük karbon içeriğine sahip olması nedeniyle

gerçekleştiğini vurgulamışlardır. L. A. Graham ve ark. [120]'nın dizel motorları üzerinde yaptığı altı farklı çalışma analizi sonucunda, CO₂ emisyonlarının azaltılmasında, doğalgazın otobüslerde yakıt olarak kullanımının motorin kullanımına göre daha etkin olduğu belirtilmiştir.

6.1.7. Azot oksit (NO) emisyonları

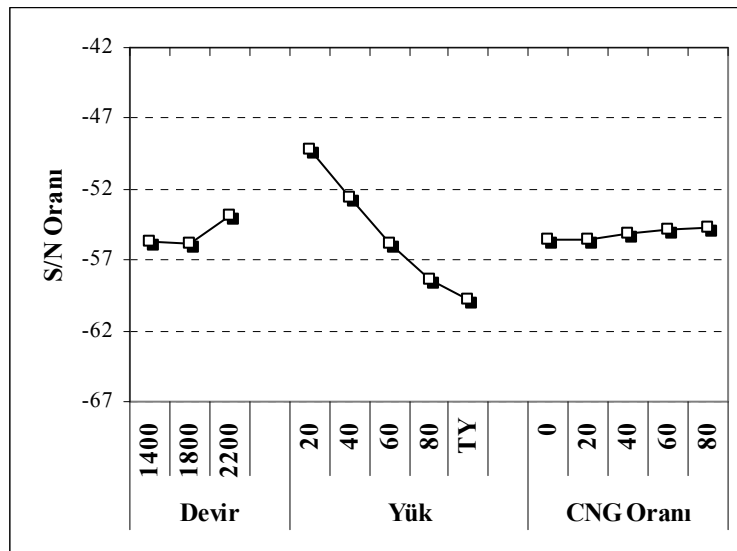
Farklı motor devirlerinde, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen, motor yüküne bağlı NO emisyonu değişimleri Şekil 6.13'te görülmektedir. Standart çift yakıtların kullanımı düşük-orta motor yükleri arasında NO emisyonlarının motorin kullanımına göre azalmasını sağlamıştır. Orta motor yüklerinden yüksek yüklere çıktıkça, doğalgaz kullanımıyla elde edilen NO emisyonları motorin kullanımına göre artış göstermiştir.



Şekil 6.13. Motor yüküne bağlı NO emisyonu değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

En yüksek NO değerleri motorinle düşük-orta motor yükleri arasında sağlanırken, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla orta-yüksek motor yükleri arasında elde edilmiştir. En düşük NO değerleri düşük-orta motor yükleri arasında C80-D yakıtıyla, yüksek motor yüklerinde ise motorinle saptanmıştır. Deney verileri dikkate alındığında, genel olarak %60 yük şartlarının NO emisyonları için bir değişim noktası olduğu anlaşılmıştır. 1400 d/d'de elde edilen değerler incelendiğinde, NO emisyonlarının %20-%60 yük şartları arasında, C20-D ve C80-D yakıtlarıyla motorin kullanımına göre ortalama olarak sırasıyla %7.41 ve %23.87 oranlarında azaldığı belirlenmiştir. %60 ve üzerindeki motor yükleri arasında elde edilen NO emisyonlarında ise, C20-D ve C80-D yakıtlarıyla motorin kullanımına göre ortalama olarak sırasıyla %2.46 ve %49.96 oranlarında artış gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, 1800 d/d ve 2200 d/d'lerde elde edilen NO emisyon değerlerinin de benzer eğilime sahip olduğu anlaşılmıştır. Tüm değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında, NO değerlerinde düşük oranda doğalgaz içeren C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre belirgin bir değişim sağlanamazken, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla %11.1 oranında artış gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Şekil 6.14'te, farklı motor parametrelerinin NO emisyonları üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir.



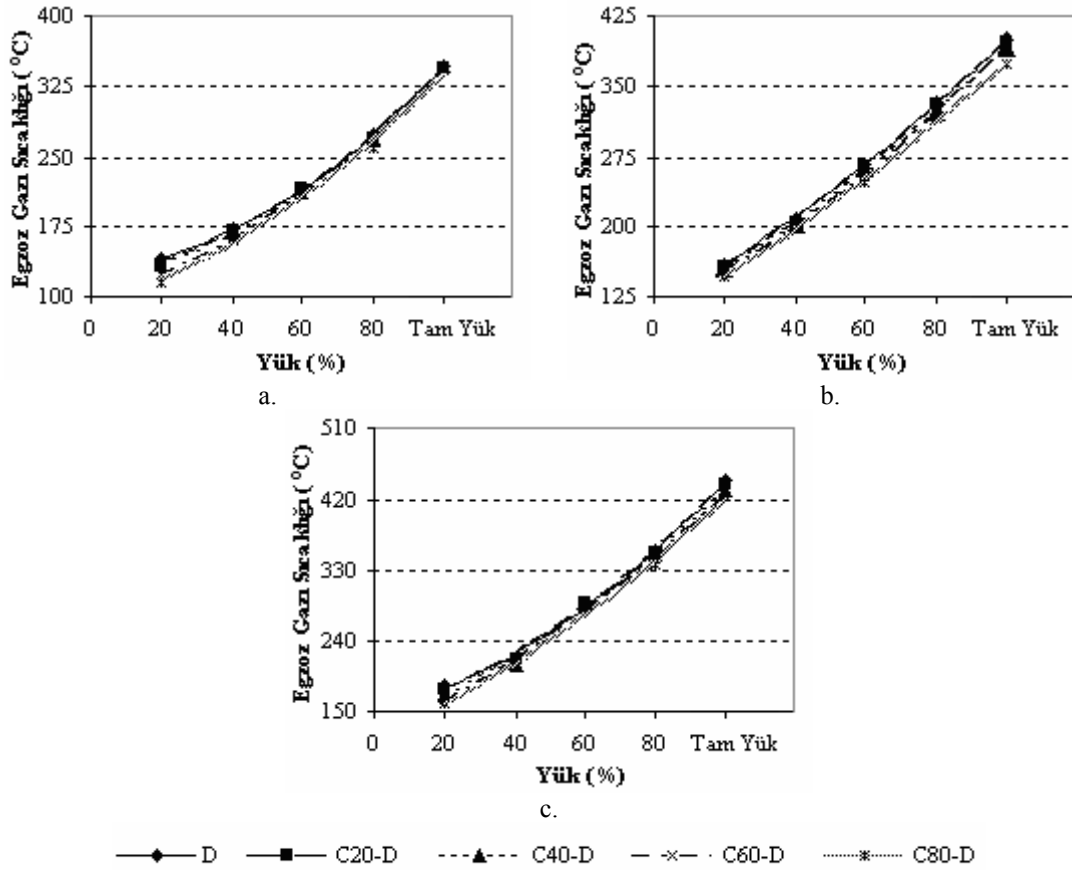
Şekil 6.14. Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

NO emisyonlarını etkileyen en önemli faktörün motor yükü olduğu ve artan motor yükü ile birlikte NO emisyonlarının arttığı saptanmıştır. Doğalgaz oranının diğer faktörlere göre daha düşük etki düzeyine sahip olduğu gözlenmiştir. S/N verileri değerlendirildiğinde, NO emisyonları açısından en elverişli çalışma şartlarının, yüksek motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde elde edildiği belirlenmiştir.

Düşük-orta motor yükleri arasında, silindir içi sıcaklıklarının düşük oluşu, doğalgaz yanmasını zorlaştırmaktadır. Bununla birlikte, doğalgazın yüksek ısı kapasitesi gerek sıkıştırma zamanı sonunda gerekse yanmanın başlangıç safhası boyunca silindir içi sıcaklık ve basıncını düşürerek, yakıtın geç tutuşmasına ve yanmanın daha yavaş oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum ise standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen NO emisyonlarını, bu yük şartlarında, motorin kullanımına göre düşürmektedir. Artan motor yüküyle birlikte artan silindir içi sıcaklık değerleri, doğalgaz kaynaklı tutuşma gecikmesi ve yavaş yanma sürelerini kısaltarak yanmanın gecikmeye sarkmasını iyileştirmektedir. Bu koşulda iyileşen yanma özellikleri ve silindir içi sıcaklıklarının daha da artış göstermesi, NO oluşumunu arttıran bir etki göstermektedir. A. P. Carlucci ve ark. [19], bir dizel motorunda çift yakıt olarak doğalgaz kullanımının düşük motor yüklerinde ve devirlerinde NO emisyonlarını motorin kullanımına göre azalttığını, yüksek motor yüklerinde ve devirlerinde ise NO emisyonlarının artış gösterdiğini deneysel olarak belirlemişlerdir. R. G. Papagiannakis ve ark. [12] çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının NO emisyonlarını motorin kullanımına göre azalttığını saptamışlardır. Artan doğalgaz oranıyla NO emisyonlarının daha da azaldığını, bu durumun doğalgazın sahip olduğu yüksek ısı kapasitesindeki artışla ve meydana gelen yavaş yanma sebebiyle gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. M. Ergeneman ve ark. [23] çift yakıt olarak doğalgaz ve motorin kullanılan bir otobüste, motorin kullanımına göre elde edilen NO emisyonlarının bir miktar arttığını tespit etmişlerdir. M. G. Galal ve ark. [16] çift yakıtlı bir dizel motorunda doğalgaz kullanımının motorin kullanımına göre düşük motor yüklerinde daha düşük, yüksek motor yüklerinde ise daha yüksek NO emisyonu oluşturduğunu belirlemişlerdir.

6.1.8. Egzoz gazı sıcaklıkları

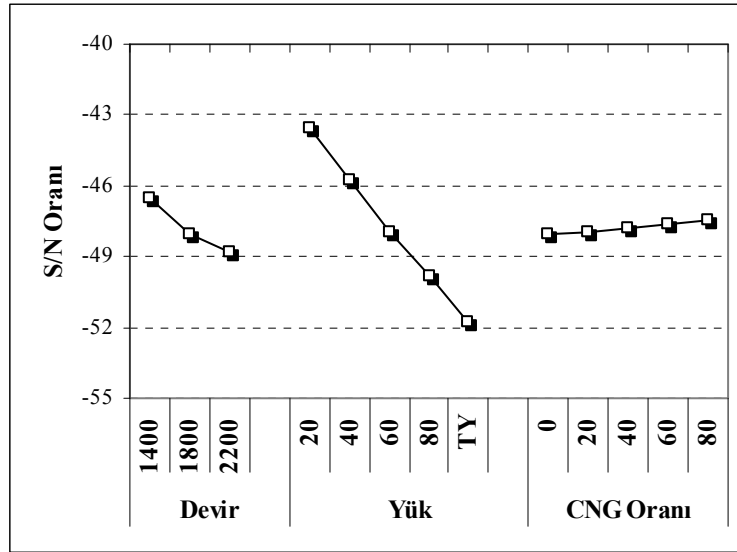
Şekil 6.15'te, farklı motor devirlerinde, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen motor yüküne bağlı, egzoz gazı sıcaklık değişimleri sunulmuştur. 1400 d/d'de elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarında, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %6.35 oranında, düşük oranda doğalgaz içeriğine sahip olan C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %1.56 oranında azalma saptanmıştır. Elde edilen tüm verilerin genel ortalamaları dikkate alındığında ise, egzoz gazı sıcaklıklarının motorin kullanımına göre C80-D yakıtıyla %7.07 oranında ve C20-D yakıtıyla %1.47 oranında azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 6.15. Motor yüküne bağlı egzoz gazı sıcaklık değişimleri (a. 1400 d/d, b. 1800 d/d, c. 2200 d/d)

Farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıkları üzerindeki etki düzeyleri Şekil 6.16'da görülmektedir. Elde edilen verilere göre, egzoz gazı sıcaklıklarındaki etkili faktörlerin motor yükü ve motor devri olduğu belirlenmiştir. Her iki faktördeki artışın egzoz gazı sıcaklıklarını arttırdığı saptanmıştır. Doğalgaz

oranındaki artışın ise egzoz gazı sıcaklıklarını azalttığı, ancak meydana getirdiği etki düzeyinin diğer faktörlere göre daha düşük seviyelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. En düşük egzoz gazı sıcaklıklarının düşük motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde, yüksek oranda doğalgaz içeren çift yakıtların kullanımıyla, en yüksek egzoz gazı sıcaklıklarının ise yüksek motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde motorin kullanımıyla sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 6.16. Farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Çift yakıt olarak doğalgaz kullanımı sonucu, yakıtın düşük motor yüklerinde yanmadan kaçması ve kötü yanma koşulları egzoz gazı sıcaklıklarının azalmasına neden olmuştur. Artan motor yüküyle birlikte yükselen silindir içi sıcaklıklarına ve iyileşen yanma oluşumuna rağmen, egzoz gazı sıcaklıklarının azalması ise bu şartlarda azalan tutuşma gecikmesi ve yanma sürelerinin etkisiyle gerçekleşmektedir. Artan motor yüküyle birlikte, tutuşma gecikmesi ve yanma süresi azalmakta [12] ve yanmanın genişlemeye sarkması iyileşmektedir. Bu durum ise silindir içi sıcaklıklarının artmasına ve egzoz gazı sıcaklıklarının azalmasına neden olmaktadır.

6.2. Çift Yakıt Olarak Doğalgaz ve Motorin Kullanımının Etkileri

Standart çift yakıtlarla yapılan deney sonuçlarına göre, çift yakıt olarak doğalgaz kullanımının meydana getirdiği etkiler için iki çalışma koşulu dikkat çekmektedir. Bunlardan ilki düşük-orta motor yükleri arasındaki değişimleri, diğeri ise

orta-yüksek motor yükleri arasındaki değişimleri kapsamaktadır. Yapılan deneylerde, doğalgaz kullanımından kaynaklanan olumsuzluklar özellikle düşük-orta motor yükleri (%20-%60 yükler arası) arasında belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Bu nedenle gerçekleştirilecek uygulamaların bu çalışma şartlarına yönelmesi gereği doğmaktadır. Ayrıca motorlu taşıtların çoğunlukla düşük-orta motor yükleri arasında çalışması, %20 ve %60 yük aralığını önemli kılmaktadır.

6.3. Kısmi Yük Şartlarında Gerçekleştirilen Uygulamalar

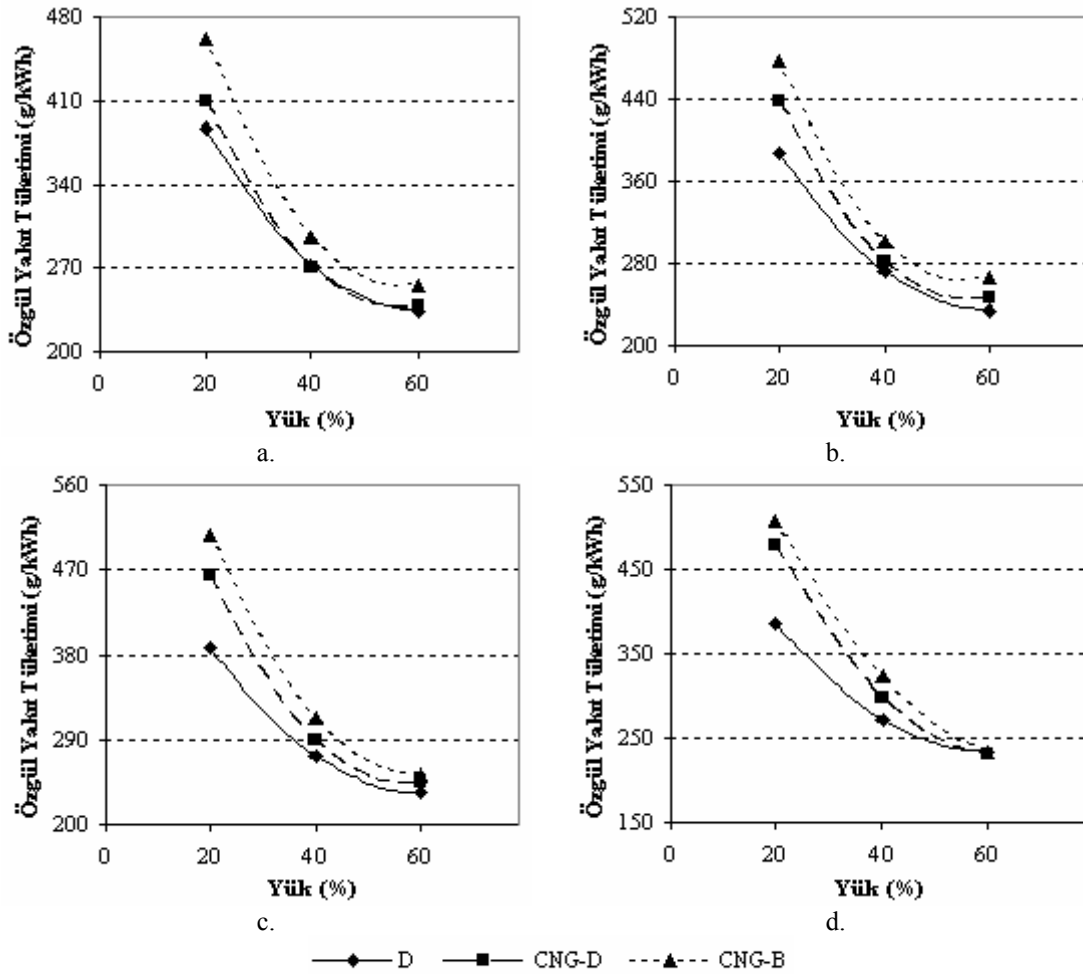
Bu kısımda, doğalgaz kullanımıyla %20-%60 motor yükleri arasında meydana gelen olumsuzluklara yönelik olarak, yüksek setan sayılı ve oksijen içerikli yakıtların kullanımı hususunda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda pilot yakıt olarak motorin yerine biyodizel yakıtının kullanılması ve fumigasyon yöntemiyle diglyme (DGM) katkısının uygulanması incelenmiştir. Elde edilen değişimler grafikler yardımıyla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

6.3.1. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı

Çalışmanın bu kısmında, çift yakıt kullanımında pilot yakıt türünün değişimi incelenmiştir. Çalışmada, farklı oranlardaki doğalgaz-motorin yakıtlarından oluşan standart çift yakıtlarda, pilot yakıt olan motorin yerine biyodizel yakıtı kullanılmıştır. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanılan farklı oranlardaki çift yakıtların (B-CNG) motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre etkileri motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları açısından incelenmiştir. Elde edilen veriler, motorin ve standart çift yakıtlarla elde edilen verilerle karşılaştırmalı olarak grafikler yardımıyla açıklanmıştır. Grafikler, doğalgaz oranları dikkate alınarak hazırlanmış ve eşdeğer doğalgaz oranına sahip çift yakıtlar motorin değerleriyle birlikte aynı grafikte gösterilmiştir. Bu aşamada deney yakıtları olarak C20-B (%20 CNG + Pilot biyodizel), C40-B (%40 CNG + Pilot biyodizel), C60-B (%60 CNG + Pilot biyodizel) ve C80-B (%80 CNG + Pilot biyodizel) yakıtları kullanılmıştır.

6.3.1.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

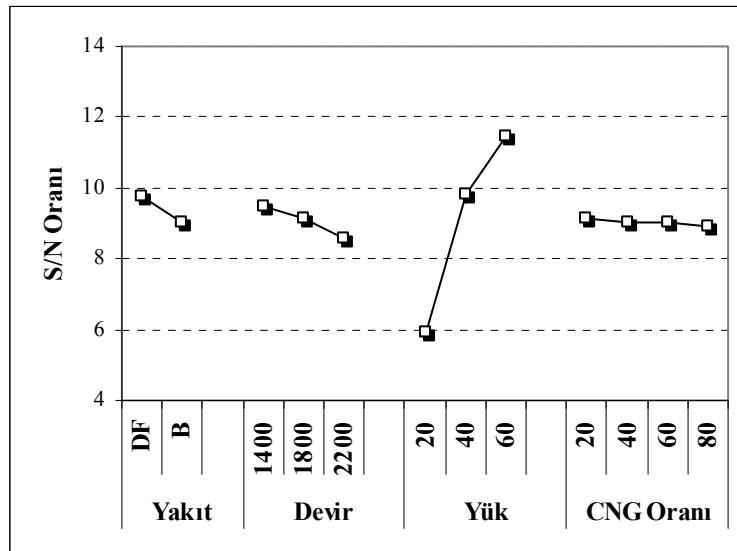
1400 d/d'de, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.17'de sunulmuştur. Yapılan deneyler sonucunda, ÖYT değerlerinin motor yükündeki artışla birlikte azaldığı ve B-CNG yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre artış gösterdiği belirlenmiştir. En yüksek ÖYT değerleri %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla elde edilmiş ve bu yakıtla 509 g/kWh'lik ÖYT değeri tespit edilmiştir. %60 motor yükünde ise C80-B yakıtıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motorine ve C80-D yakıtına yaklaşarak bu şartlarda en düşük ÖYT değerleri sağladığı belirlenmiştir. %60 motor yükündeki ÖYT değeri C80-B yakıtı için 235 g/kWh olarak saptanmıştır.



Şekil 6.17. Motor yüküne bağlı ÖYT değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtlar doğalgaz oranı dikkate alınarak birebir karşılaştırıldığında, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, doğalgaz oranındaki artış ile ÖYT değerlerinin azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. En yüksek ÖYT değişimi C20-B yakıtıyla, en düşük ÖYT değişimi ise yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla sağlanmıştır. C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %9.93 oranında, C80-B yakıtıyla ise C80-D yakıtına göre %5.12 oranında artış belirlenmiştir.

Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerleri üzerindeki etki düzeyleri Şekil 6.18’de görülmektedir. Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan Ki Kare Testi sonucunda elde edilen verilere göre, ÖYT değerlerinin değişiminde en etkili faktörün motor yükü olduğu belirlenmiştir. Motor yükünün ardından en etkili faktörlerin yakıt türü ve motor devri olduğu saptanmıştır. B-CNG yakıtlarının kullanımı, motor devrinin ve doğalgaz oranının artması ÖYT değerlerinin artmasına, motor yükünün artması ise ÖYT değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Elde edilen verilere göre ÖYT değerleri açısından en elverişli çalışma şartları düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde düşük oranda doğalgaz içeren standart çift yakıt kullanımıyla sağlanmıştır.



Şekil 6.18. Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

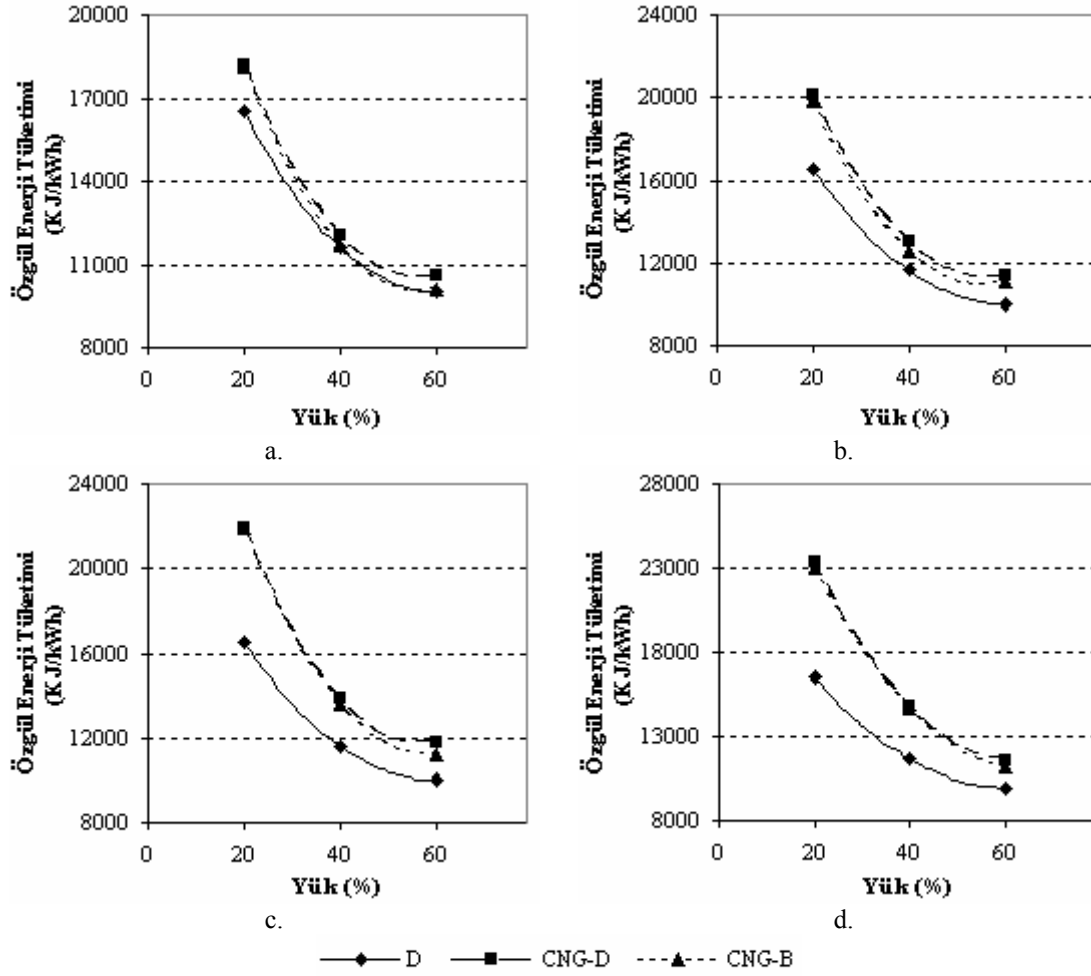
B-CNG yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin standart çift yakıtlara göre artış göstermesi, biyodizelin motorine göre daha düşük ısısal değere sahip olması

nedeniyledir. Aynı ısıl değeri sağlayan çift yakıt içeriğindeki biyodizel miktarı artmakta, bu durum ise ÖYT değerlerinde artış meydana getirmektedir. T. K. Gogoi ve ark. [121] bir dizel motorunda, motorin ve biyodizel karışımlarının kullanımı sonucunda ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre arttığını saptamışlardır. G. R. Kanan ve ark. [122] kullanılmış atık palmye yağlarından üretilen biyodizel yakıtını bir dizel motorunda kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada biyodizel kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre arttığını belirlemişlerdir. M. Lapuerta ve ark. [123] bir dizel motorunda atık kızartma yağlarından ürettikleri biyodizel yakıtının saf ve karışım halinde kullanımı sonucu motorin kullanımına göre daha yüksek ÖYT değerleri saptamışlardır.

6.3.1.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET)

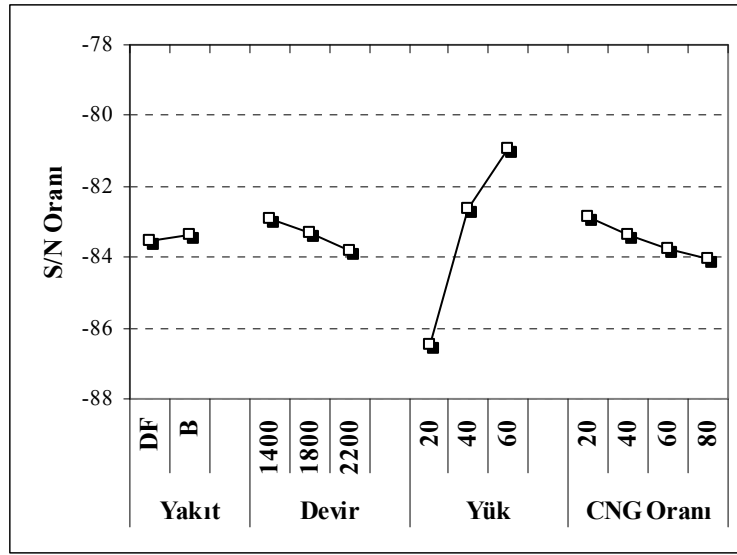
B-CNG yakıtlarıyla 1400 d/d'de elde edilen ÖET değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.19'da sunulmaktadır. B-CNG yakıtları ile elde edilen ÖET değerlerinin motorin kullanımına göre artış gösterdiği, standart çift yakıtların kullanımına göre ise azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak ÖET değerlerinin arttığı saptanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, en yüksek ÖET değerlerinin %20 motor yükünde C80-D yakıtıyla 23389 kJ/kWh ve C80-B yakıtıyla 23051 kJ/kWh olarak elde edildiği saptanmıştır. En düşük ÖET değerleri ise %60 motor yükünde C20-D yakıtıyla 10601 kJ/kWh ve C20-B yakıtıyla 10084 kJ/kWh olarak tespit edilmiştir.

Çift yakıtlar doğalgaz oranı dikkate alınarak birebir karşılaştırıldığında, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen ÖET değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. En yüksek ÖET değişimi C20-B yakıtıyla, en düşük ÖET değişimi ise C80-B yakıtıyla elde edilmiştir. C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.38 oranında azalma belirlenirken, C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre ise çok düşük bir oranda azalma gözlenmiştir.



Şekil 6.19. Motor yüküne bağlı ÖET değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

B-CNG kullanımı, motor devri, motor yükü ve kullanılan doğalgaz oranlarının ÖET değerleri üzerindeki etkileri Şekil 6.20’de görülmektedir. B-CNG kullanımıyla ve motor yükündeki artışa bağlı olarak ÖET değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, motor devrindeki ve doğalgaz oranındaki artış ÖET değerlerinin artmasına neden olmuştur. Meydana gelen ÖET değişiminde en etkili faktörün motor yükü olduğu tespit edilmiştir. ÖET değerleri açısından en elverişli çalışma şartlarının düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde düşük doğalgaz oranlı B-CNG yakıtlarının kullanımı ile sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 6.20. Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

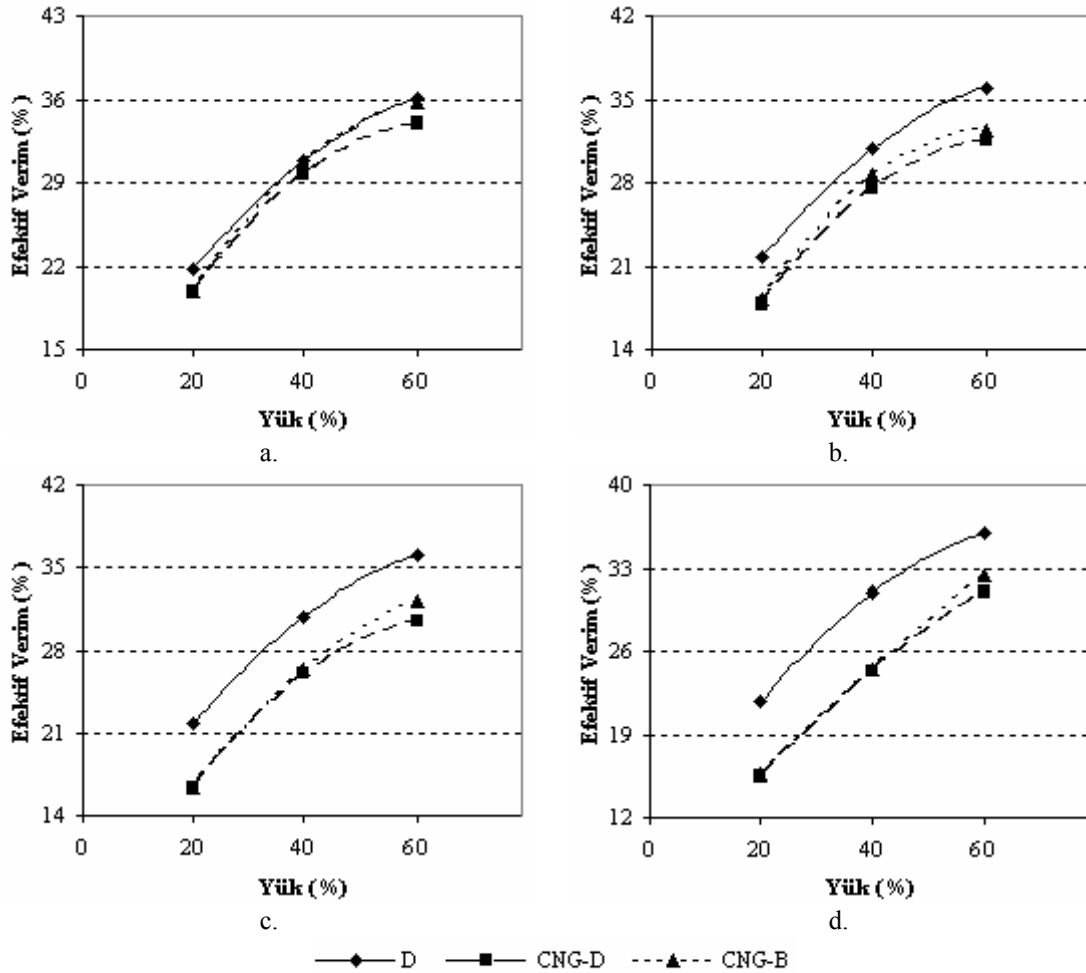
Doğalgazın düşük motor yüklerinde yanma oluşumunu kötüleştirilmesi nedeniyle B-CNG yakıtlarıyla elde edilen yakıt tüketimi değerleri motorin kullanımına göre artış göstermekte ve ÖET değerlerinin motorin kullanımına göre artmasına neden olmaktadır. B-CNG yakıtları ile elde edilen ÖET değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre azalması ise biyodizelin yüksek setan sayısı ve oksijen içeriğinin de katkısıyla yanmayı iyileştirici etkisinden kaynaklanmaktadır. Her ne kadar yakıt tüketimi değerleri artış gösterse de iyileşen yanma özellikleri nedeniyle bu artış daha makul seviyelerde elde edilmiş ve ÖET değerlerinin azalmasına neden olmuştur.

6.3.1.3. Efektif verim

B-CNG yakıtlarının kullanımıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre azaldığı, standart çift yakıtların kullanımına göre artış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 6.21'de, B-CNG yakıtları ile 1400 d/d'de elde edilen efektif verim değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlerle birlikte sunulmaktadır. Elde edilen verilere göre, motor yükündeki artışa bağlı olarak efektif verim değerleri artış göstermiştir. Bunun yanı sıra, çift yakıtlar arasında en yüksek efektif verim değerlerinin %60 motor yükünde ve C20-B yakıtıyla, en düşük efektif verim değerlerinin ise %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla elde edildiği saptanmıştır. %20 motor yükünde motorin kullanımıyla %21.8 değerinde elde edilen efektif verim,

C80-B yakıtıyla %15.6 olarak tespit edilmiştir. %60 motor yükünde ise motorin kullanımıyla %36 olan efektif verim değerinin C20-B yakıtıyla %35.7 olarak elde edildiği belirlenmiştir.

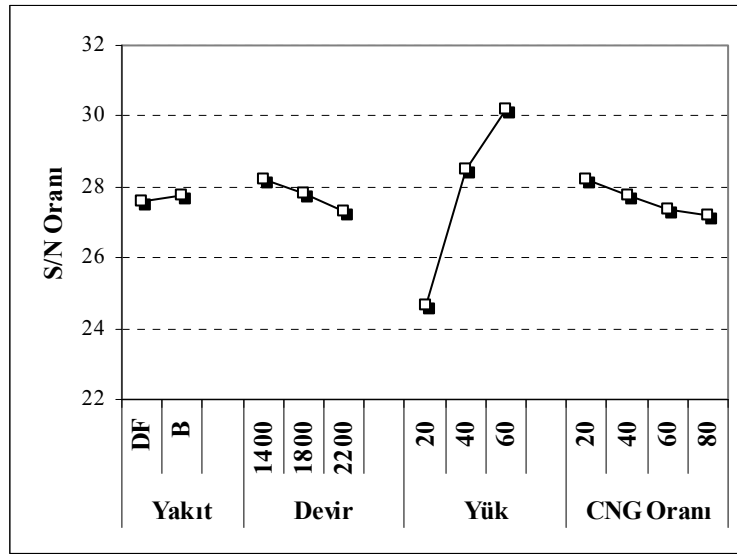
Çift yakıtlar doğalgaz oranı dikkate alınarak birebir karşılaştırıldığında, doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak efektif verim değişiminin azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, en yüksek efektif verim değişimi C20-D yakıtına göre %2.94 oranında artan C20-B yakıtıyla, en düşük değişim ise C80-D yakıtına göre %2.12 oranında artış gösteren C80-B yakıtıyla saptanmıştır.



Şekil 6.21. Motor yüküne bağlı efektif verim değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Şekil 6.22'de farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri görülmektedir. Efektif verim değerleri üzerindeki en yüksek

etki motor yüküyle meydana gelmiştir. Motor yükündeki artış efektif verim değerlerinde artışa neden olmuştur. Bunun yanı sıra, B-CNG yakıtlarının kullanımıyla efektif verim değerlerinin artış gösterdiği, motor devrindeki ve doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak efektif verim değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre efektif verim açısından en elverişli çalışma şartları düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde kullanılan düşük doğalgaz oranlı B-CNG yakıtıyla sağlanmıştır.



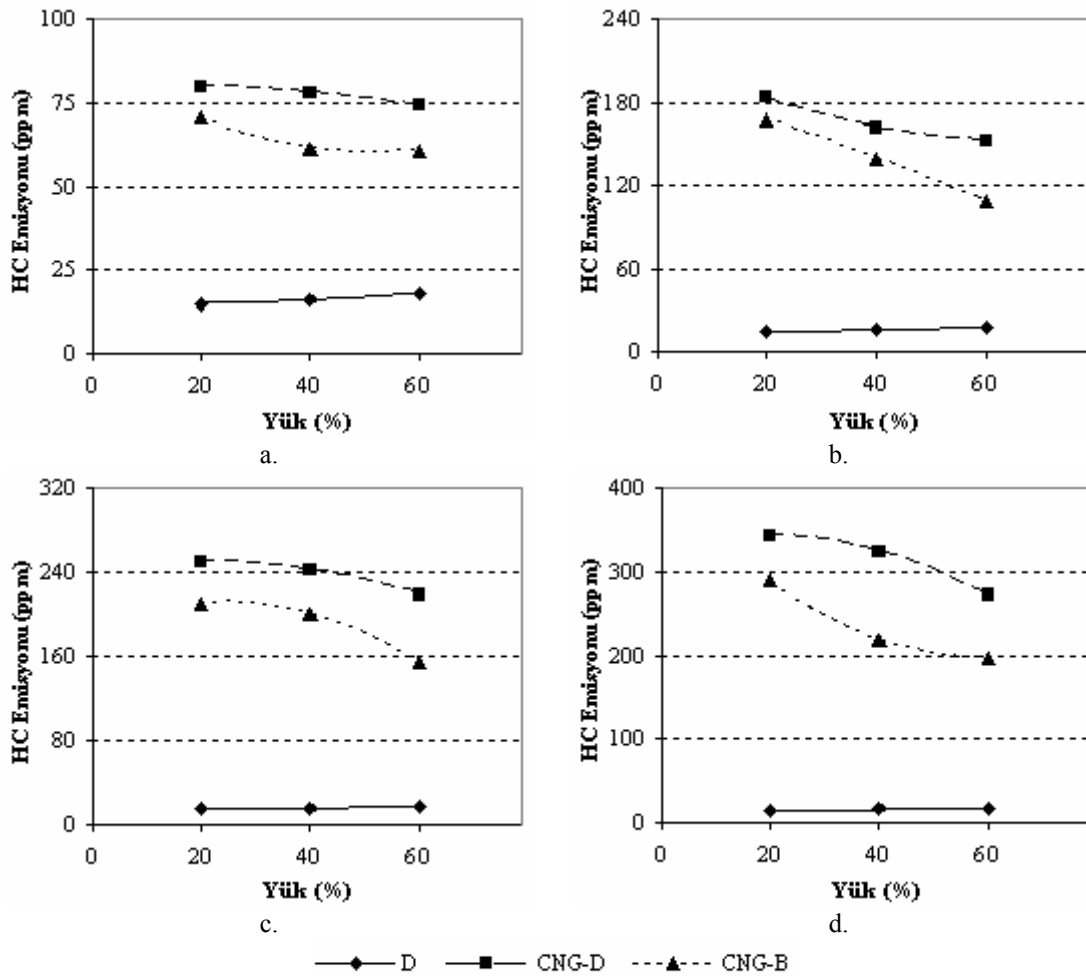
Şekil 6.22. Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

B-CNG yakıtlarının doğalgaz oranı bazında standart çift yakıtlarla karşılaştırılması sonucu, efektif verim değerlerinde oluşan artış biyodizelin yüksek setan sayısı ve oksijen içeriği ile yanmayı iyileştirici etkisi nedeniyle gerçekleşmiştir. İyileşen yanma özellikleri biyodizelin ısı değeri motorine göre daha düşük olmasına rağmen, aynı performansı verecek yakıt enerjisinin azalmasına neden olarak efektif verim değerlerinin artmasını sağlamıştır. Gökalp ve ark. [124] bir dizel motorunda soya yağı metil esteri kullanımının efektif verim değerlerini motorin kullanımına göre arttırdığını saptamışlardır. Çalışmalarında bu durumun, biyodizelin sahip olduğu oksijen içeriği sayesinde daha iyi yanma oluşumu sağlamasıyla gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Sahoo ve ark. [125] bir dizel motorunda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, biyodizel kullanımının efektif verim değerlerinde motorin kullanımına göre artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Biyodizel kullanımıyla

elde edilen bu artışın, biyodizel kullanımıyla iyileşen yanma özellikleri nedeniyle gerçekleştiğini ifade etmişlerdir.

6.3.1.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları

1400 d/d’de, motorinle, standart çift yakıtlarla ve B-CNG yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimleri Şekil 6.23’te görülmektedir.



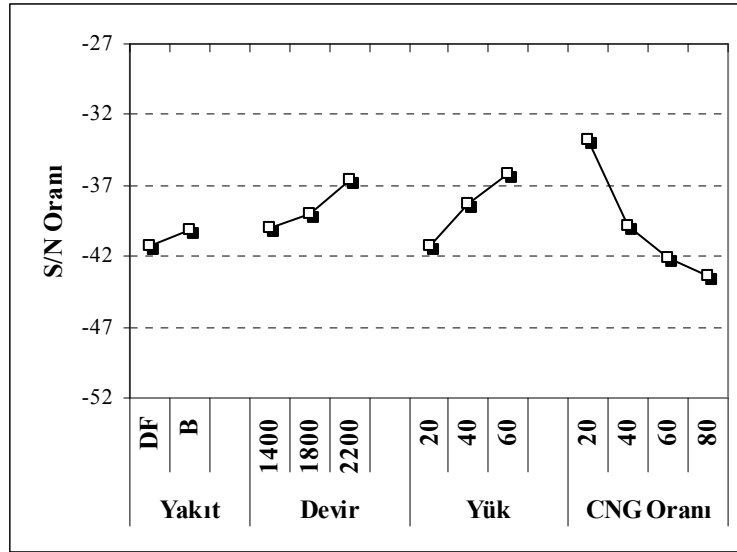
Şekil 6.23. Motor yüküne bağlı HC emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

B-CNG yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonu değerlerinin motorin kullanımına göre önemli oranda artış gösterdiği, standart çift yakıtların kullanımına göre ise azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, B-CNG yakıtları arasında en yüksek HC emisyonunun %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla

289 ppm değerinde, en düşük HC emisyonunun ise %60 motor yükünde düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla 61 ppm değerinde elde edildiği saptanmıştır. Aynı şartlarda C80-D yakıtıyla 344 ppm ve C20-D yakıtıyla 74 ppm HC emisyonu değerleri tespit edilmiştir.

Çift yakıtlar doğalgaz oranı dikkate alınarak birebir karşılaştırıldığında, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. Düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %16.91 oranında, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla ise C80-D yakıtına göre %25.48 oranında azalma gerçekleşmiştir.

Şekil 6.24'te farklı motor parametrelerinin HC emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri sunulmuştur. Motor parametreleri arasında en etkili faktörün kullanılan doğalgaz oranı olduğu saptanmıştır.



Şekil 6.24. Farklı motor parametrelerinin HC emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

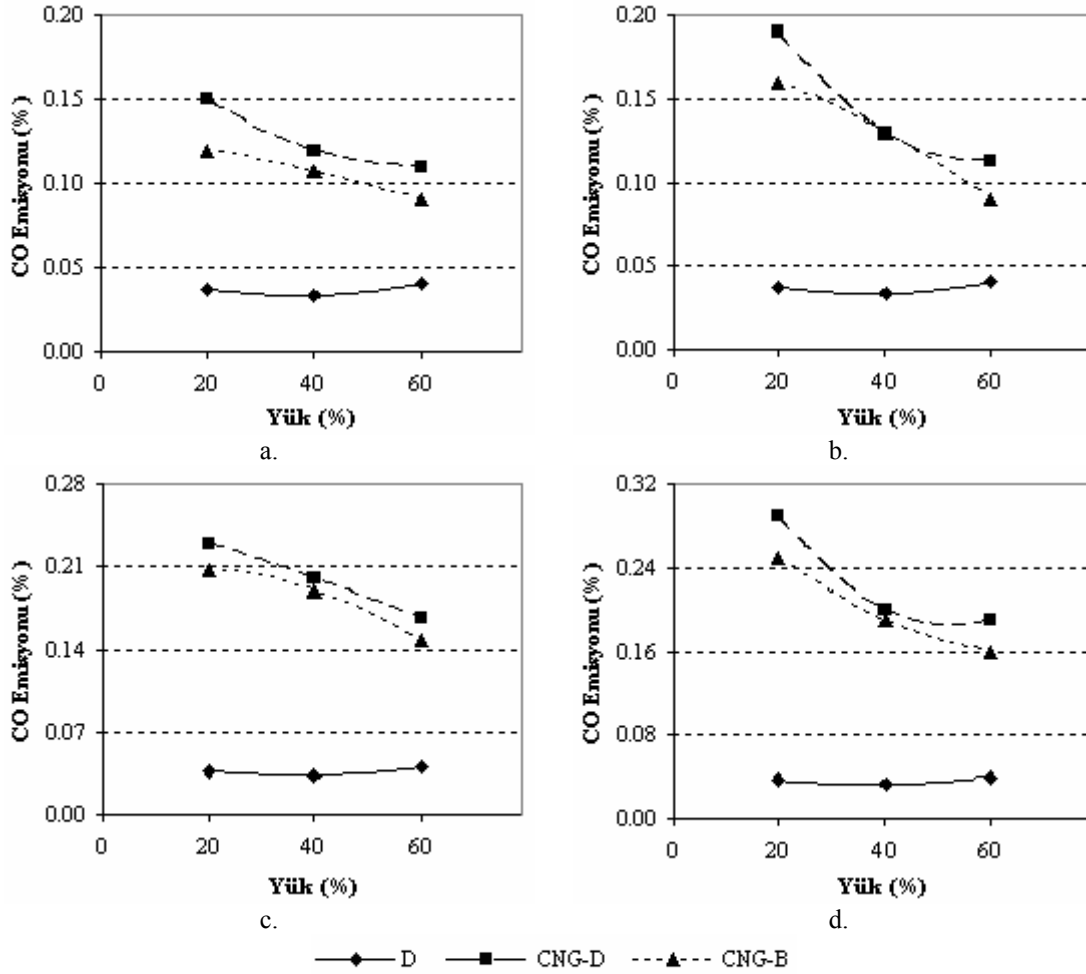
Doğalgaz oranındaki artışın HC değerlerinde önemli oranda artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, B-CNG yakıtlarının kullanımıyla, motor devrindeki ve motor yükündeki artışla birlikte HC emisyon değerlerinin azalma eğilimi gösterdiği saptanmıştır. Gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda, yüksek motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde düşük oranda doğalgaz içeren B-CNG yakıtlarının kullanımıyla en elverişli HC değerlerinin sağlandığı tespit edilmiştir.

B-CNG yakıtlarıyla elde edilen HC değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre azalması, biyodizelin sahip olduğu oksijen içeriği nedeniyledir. Biyodizel içeriğindeki oksijenin yanma verimini arttırdığı ve doğalgazdan kaynaklanan yanma sorunlarından dolayı oluşan HC emisyonlarının yanarak azaldığı öngörülmektedir. S. Puhan ve ark. [126] keten tohumu yağından elde edilen biyodizel yakıtının bir dizel motorunda kullanımı sonucunda HC emisyonu değerlerinin motorin kullanımına göre azaldığını belirlemişlerdir. Özsezen ve ark. [76] kanola ve atık bitkisel yağlarından ürettikleri biyodizel yakıtlarının bir dizel motorunda kullanılması sonucu elde edilen HC değerlerinin motorin kullanımına göre azaldığını ifade etmişlerdir. Bu durumun biyodizel kullanımı ile meydana gelen yanmanın motorin kullanımına göre daha iyi oluşundan kaynaklandığını belirtmişlerdir.

6.3.1.5. Karbon monoksit (CO) emisyonları

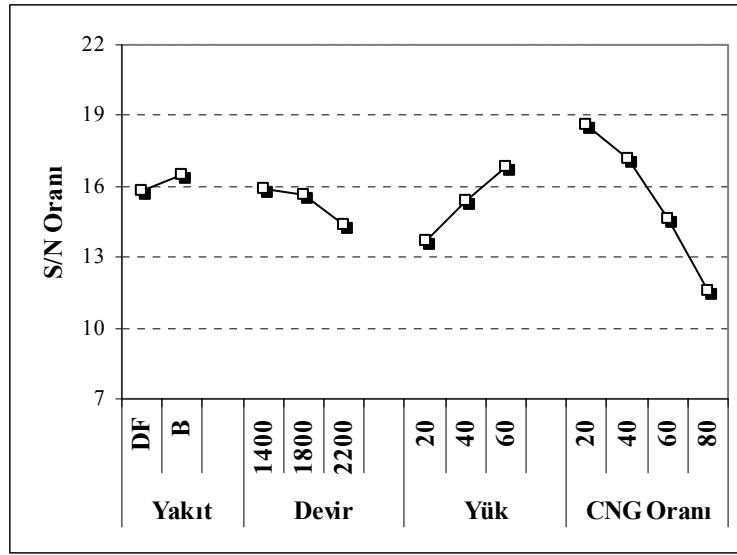
B-CNG yakıtlarıyla 1400 d/d'de elde edilen CO emisyon değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 6.25'te yer almaktadır. Deney verileri genel olarak değerlendirildiğinde, motor yükündeki artışa bağlı olarak CO emisyonlarının azalma eğiliminde olduğu ve B-CNG yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. B-CNG yakıtları arasında en yüksek CO emisyonu %20 motor yükünde C80-B yakıtıyla %0.19 değerinde, en düşük CO emisyonu ise %60 motor yükünde C20-B yakıtıyla %0.06 değerinde tespit edilmiştir.

Çift yakıtlar doğalgaz oranı dikkate alınarak birebir karşılaştırıldığında, en düşük değişimin C60-B yakıtıyla ve en yüksek değişimin ise C20-B yakıtıyla elde edildiği saptanmıştır. C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %16.39 oranında ve C60-B yakıtıyla C60-D yakıtına göre %8.99 oranında azalma belirlenmiştir. Yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla ise C80-D yakıtına göre elde edilen azalma oranı %11.53 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.25. Motor yüküne bağlı CO emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Şekil 6.26’da farklı motor parametrelerinin CO emisyonları üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. CO emisyonlarının oluşumunda en etkili faktörün kullanılan doğalgaz oranı olduğu belirlenmiştir. Çift yakıtların içeriğindeki doğalgaz oranının artışı CO emisyonlarını arttırmıştır. Diğer önemli etki düzeyleri sırasıyla motor yükü, motor devri ve yakıt türü olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, motor yükündeki artışla ve biyodizel içerikli çift yakıtların kullanımı ile CO emisyon değerlerinin azaldığı, motor devrindeki artışla CO emisyon değerlerinin arttığı saptanmıştır. CO emisyonları açısından en elverişli çalışma şartları, düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde düşük oranda doğalgaz içeren B-CNG kullanımıyla gerçekleşmiştir.



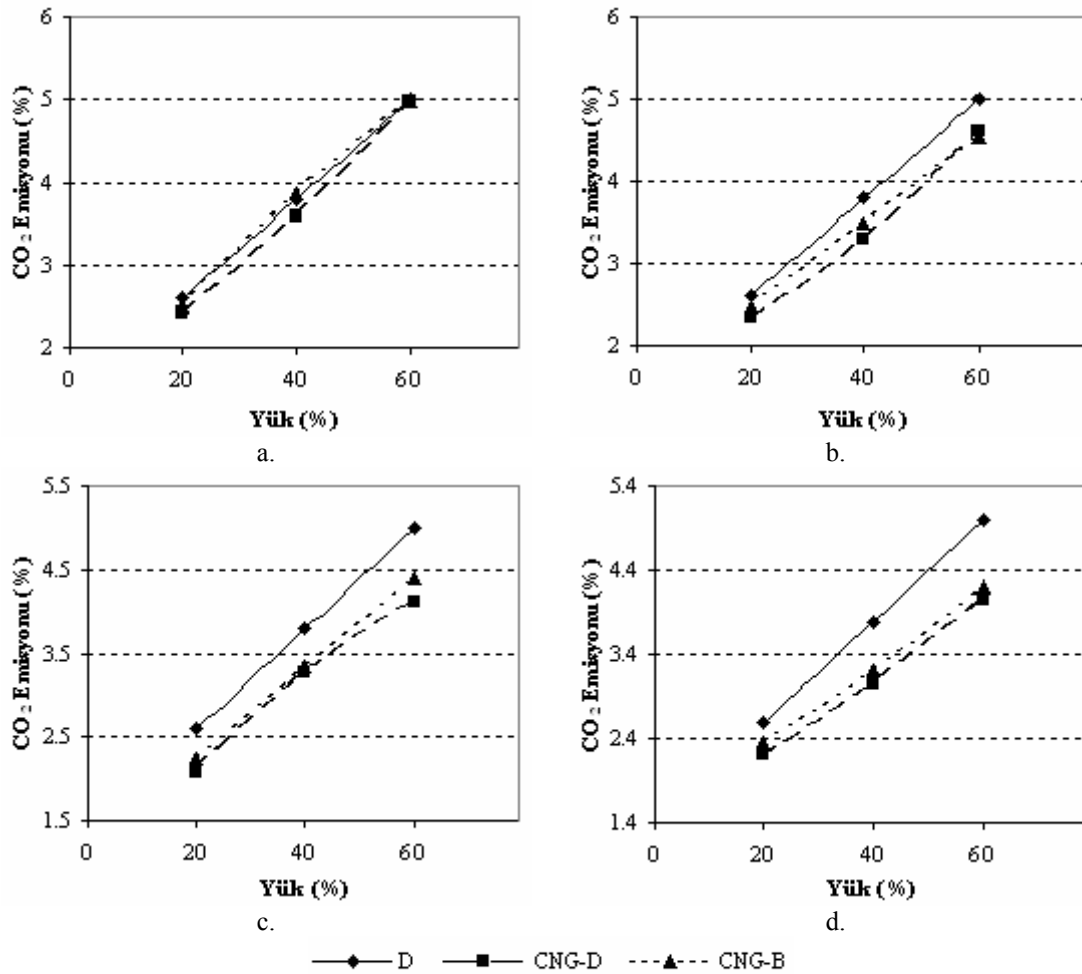
Şekil 6.26. Farklı motor parametrelerinin CO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Biyodizelin sahip olduğu oksijen yanma özelliklerini iyileştirici bir etki göstermektedir. Bu durum ise B-CNG yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre azalmasını sağlamaktadır. T. Garapathy ve ark. [127] tek silindirli bir dizel motorunda jatropha yağından elde ettikleri biyodizel yakıtının kullanımı sonucunda CO emisyonlarının motorin kullanımına göre azaldığını tespit etmişlerdir. Bu durumun biyodizel içeriğindeki oksijenin yanma özelliklerini iyileştirmesi nedeniyle gerçekleştiğini belirtmişlerdir. M. Gümüş ve ark. [128] çalışmalarında saf biyodizel kullanımının motorin kullanımına göre CO emisyonlarını azalttığını saptamışlardır. Biyodizel kullanımı ile azalan CO değerlerinin, biyodizelin sahip olduğu oksijen içeriğinin yanmanın tamamlanmasına yardımcı oluşundan kaynaklandığını vurgulamışlardır. S. Godiganur ve ark. [129], mahua yağı metil esterinin bir dizel motorunda kullanımı sonucunda, CO emisyonlarının motorin kullanımına göre azaldığını belirlemişlerdir. Çalışmalarında biyodizelin oksijen içeriğinin yakıtın yanmasına yardımcı olduğunu, CO emisyonlarının bir kısmının fazla oksijen içeriği ile CO₂'ye dönüşerek CO emisyonlarının azalmasında etkili olduğunu ifade etmişlerdir.

6.3.1.6. Karbon dioksit (CO₂) emisyonları

Şekil 6.27'de motorinle, standart çift yakıtlarla ve B-CNG yakıtlarıyla 1400 d/d'de elde edilen CO₂ emisyonu değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri

görülmektedir. Deneyler sonucunda B-CNG yakıtlarıyla elde edilen CO₂ emisyonlarının genel olarak motorin kullanımına göre azaldığı, standart çift yakıtların kullanımına göre ise arttığı saptanmıştır. B-CNG yakıtlarıyla elde edilen CO₂ değerleri dikkate alındığında, en belirgin düşüşlerin yüksek doğalgaz oranına sahip C80-B yakıtıyla %2.3 değerinde elde edildiği belirlenmiştir. En yüksek CO₂ emisyonu değerinin ise düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla ve %5 değerinde elde edildiği saptanmıştır.

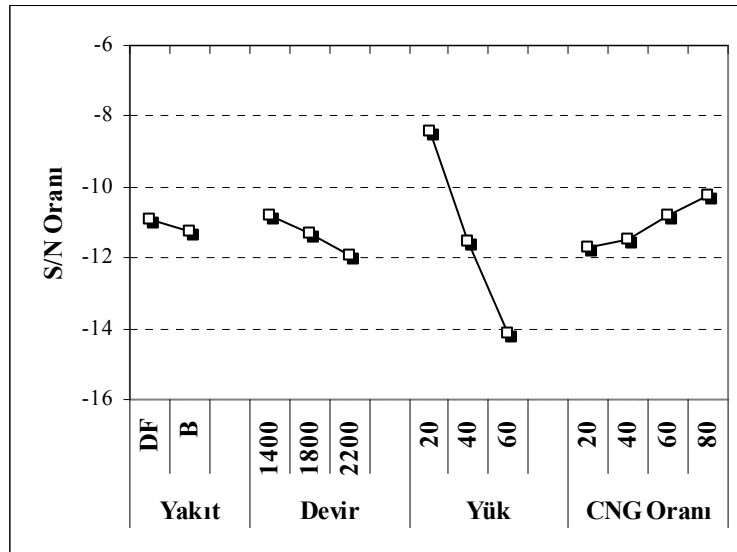


Şekil 6.27. Motor yüküne bağlı CO₂ emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtlar doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırıldığında, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen CO₂ emisyonu değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre bir miktar arttığı belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %3.59 oranında, yüksek oranda

doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla ise C80-D yakıtına göre %4.85 oranında artış gerçekleşmiştir. Doğalgaz oranındaki değişime göre biyodizel yakıtlarının kendi aralarında belirgin bir fark saptanmamıştır. C40-B yakıtıyla C40-D yakıtına göre %3.34 olarak elde edilen artış oranı, C60-B yakıtıyla C60-D yakıtına göre %4.34 oranında belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan Ki Kare uygulaması sonucunda elde edilen verilere göre, CO₂ emisyonları üzerindeki en etkili faktörün motor yükü olduğu belirlenmiştir. Motor yükünün ardından CO₂ emisyonlarındaki etki düzeylerinin, kullanılan doğalgaz oranı, motor devri ve yakıt türü olarak sıralandığı saptanmıştır. Bu motor parametrelerinin CO₂ emisyonlarındaki etki düzeyleri S/N oranına göre Şekil 6.28’de sunulmuştur.



Şekil 6.28. Farklı motor parametrelerinin CO₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

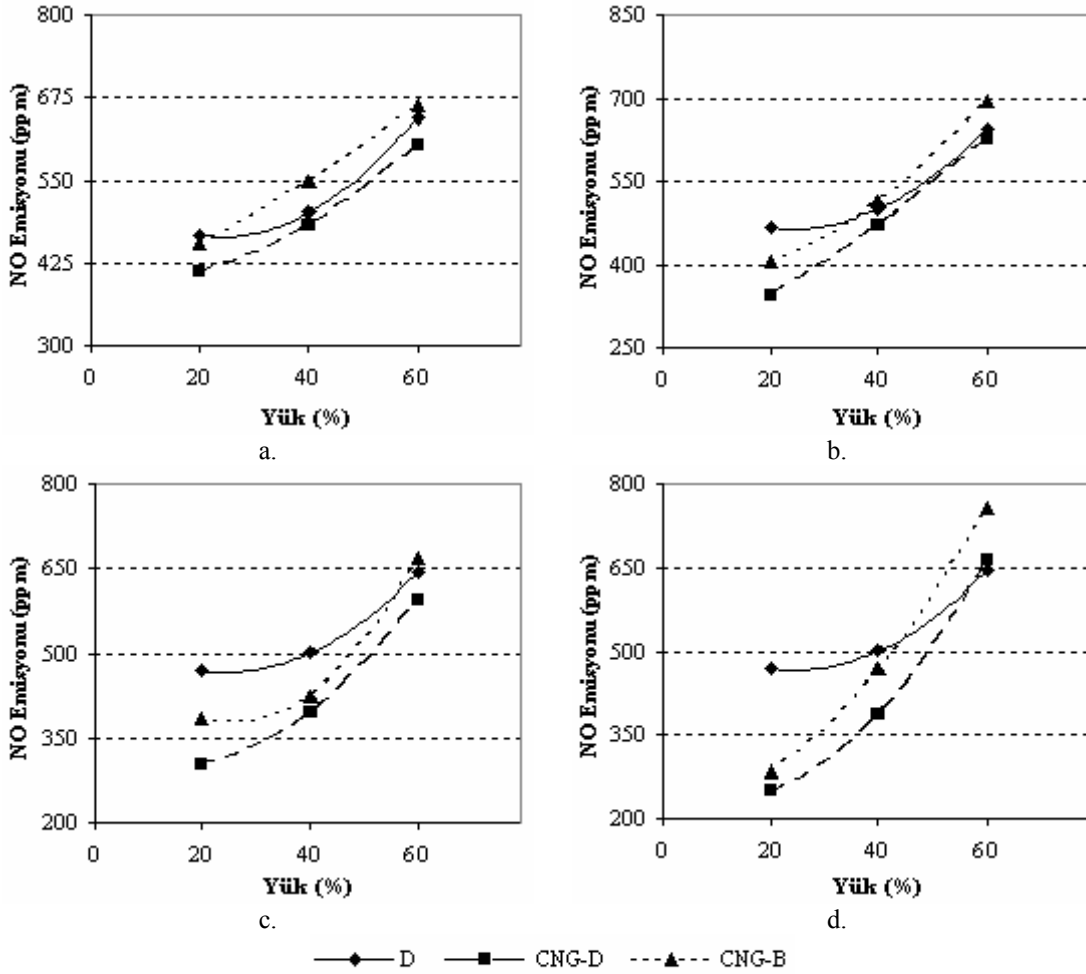
B-CNG kullanımının yanı sıra, motor devri artışının ve yük artışının CO₂ değerlerini arttırdığı, çift yakıtların içeriğindeki doğalgaz oranı artışının ise CO₂ emisyonlarını azalttığı saptanmıştır. Elde edilen verilere göre CO₂ emisyonları açısından en elverişli çalışma koşullarının düşük motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde yüksek oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımı ile sağlandığı belirlenmiştir.

Biyodizelin sahip olduğu oksijen içeriği karbon atomlarının oksijenle tepkimesini kolaylaştırmakta ve CO₂ emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, B-CNG kullanımı ile artan yakıt tüketimi değerleri silindir içerisine daha fazla yakıt püskürtülmesini sağlamakta, bu durum ise daha fazla yakıtın yanması sonucu toplam CO₂ miktarında artışa neden olmaktadır. O. M. I. Nwafor [130] gerçekleştirdiği çalışmada, kanola yağı metil esterinin bir dizel motorunda kullanımı sonucu motorin kullanımına göre CO₂ emisyonlarının artış gösterdiğini, bu durumun biyodizel kullanımıyla iyileşen yanma oluşumunun etkisiyle gerçekleştiğini vurgulamıştır. G. Labeckas ve ark. [131], çalışmalarında kanola yağı metil esterinin bir dizel motorunda kullanımı sonucu oluşan CO₂ emisyonlarının motorin kullanımına göre arttığını belirlemişlerdir. S. Jindal ve ark. [132] direk enjeksiyonlu bir dizel motorunda jatropha yağı metil esterinin kullanımıyla elde edilen CO₂ emisyonlarının motorin kullanımına göre artış gösterdiğini saptamışlardır.

6.3.1.7. Azot oksit (NO) emisyonları

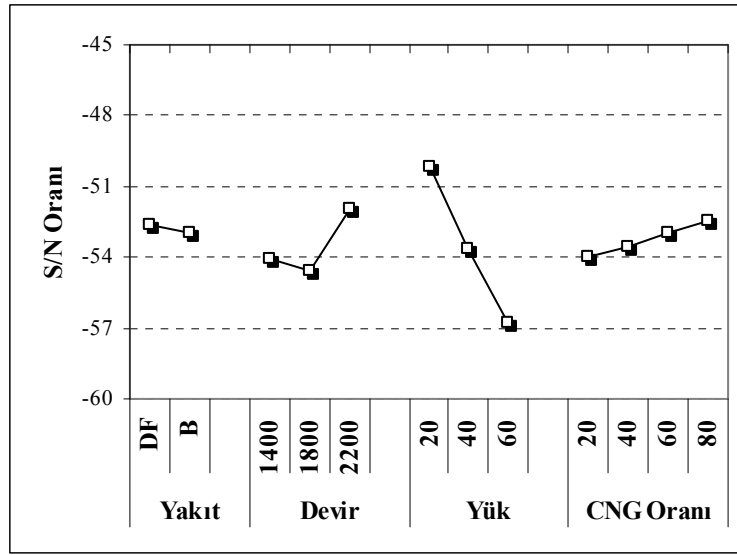
B-CNG yakıtlarıyla, motorinle ve standart çift yakıtlarla 1400 d/d'de elde edilen NO emisyonu değişimleri Şekil 6.29'da görülmektedir. B-CNG yakıtlarıyla elde edilen NO değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre artış gösterdiği belirlenmiştir. En düşük NO emisyonu değerlerinin %20 motor yükünde C80-B yakıtıyla elde edildiği saptanmıştır. Bu şartlarda C80-B yakıtıyla 284 ppm değerinde NO emisyonu belirlenmiştir. %60 motor yükünde çift yakıtlarla elde edilen NO emisyonlarının daha belirgin bir artış gösterdiği gözlenmiştir. Çift yakıtların kullanımında, C80-B yakıtının en yüksek NO değerlerine ulaştığı saptanmıştır. Bu şartlarda C80-B yakıtıyla elde edilen NO değerleri 760 ppm olarak tespit edilmiştir.

Çift yakıtların doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırılması dikkate alındığında, B-CNG yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı belirlenmiştir. Düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %11.38 ve yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %16.29 oranında artış saptanmıştır.



Şekil 6.29. Motor yüküne bağlı NO emisyonu değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Farklı motor parametrelerinin NO emisyonları üzerindeki etki düzeyleri S/N oranına bağlı olarak Şekil 6.30'da sunulmuştur. NO emisyonlarının değişiminde en etkili faktörün motor yükü olduğu belirlenmiştir. Artan motor yükü ve B-CNG kullanımının NO emisyonlarında artışa neden olduğu, kullanılan doğalgaz oranının ve motor devrinin artışı ile NO emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. Motor devrindeki değişimde 1800 d/d'ye kadar NO emisyonlarının arttığı, 1800 d/d sonrasında NO emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. Tüm veriler dikkate alındığında, NO emisyonları açısından en elverişli çalışma koşullarının yüksek motor devirlerinde, düşük motor yüklerinde ve yüksek oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımıyla sağlandığı belirlenmiştir.

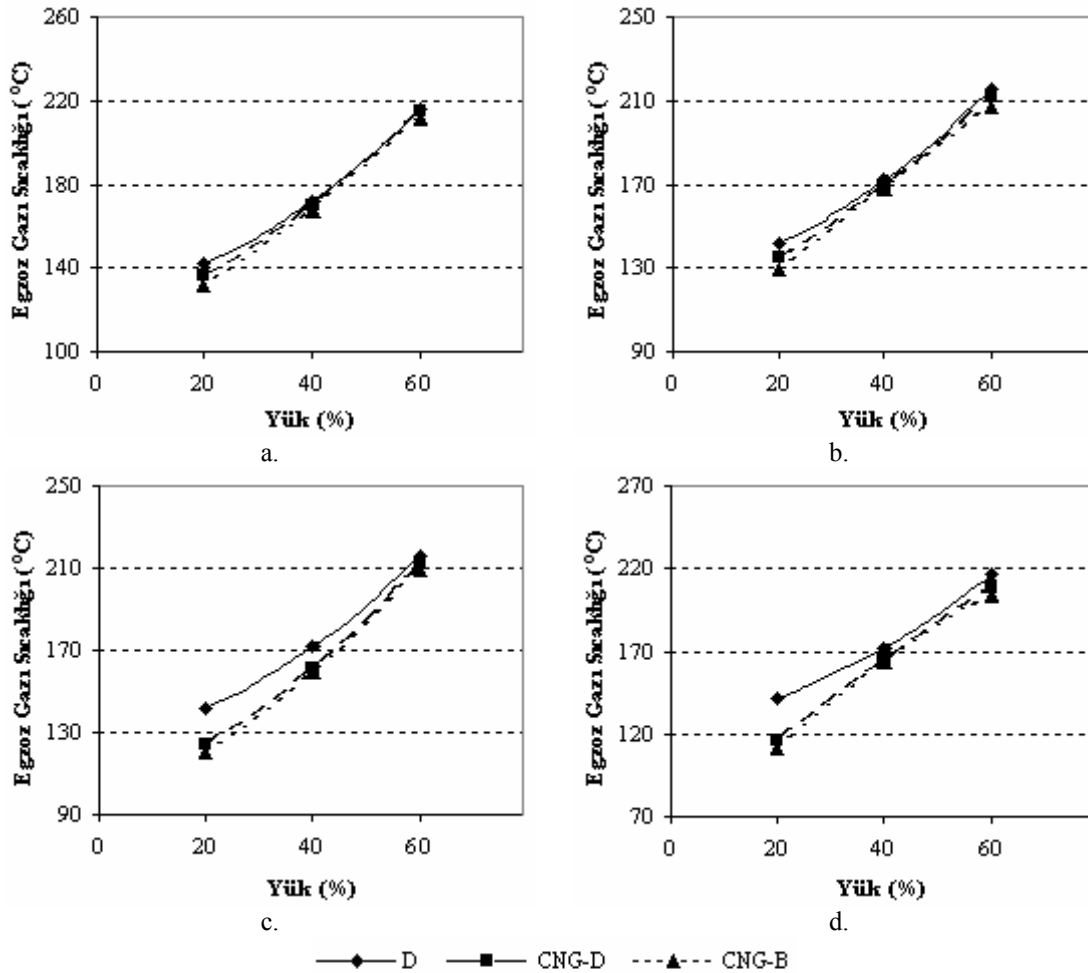


Şekil 6.30. Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Biyodizelin sahip olduğu oksijen içeriği ve biyodizel kullanımıyla artan silindir içi sıcaklıkları B-CNG yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre artmasına neden olmuştur. NO emisyonlarının oluşumunda oksijen konsantrasyonu ve silindir içi sıcaklıkları iki önemli faktördür. Buna göre biyodizelin sahip olduğu oksijen, yakıt karışımının oksijen içeriğinin artmasına neden olmaktadır. Ayrıca biyodizel yakıtının püskürtme başlangıcı motorin kullanımına göre bir miktar daha erken gerçekleşmekte ve tutuşma gecikmesi süresi bir miktar kısalmaktadır. Bu nedenle silindir içi sıcaklıkları artmakta ve biyodizel yakıtının kullanımı sonucu yüksek oranda NO emisyonu oluşumu meydana gelmektedir. F. Wu ve ark. [133] çalışmalarında beş farklı biyodizel çeşidinin (pamuk, soya, kanola, palmye ve atık bitkisel yağı metil esterleri) bir dizel motorundaki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında tüm biyodizel yakıtlarının motorin kullanımına göre NO_x oluşumunu arttırdığını belirlemişlerdir. Bu artışın biyodizel kullanımıyla artan oksijen içeriği nedeniyle gerçekleştiğini, biyodizel kullanımıyla artan silindir içi sıcaklıklarının da bu etkiye yardımcı olduğunu ifade etmişlerdir. A. Monyem ve ark. [134], çalışmalarında bir dizel motorunda soya yağından üretilen saf biyodizel kullanımının motorin kullanımına göre NO_x emisyonlarını arttırdığını belirlemişlerdir.

6.3.1.8. Egzoz gazı sıcaklığı

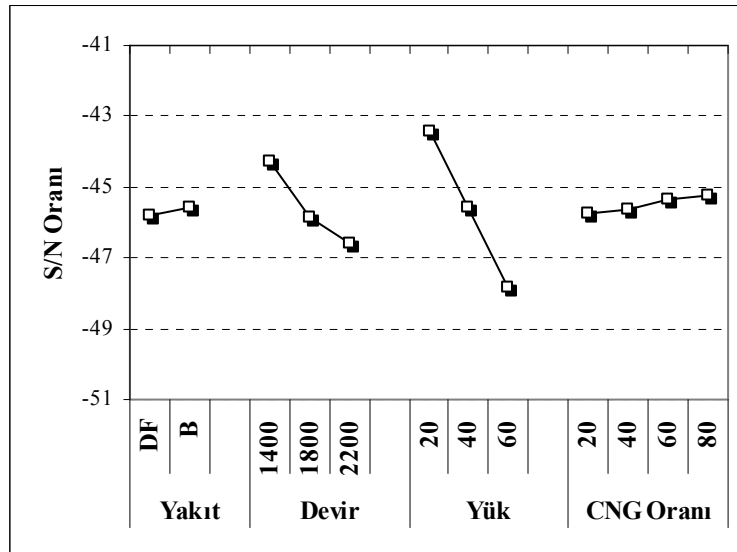
Şekil 6.31’de B-CNG yakıtlarıyla 1400 d/d’de elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının motor yüküne bağlı değişimleri, motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlerle birlikte sunulmuştur. Deney yakıtlarıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının motor yükündeki artışa bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. B-CNG yakıtlarının kullanımıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı tespit edilmiştir. En yüksek egzoz gazı sıcaklığının %60 motor yükünde düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla 212 °C, en düşük egzoz gazı sıcaklığının ise %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla 112 °C olarak elde edildiği saptanmıştır.



Şekil 6.31. Motor yüküne bağlı egzoz gazı sıcaklığı değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtların doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırılması dikkate alındığında, B-CNG yakıtları arasında belirgin bir değişim gerçekleşmediği, sonuçların benzer değerler gösterdiği saptanmıştır. Elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının düşük oranda doğalgaz içeren C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.04 oranında ve yüksek oranda doğalgaz içeren C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre ise %2.34 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 6.32’de farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri sunulmuştur. Elde edilen verilere göre B-CNG yakıtlarının kullanımıyla ve doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak egzoz gazı sıcaklıklarının azaldığı belirlenmiştir. Motor devrindeki ve motor yükündeki artış ise egzoz gazı sıcaklıklarının artmasına neden olmuştur.



Şekil 6.32. Farklı motor parametrelerinin egzoz gaz sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri

En yüksek egzoz gazı sıcaklık değerleri yüksek motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, düşük oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımıyla sağlanmıştır. En düşük egzoz gazı sıcaklık değerleri ise düşük motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde yüksek oranda doğalgaz içeren B-CNG yakıtıyla elde edilmiştir.

Biyodizelin motorine göre sahip olduğu düşük ısıl değer, biyodizel içerikli çift yakıtların kullanımıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının standart çift yakıtların

kullanımına göre azalmasında etkili olmuştur. Bunun yanı sıra biyodizel yakıtlarının erken püskürtme başlangıcı nedeniyle çift yakıt yanmasını daha erken başlatması, çift yakıt kullanımı ile yanmanın daha erken tamamlanmasını sağlayarak egzoz gazı sıcaklıklarının azalmasına neden olmuştur. C. Y. Lin ve ark. [135] çalışmalarında atık kızartma yağlarından ürettikleri biyodizel yakıtının bir dizel motoru üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Biyodizel yakıtının kullanımı sonucu egzoz gazı sıcaklıklarının motorin kullanımına göre daha düşük değerlerde elde edildiğini saptamışlardır. Egzoz gazı sıcaklıklarının, biyodizel içeriğindeki oksijen nedeniyle iyileşen yanma sonucunda, yanma süresinin kısılması sonucu artan yanma sıcaklıklarının etkisiyle azaldığını ifade etmişlerdir.

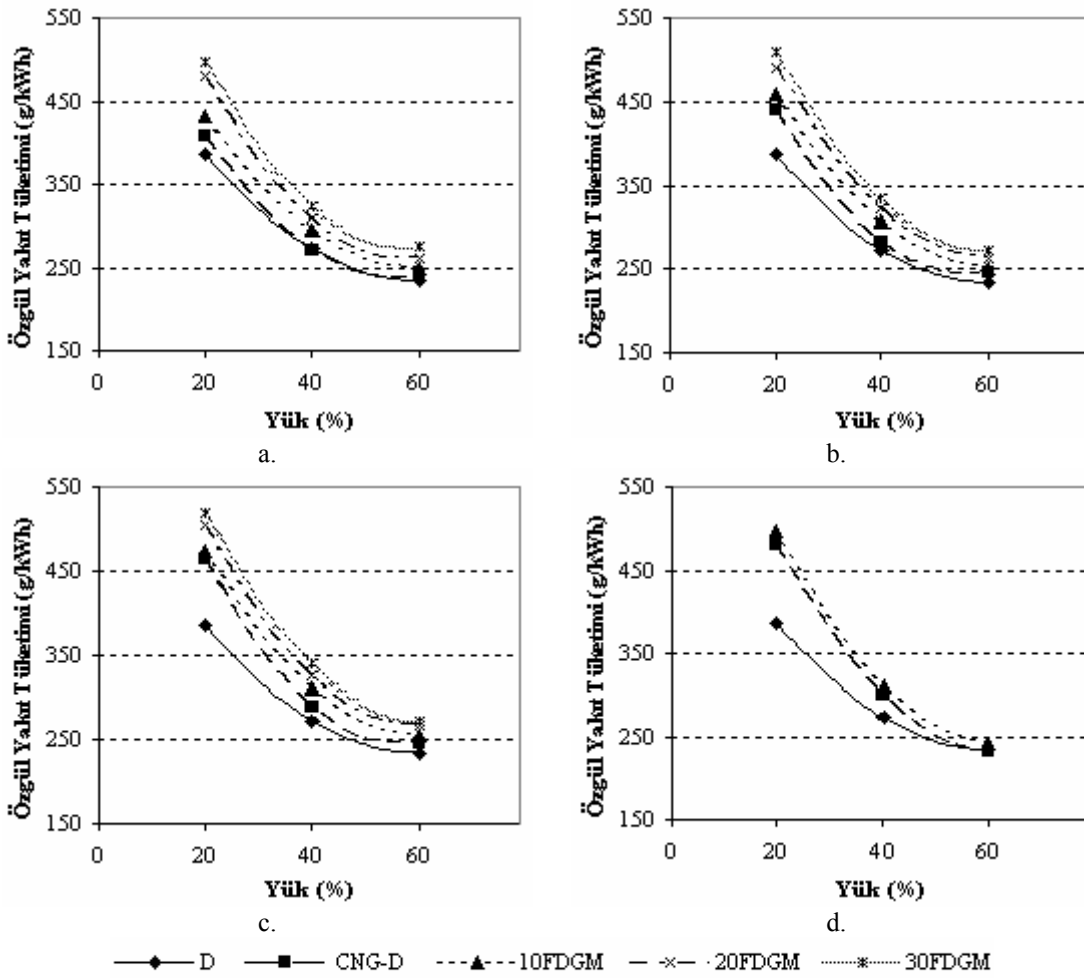
6.3.2. Fumigasyon yöntemiyle DGM kullanımı (F-DGM)

Çalışmanın bu kısmında, DGM katkısı fumigasyon yöntemiyle ana yakıt olan doğalgaz içerisine karıştırılmıştır (F-DGM). DGM ve doğalgaz karışımından oluşan ana yakıt, emme manifoldu aracılığıyla silindire gönderilmiştir. Çalışmanın bu kısmında doğalgaza %10, %20 ve %30 oranlarında DGM katkısı uygulanmıştır. DGM içerikli deney yakıtları olarak 20CF10DGM, 20CF20DGM, 20CF30DGM, 40CF10DGM, 40CF20DGM, 40CF30DGM, 60CF10DGM, 60CF20DGM, 60CF30DGM ve 80CF10DGM yakıtları kullanılmıştır. Deney yakıtlarıyla elde edilen veriler, grafikler yardımıyla sunulmuştur. Deneylerde onbeş farklı yakıt kullanıldığından dolayı, elde edilen verilerin değerlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla tek bir grafik yerine, eşdeğer oranda doğalgaz kullanımlarından oluşan dört farklı grafikte değerlendirmeler yapılmıştır. Şekillerdeki a grafiklerinde %20 doğalgaz içeren çift yakıtlar ve motorin, b grafiklerinde %40 doğalgaz içeren çift yakıtlar ve motorin, c grafiklerinde %60 doğalgaz içeren çift yakıtlar ve motorin, d grafiklerinde ise %80 doğalgaz içeren çift yakıtlar ve motorin değerleri yer almaktadır.

6.3.2.1. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT)

En yüksek motor döndürme momentinin elde edildiği 1400 d/d'de, motorinle, standart çift yakıtlarla ve F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motor

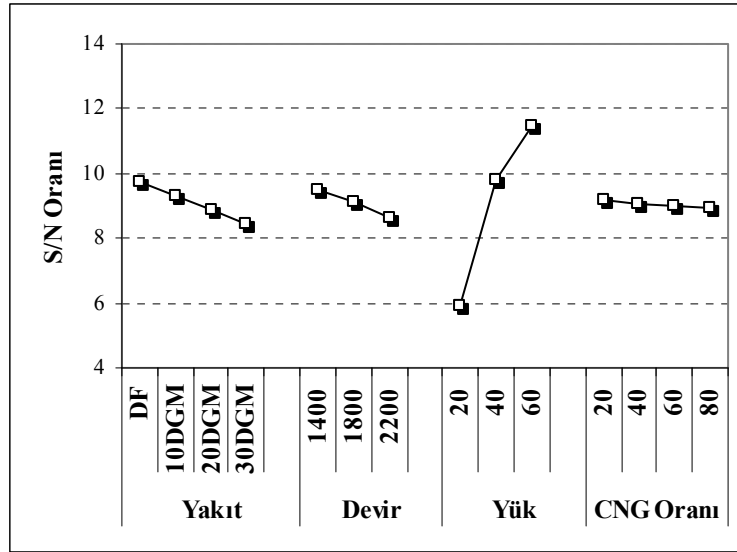
yüküne bağlı değişimleri Şekil 6.33'te görülmektedir. Deney yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerleri motor yükü ile azalan bir eğilime sahiptir. 1400 d/d'deki verilere göre, en yüksek ÖYT değerlerinin yüksek oranda DGM katkısı içeren 20CF30DGM ve 60CF30DGM yakıtlarıyla düşük motor yüklerinde, en düşük ÖYT değerlerinin ise düşük oranda DGM katkısı içeren 80CF10DGM yakıtıyla yüksek motor yüklerinde elde edildiği belirlenmiştir. %20 motor yükünde motorinle 387 g/kWh olarak belirlenen ÖYT değeri bu şartlarda 20CF30DGM yakıtıyla 497 g/kWh, 60CF30DGM yakıtıyla 502 g/kWh olarak elde edilmiştir. %60 motor yükünde ise 234 g/kWh'lik motorin değerine karşılık 80CF10DGM yakıtıyla elde edilen ÖYT değeri 237 g/kWh olarak saptanmıştır. 1800 d/d ve 2200 d/d'lerde elde edilen ÖYT değerleri incelendiğinde, 1400 d/d'de elde edilen verilerle benzer eğilimlerin gerçekleştiği gözlenmiştir.



Şekil 6.33. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtlar doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırıldığında, 1400 d/d'deki ÖYT değişimleri arasında en yüksek değerler C20-D yakıtına göre %18.95 oranında artış gösteren 20CF30DGM yakıtıyla elde edilmiştir. Bu devirde en düşük ÖYT değişimi ise C80-D yakıtına göre %4.18 oranında artış gösteren 80CF10DGM yakıtıyla tespit edilmiştir.

Şekil 6.34'te farklı motor parametrelerinin ÖYT değerleri üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. ÖYT değerleri üzerinde en etkili faktörler sırasıyla motor yükü, yakıt türü, motor devri ve kullanılan doğalgaz oranı olarak belirlenmiştir. Motor yükündeki artış ile ÖYT değerlerinin azaldığı, DGM oranındaki, doğalgaz oranındaki ve motor devrindeki artışların ise ÖYT değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre ÖYT değerleri açısından en elverişli çalışma şartlarının düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, düşük oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımıyla elde edildiği belirlenmiştir.



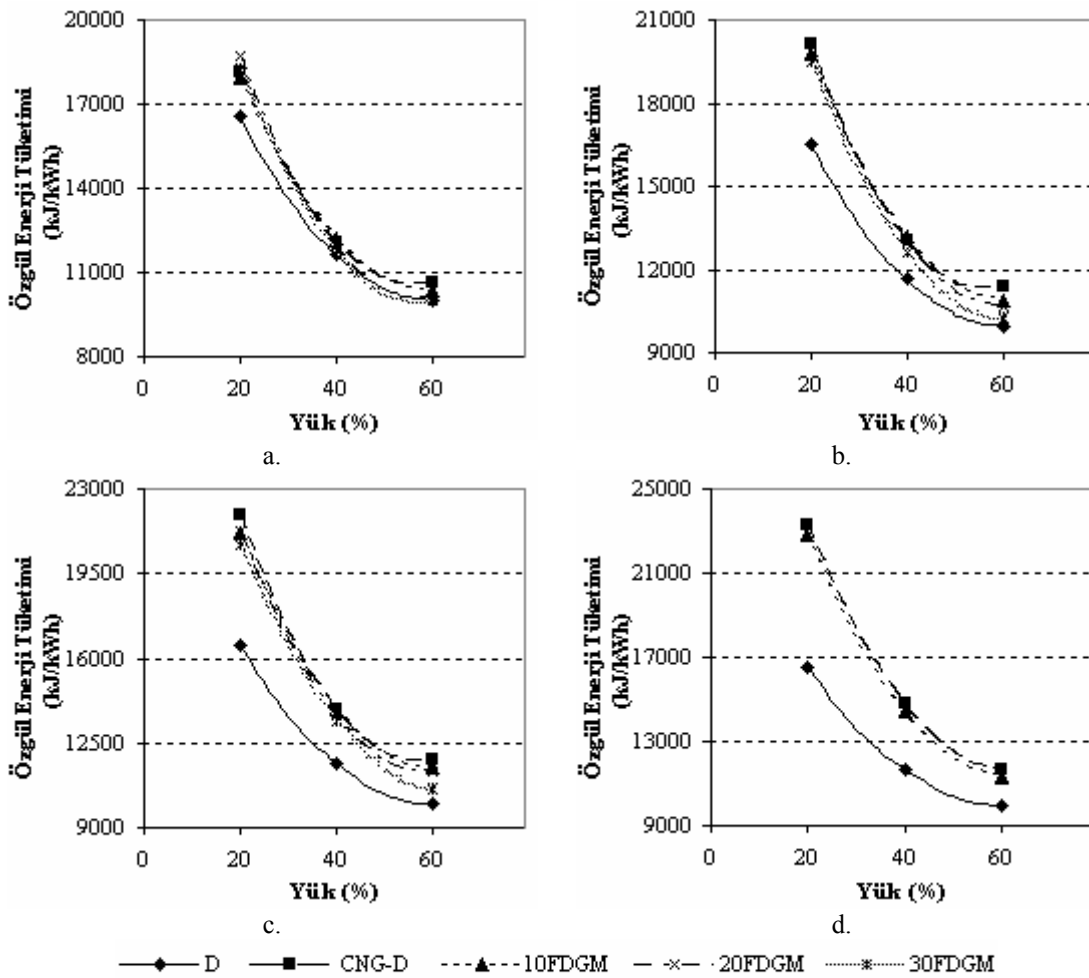
Şekil 6.34. Farklı motor parametrelerinin ÖYT değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖYT değerlerinde standart çift yakıtların kullanımına göre meydana gelen artış, DGM'nin alt ısıl değerinin motorine göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı enerji içeriğinin sağlanabilmesi için silindire gönderilmesi gereken DGM miktarı motorine göre daha fazladır. Bu durum DGM kullanımıyla elde edilen yakıt tüketimi ve özgül yakıt tüketimi değerlerini arttırmaktadır. J. Song ve ark. [136] DGM ve motorin içerikli yakıt

karışımları ile yaptıkları çalışmada, DGM kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre arttığını ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra DGM katkı oranındaki artışa bağlı olarak ÖYT değerlerinin artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

6.3.2.2. Özgül enerji tüketimi (ÖET)

1400 d/d'de motorinle, standart çift yakıtlarla ve F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖET değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri Şekil 6.35'te görülmektedir.



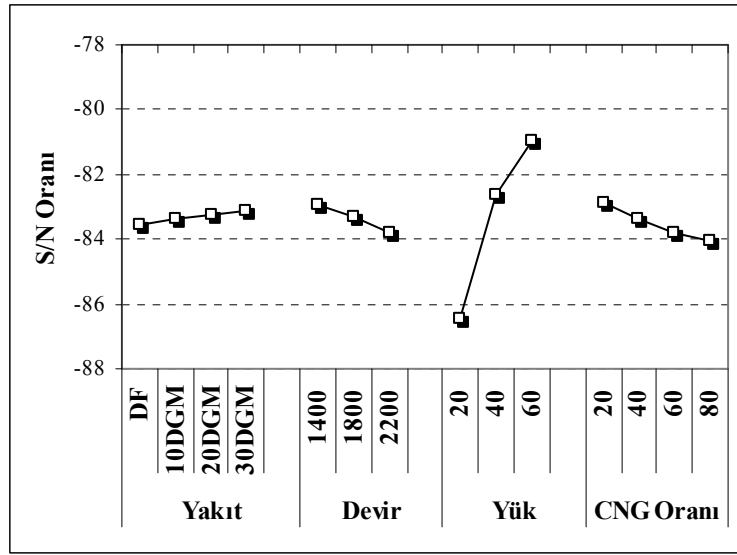
Şekil 6.35. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖET değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

1400 d/d'de elde edilen ÖET değerlerinin motor yükündeki artışla birlikte azaldığı ve çift yakıtların kullanımıyla elde edilen ÖET değerlerinin genel olarak motorinden daha yüksek değerlerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, yüksek

yüklerde yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıtların kullanımıyla, motorin kullanımından bir miktar daha düşük ÖET değerleri saptanmıştır. F-DGM yakıtları arasında en yüksek ÖET değerleri yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla düşük motor yüklerinde elde edilmiştir. Bu şartlarda motorinle 16529 kJ/kWh olarak elde edilen ÖET değerlerinin 80CF10DGM yakıtıyla 22891 kJ/kWh değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. En düşük ÖET değerleri yüksek oranda DGM katkısı içeren 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla sağlanmıştır. Yüksek motor yüklerinde motorin kullanımıyla elde edilen 9986 kJ/kWh'lik ÖET değeri, 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla sırasıyla 9969 kJ/kWh ve 10264 kJ/kWh olarak saptanmıştır.

Çift yakıtlar doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırıldığında, doğalgaz oranındaki ve DGM oranındaki artışın ÖET değerlerinde azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Elde edilen en düşük ÖET değişimi 20CF10DGM yakıtıyla, en yüksek ÖET değişimi ise 60CF30DGM yakıtıyla saptanmıştır. 20CF10DGM yakıtı ile elde edilen ÖET değerlerinde C20-D yakıtına göre %1.04 oranında, en yüksek ÖET değişiminin elde edildiği 60CF30DGM yakıtıyla ise C60-D yakıtına göre %6.89 oranında azalma saptanmıştır. Bunun yanı sıra, yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla C80-D yakıtına göre %2.36 oranında azalma gerçekleşmiştir.

F-DGM kullanımı, motor devri, motor yükü ve kullanılan doğalgaz oranından oluşan farklı motor parametrelerinin ÖET değerleri üzerindeki etki düzeyleri Şekil 6.36'da görülmektedir. Motor yükünün ÖET değerleri üzerinde en etkili faktör olduğu ve motor yükündeki artışın ÖET değerlerini azalttığı belirlenmiştir. Çift yakıtlarda kullanılan DGM miktarındaki artışın ÖET değerlerini azalttığı, motor devrindeki ve doğalgaz oranındaki artışın ise ÖET değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. ÖET değerleri açısından en elverişli çalışma şartlarının, düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, düşük oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıtların kullanımıyla elde edildiği saptanmıştır.



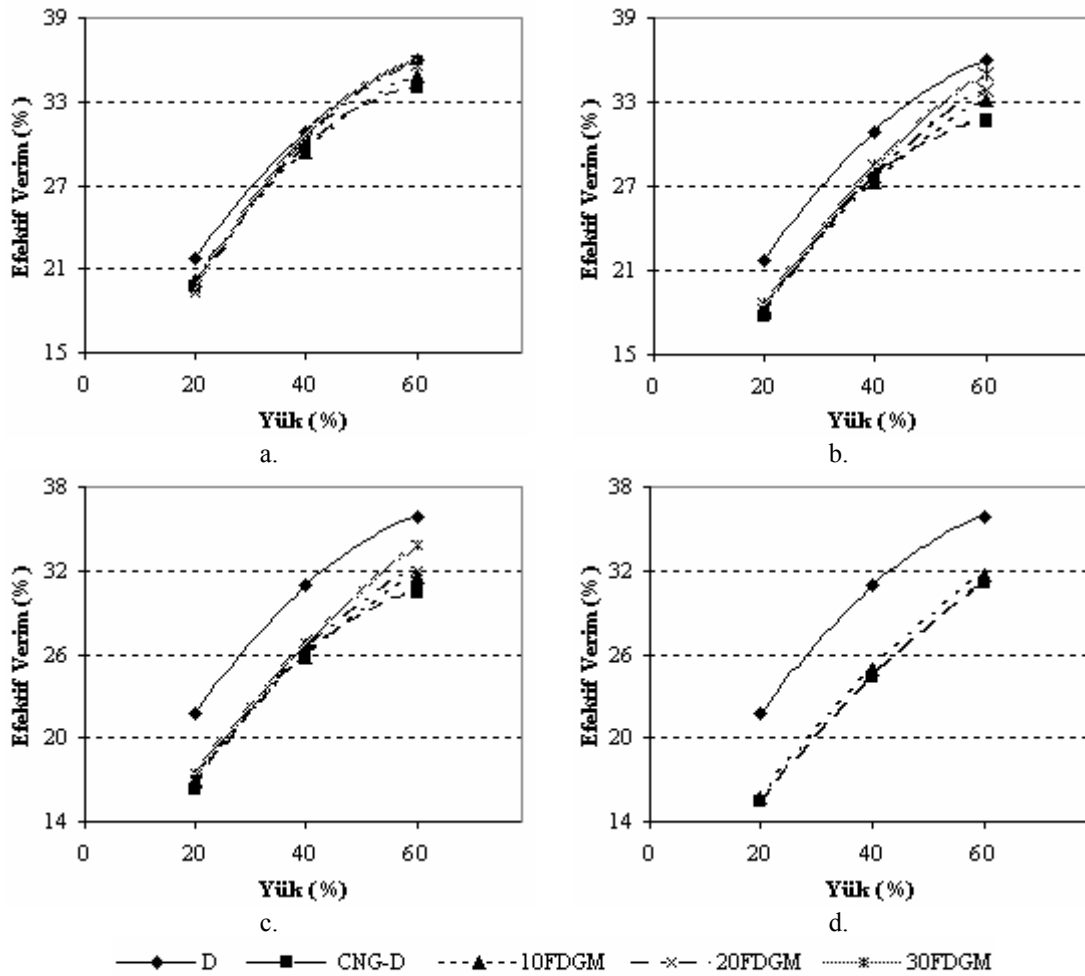
Şekil 6.36. Farklı motor parametrelerinin ÖET değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

ÖET yakıt verimliliğinin göstergelerinden biridir ve ÖET değerlerinin azalması aynı miktardaki yakıttan daha fazla faydalandığının bir ifadesidir. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen ÖET değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre azalması bu durumu ortaya koymaktadır. DGM'nin sahip olduğu ısıl değer motorine göre daha düşük olmasına rağmen, eşdeğer gücü elde etmek için kullanılan birim enerji daha düşüktür. Bu koşulda elde edilen ÖET değerleri standart çift yakıtların kullanımına göre azalma göstermiştir. MD. N. Nabi ve ark. [137] oksijen içerikli katkı maddelerinin bir dizel motorundaki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında, DGM kullanımı sonucunda ÖET değerlerinde önemli iyileşmeler tespit etmişlerdir. Çalışmada DGM'nin oksijen içeriği ile yanma oluşumunu iyileştirdiğini ve bu durumun ÖET değerlerini azalttığını vurgulamışlardır.

6.3.2.3. Efektif verim

Motorinle, standart çift yakıtlarla ve F-DGM yakıtlarıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri Şekil 6.37'de sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, efektif verim değerlerinin motor yükündeki artışa bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Çift yakıt olarak doğalgaz kullanımıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. F-DGM kullanımıyla ise efektif verim değerlerinin standart çift yakıt kullanımlarına göre arttığı saptanmıştır. F-DGM yakıtları arasında en yüksek efektif verim değerleri yüksek

oranda DGM katkısı içeren 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla, en düşük efektif verim değerleri yüksek oranda doğalgaz ve düşük oranda DGM katkısı içeren 80CF10DGM yakıtıyla elde edilmiştir. En yüksek efektif verim değerlerinin elde edildiği yüksek motor yükünde, motorinle %36 olarak elde edilen efektif verim değeri, 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla sırasıyla %36.2 ve %35.1 olarak belirlenmiştir. En düşük efektif verim değerlerinin belirlendiği şartlarda, motorin kullanımıyla elde edilen efektif verim değeri %21.8, 80CF10DGM yakıtıyla elde edilen efektif verim değeri ise %16.1 olarak saptanmıştır.

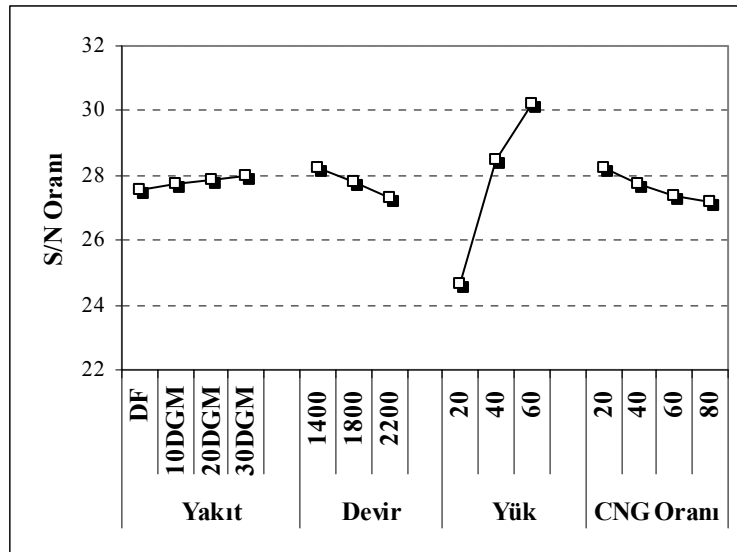


Şekil 6.37. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen efektif verim değerlerinin, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtlar doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırıldığında, DGM oranının ve doğalgaz oranının artışı ile birlikte efektif verim değerlerinin de iyileştiği belirlenmiştir. En düşük efektif verim değeriminin 20CF10DGM yakıtı ile elde

edildiği ve C20-D yakıtına göre ortalama olarak %1.08 oranında arttığı saptanmıştır. En yüksek efektif verim değişimi C60-D yakıtına göre ortalama %7.49 oranında artış gösteren 60CF30DGM yakıtıyla sağlanmıştır. Yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla elde edilen efektif verim değişimi ise C80-D yakıtına göre ortalama %2.42 oranında artmıştır.

Şekil 6.38’de farklı motor parametrelerinin efektif verim değerleri üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. Efektif verim değerlerinde en yüksek etki düzeyine sahip olan faktörün motor yükü olduğu belirlenmiştir. Motor yükündeki ve DGM içeriğindeki artışın efektif verim değerlerini arttırdığı, motor devrindeki ve doğalgaz oranındaki artışın ise efektif verim değerlerini azalttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen Ki Kare Testi sonuçlarına göre efektif verim değerleri açısından en elverişli çalışma şartları, düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, yüksek oranda DGM katkısı ve düşük oranda doğalgaz içeren çift yakıtların kullanımıyla sağlanmıştır.



Şekil 6.38. Farklı motor parametrelerinin efektif verim değerlerinde meydana getirdiği etki düzeyleri

F-DGM yakıtlarıyla elde edilen efektif verim değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre artması, DGM içerikli çift yakıtların yakıt veriminin daha yüksek olduğunun bir göstergesidir. Bu koşulda DGM'nin sahip olduğu ısıl değer motorine ve doğalgaza göre daha düşük olmasına rağmen yakıt tüketim miktarı daha makul düzeyde elde edilmiştir. F-DGM yakıtlarıyla iyileşen yanma karakteristiği özgül enerji tüketiminde azalmaya ve efektif verim değerlerinde artışa neden olmuştur.

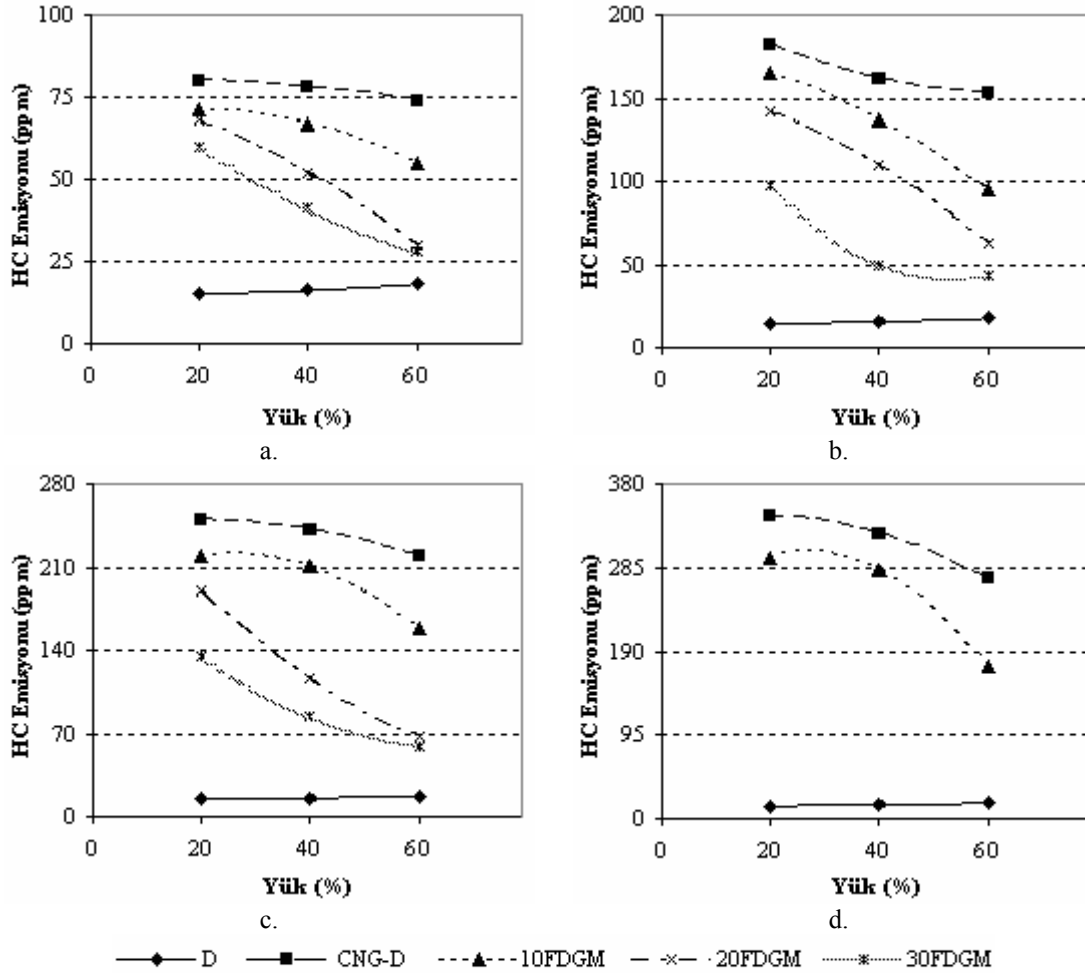
Y. Di ve ark. [138] çalışmalarında farklı oranlardaki DGM katkılarının bir dizel motordaki etkilerini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda %25.7 oranında DGM içeriğine kadar efektif verim değerlerinde artış belirlemişlerdir. %53 oranında DGM kullanılan deney yakıtında ise efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre önemli oranda azaldığını vurgulamışlardır. Y. Ren ve ark. [119] oksijen içerikli yakıt karışımlarının bir dizel motorundaki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada DGM kullanımı ile efektif verim değerlerinin arttığını ve bu artışta iki faktörün etkili olduğunu belirtmişlerdir. Bu faktörler arasında ilk olarak DGM'nin sahip olduğu oksijen içeriğini, ikinci olarak DGM kullanımıyla yanma prosesinin motorin kullanımına göre daha kısa sürede ve daha etkili gerçekleştiğini vurgulamışlardır.

6.3.2.4. Hidrokarbon (HC) emisyonları

Motorinle, standart çift yakıtlarla ve F-DGM yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimleri Şekil 6.39'da görülmektedir. Standart çift yakıtlarla motorin kullanımına göre artan HC emisyonlarının F-DGM kullanımıyla önemli oranda azaldığı tespit edilmiştir. Özellikle yüksek yüklerde daha belirgin azalmalar gözlenmiştir. En yüksek HC emisyonları %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla 307 ppm değerinde elde edilmiştir. Bu şartlarda motorinle elde edilen HC emisyon değerleri 15 ppm olarak saptanmıştır. Çift yakıtlar arasında en düşük HC emisyonunun ise %60 motor yükünde 20CF30DGM yakıtıyla 28 ppm değerinde elde edildiği belirlenmiştir. Bu şartlarda motorin kullanımıyla belirlenen HC emisyonunun 18 ppm değerinde elde edildiği tespit edilmiştir.

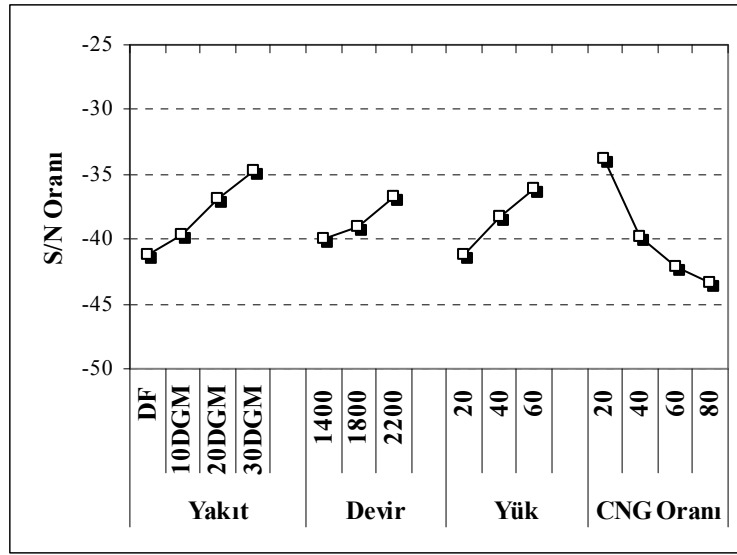
Çift yakıtların doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırılması dikkate alındığında, F-DGM kullanımı ile elde edilen HC emisyonu değerlerinin artan doğalgaz ve DGM oranları ile azaldığı belirlenmiştir. Standart çift yakıtların kullanımına göre elde edilen en yüksek HC emisyonu değerleri 20CF10DGM yakıtıyla saptanmıştır. Bu yakıtla belirlenen azalma oranı C20-D yakıtına göre %17.11 olarak belirlenmiştir. Yüksek oranda doğalgaz içeren ve yüksek DGM içeriğine sahip 60CF30DGM yakıtıyla en düşük HC emisyonu değerleri elde edilmiştir. Bu yakıtla C60-D yakıtına

göre %61.44 oranında azalma sağlamıştır. Yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla ise C80-D yakıtına göre %21.14 oranında azalma tespit edilmiştir.



Şekil 6.39. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Şekil 6.40'ta farklı motor parametrelerinin HC emisyonları üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. Doğalgaz oranındaki değişim ve F-DGM kullanımı en yüksek etki düzeyine sahip faktörler olarak belirlenmiştir. Doğalgaz oranındaki artışın HC değerlerini arttırdığı, DGM oranındaki, motor devrindeki ve motor yükündeki artışların ise HC emisyonlarını azalttığı tespit edilmiştir. HC emisyonları açısından en elverişli çalışma şartlarının yüksek motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıtların kullanımıyla elde edildiği belirlenmiştir.



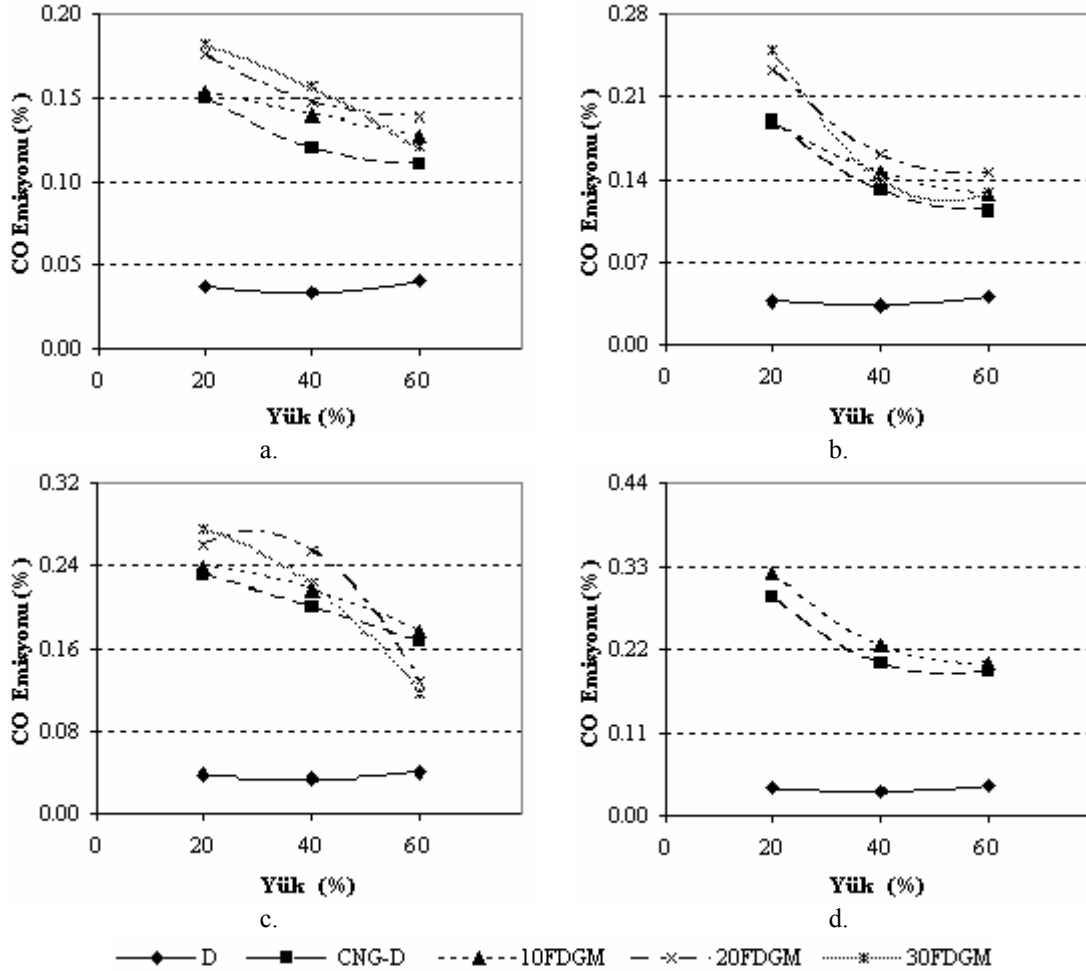
Şekil 6.40. Farklı motor parametrelerinin HC emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

F-DGM kullanımıyla elde edilen HC emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre azalmasında iki unsur öne çıkmaktadır. Birinci unsur; doğalgaz ile DGM'nin birlikte sisteme uygulanmasından dolayı egzozda kaçan HC'lar azalmaktadır. İkinci unsur ise DGM'in sahip olduğu yüksek setan sayısı ve oksijen içeriği nedeniyle iyileşen yanma özellikleridir. Yüksek setan sayısına ve oksijen içeriğine sahip DGM katkısı doğalgaz yanmasını kolaylaştıran bir etki meydana getirerek daha fazla oranda çift yakıtın yanmasını sağlamıştır. Bu durum ise eşdeğer doğalgaz oranına sahip çift yakıtlar arasında, F-DGM yakıtlarıyla elde edilen HC emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre azalmasına önemli katkı sağlamıştır. P. Baskar ve ark. [139] oksijen içerikli katkı yakıtlarının kullanımı hususunda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, doğal emişli, direk enjeksiyonlu ve su soğutmalı bir dizel motorunda DGM ve diphenyl ether (DPE) katkılarının etkilerini araştırmışlardır. Elde ettikleri verilere göre HC emisyonlarında DGM kullanımı ile motorin kullanımına göre önemli oranda azalma tespit etmişlerdir. Çalışmalarında DGM katkısının sahip olduğu oksijen içeriğini, yanmayı iyileştiren ve HC emisyonlarında azalmaya yol açan ana faktör olarak vurgulamışlardır.

6.3.2.5. Karbon monoksit (CO) emisyonları

Şekil 6.41'de motorinle, standart çift yakıtlarla ve F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonu değerlerinin motor yüküne bağlı değişimleri sunulmuştur. Elde edilen

veriler incelendiğinde, çift yakıtların kullanımı ile motor yükündeki artışa bağlı olarak azalan bir eğilim dikkat çekmektedir.

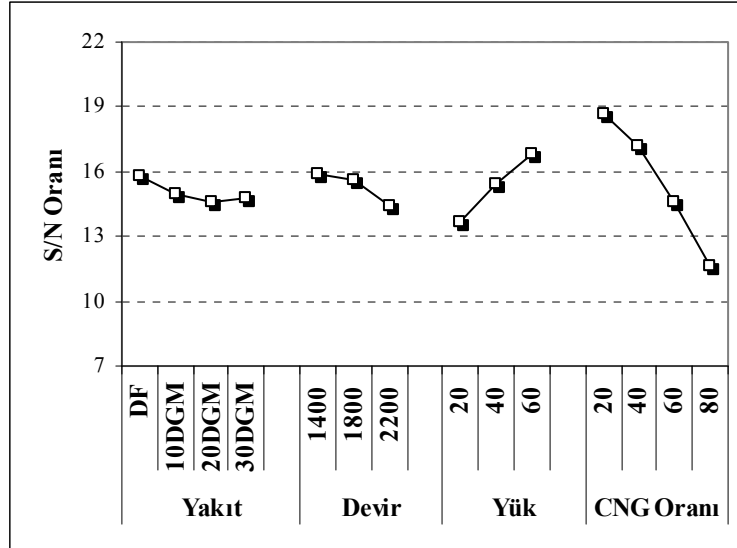


Şekil 6.41. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Genel olarak F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonu değerlerinin, motorin ve standart çift yakıtların kullanımına göre artış göstermesine rağmen, özellikle yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıtların motor yükündeki artışa bağlı olarak belirgin bir azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. 1400 d/d'de elde edilen veriler dikkate alındığında, en yüksek CO emisyonu değerlerinin %20 motor yükünde 80CF10DGM yakıtıyla elde edildiği belirlenmiştir. Bu şartlarda motorinle %0.04 değerinde elde edilen CO emisyonlarının 80CF10DGM yakıtıyla %0.32 değerine ulaştığı saptanmıştır. Çift yakıtlar arasında en düşük CO emisyonu 60CF30DGM yakıtıyla %0.12 değerinde ve %60 motor yükünde elde edilmiştir.

DGM katkısı içeren deney yakıtlarıyla elde edilen CO emisyonu değerleri, eşdeğer doğalgaz oranına sahip standart çift yakıtların kullanımına göre artış göstermiştir. Ancak bu artış oranlarının karşım içeriğindeki doğalgaz oranına göre azaldığı belirlenmiştir. En yüksek CO emisyonu değişimi C40-D yakıtına göre ortalama %25.31 oranında artış gösteren 40CF20DGM yakıtıyla, en düşük CO emisyonu değişimi ise C60-D yakıtına göre benzer değerler gösteren 60CF30DGM yakıtıyla elde edilmiştir.

Şekil 6.42’de yakıt türü, motor devri, motor yükü ve kullanılan doğalgaz oranından oluşan faktörlerin CO emisyonlarındaki etki düzeyleri sunulmuştur.



Şekil 6.42. Farklı motor parametrelerinin CO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

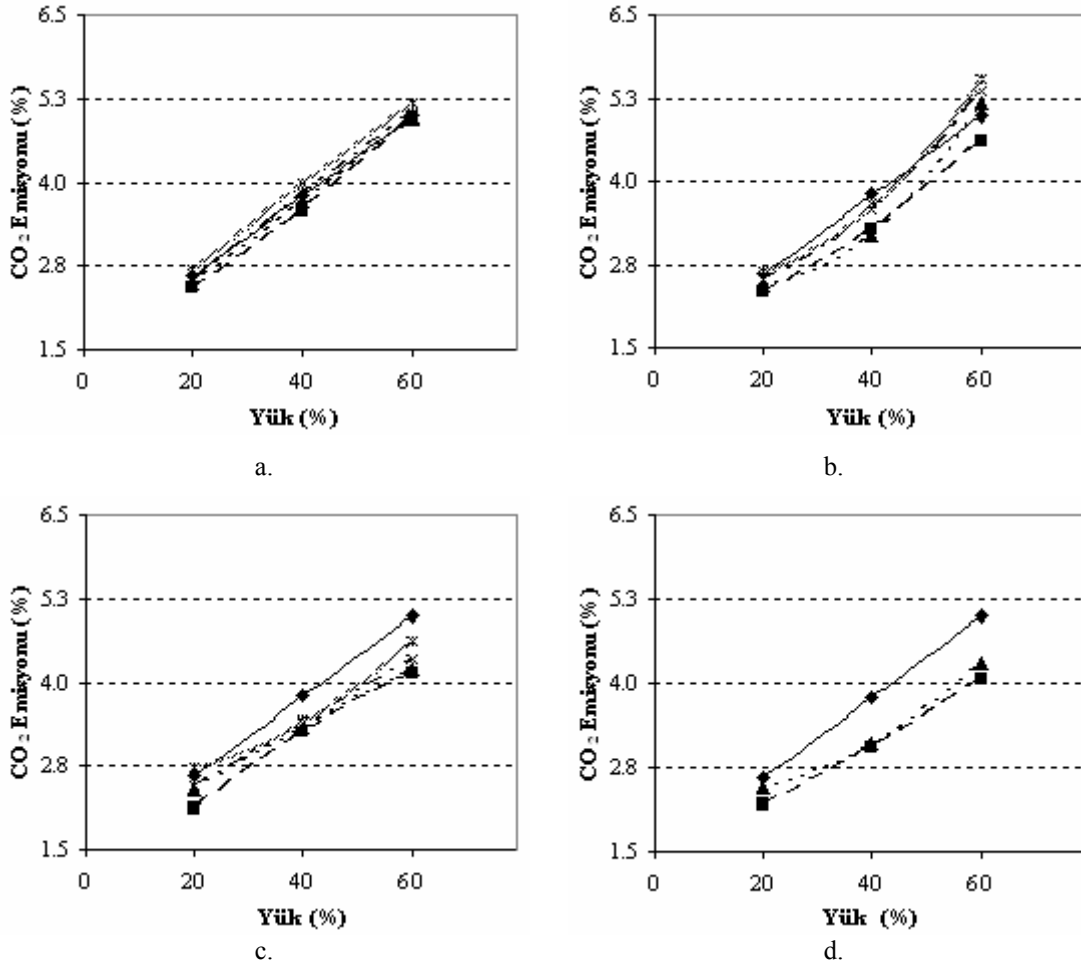
F-DGM ve doğalgaz kullanım faktörlerinin CO oluşumunda diğer faktörlere göre en yüksek etkiyi gösterdiği, her iki faktördeki kullanım oranı artışının CO emisyon değerlerini arttırdığı saptanmıştır. Motor devrindeki artışların CO emisyonlarında artışa neden olduğu, motor yükündeki artışın ise CO emisyonlarının azalmasını sağladığı belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre CO emisyonları açısından en elverişli çalışma şartları standart çift yakıtların kullanımıyla, düşük motor devirlerinde ve yüksek motor yüklerinde, düşük oranda kullanılan doğalgaz içeriğiyle sağlanmıştır.

CO oluşumundaki önemli nedenler arasında silindir içerisinde yeterli oksijen bulunmayışı ve heterojen karışım bölgelerinin varlığı gösterilmektedir. Bunun yanı sıra yakıtların C/H oranlarının da etkili olduğu bilinmektedir. DGM katkısı oksijen içerikli bir yakıt olarak silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonunu artırıcı bir etki meydana getirmektedir. Ancak bu durum CO emisyonlarının F-DGM kullanımıyla azalmasına yeterli olmamıştır. DGM'nin sahip olduğu C/H oranının doğalgazdan daha yüksek oluşu, F-DGM kullanılan çift yakıtların C/H içeriğini arttırmaktadır. Bu durumun CO artışının nedenlerinden biri olduğu düşünülmektedir. DGM'in yoğunluğu motorin ve doğalgaz yoğunluğundan yüksektir. Bu durum CO emisyonlarındaki artış için silindir içerisinde ve özellikle düşük oranda doğalgaz kullanılan çift yakıtlarda heterojen karışımların varlığını düşündürmektedir.

6.3.2.6. Karbon dioksit (CO₂) emisyonları

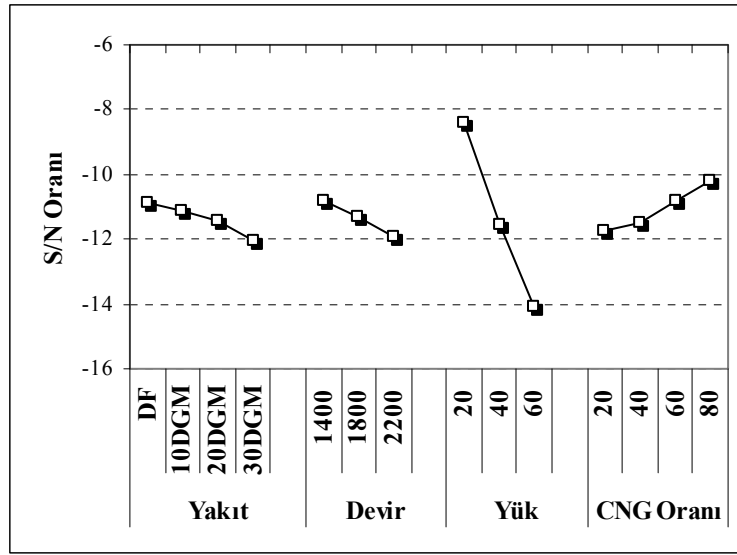
F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO₂ emisyonu değerlerinin motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlere göre değişimleri, motor yüküne bağlı olarak Şekil 6.43'te sunulmuştur. En yüksek motor döndürme momentinin sağlandığı 1400 d/d'de elde edilen verilere göre, F-DGM yakıtlarıyla belirlenen CO₂ emisyonu değerlerinin standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı tespit edilmiştir. F-DGM yakıtları arasında motorin kullanımına göre en yüksek CO₂ emisyonu değerleri 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla %60 motor yükünde, en düşük CO₂ emisyonu değerleri ise yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla %20 motor yükünde elde edilmiştir. Bu şartlarda motorinle %60 motor yükünde %5.0, %20 motor yükünde %2.6 değerlerinde elde edilen CO₂ emisyonlarının, %60 motor yükünde 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla %5.2 ve %5.5, %20 motor yükünde 80CF10DGM yakıtıyla %2.4 değerlerinde elde edildiği belirlenmiştir.

Çift yakıtlar eşdeğer doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırıldığında, en düşük CO₂ emisyonu değişiminin düşük oranda DGM katkısı içeren çift yakıtlarla elde edildiği, DGM oranı arttıkça CO₂ emisyonlarının da arttığı saptanmıştır. En düşük CO₂ emisyonu değişimi C20-D yakıtına göre %13.83 oranında artan 20CF10DGM yakıtıyla, en yüksek CO₂ emisyonu değişimi ise C60-D yakıtına göre %15.64 oranında artan 60CF30DGM yakıtıyla elde edilmiştir.



Şekil 6.43. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen CO₂ emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80 CNG içerikli çift yakıtlar)

Şekil 6.44'te farklı motor parametrelerinin CO₂ emisyonları üzerindeki etki düzeyleri görülmektedir. CO₂ emisyonları üzerindeki en etkin faktörün motor yükü olduğu ve motor yükündeki artışın CO₂ emisyonlarını arttıran bir etki oluşturduğu saptanmıştır. Motor devrindeki artışın ve F-DGM kullanımının CO₂ emisyonlarını arttırdığı, doğalgaz kullanımının ise CO₂ emisyonlarını azalttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, doğalgaz oranındaki artışın CO₂ emisyonlarını daha da azaltırken, DGM oranındaki artışla birlikte CO₂ emisyonlarının arttığı gözlenmiştir. Gerçekleştirilen deneyler ve yapılan Ki Kare Testi sonucunda CO₂ emisyonları açısından en elverişli çalışma koşullarının, düşük motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde, yüksek oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımıyla sağlandığı saptanmıştır.



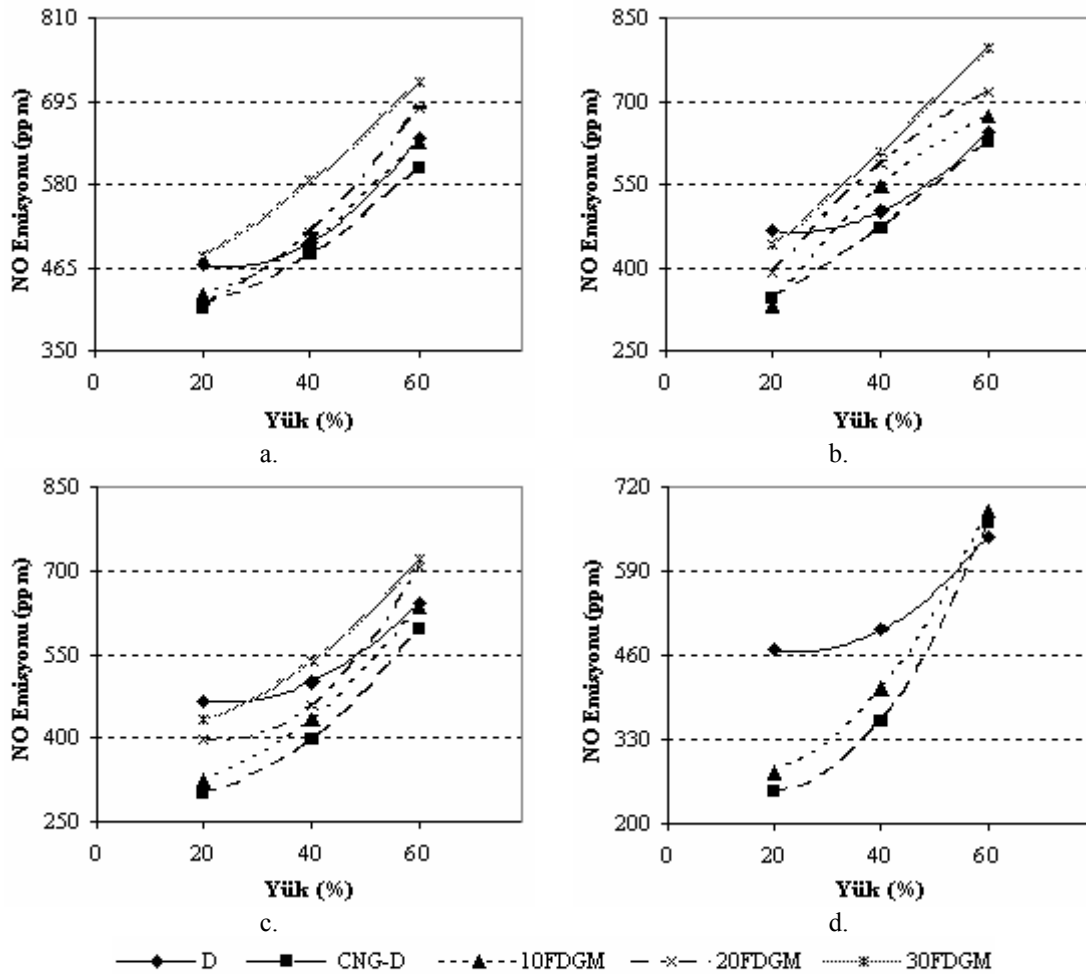
Şekil 6.44. Farklı motor parametrelerinin CO₂ emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Yakıtların sahip oldukları C/H oranı CO₂ oluşumunda etkili olan önemli bir faktördür. DGM'nin sahip olduğu C/H oranı doğalgazdan daha yüksektir ve bu nedenle DGM kullanılan çift yakıtların C/H oranı artmaktadır. Bu durum ise artan karbon oranına bağlı olarak CO₂ oluşumuna neden olmaktadır. DGM kullanımı çift yakıtların ÖYT değerlerinin artmasına neden olmuştur. Bu durumun da daha fazla yakıtın yanmasına ve toplam CO₂ oluşumunun artmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. CO₂ emisyonlarının artmasında bir diğer etken olarak DGM kullanımı ile yanma özelliklerinin iyileşmesi görülmektedir. Bu durumun tam yanma ürünü olan CO₂ emisyonlarının artmasına neden olduğu söylenebilir.

6.3.2.7. Azot oksit (NO) emisyonları

Şekil 6.45'te F-DGM yakıtlarıyla elde edilen motor yüküne bağlı NO değerlerinin motorin ve standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen değerlere göre değişimleri sunulmuştur. 1400 d/d'de F-DGM yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, düşük oranda doğalgaz içeren F-DGM yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının motorin değerlerinin üzerinde belirlendiği, yüksek oranda doğalgaz içeren F-DGM yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının ise genel olarak motorin değerlerinden bir miktar daha düşük olduğu gözlenmiştir. F-DGM yakıtları arasında en yüksek NO değerleri %60 motor yükünde düşük oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı

içeren 20CF30DGM ve 40CF30DGM yakıtlarıyla elde edilmiştir. Bu yakıtlarla sırasıyla 722 ppm ve 797 ppm değerlerinde NO değerleri tespit edilmiştir. F-DGM yakıtları arasında en düşük NO değerleri %20 motor yükünde yüksek oranda doğalgaz içeren 80CF10DGM yakıtıyla 280 ppm değerlerinde elde edilmiştir. Bu şartlarda motorinle %20 motor yükünde 468 ppm ve %60 motor yükünde ise 645 ppm değerlerinde NO emisyonu saptanmıştır.

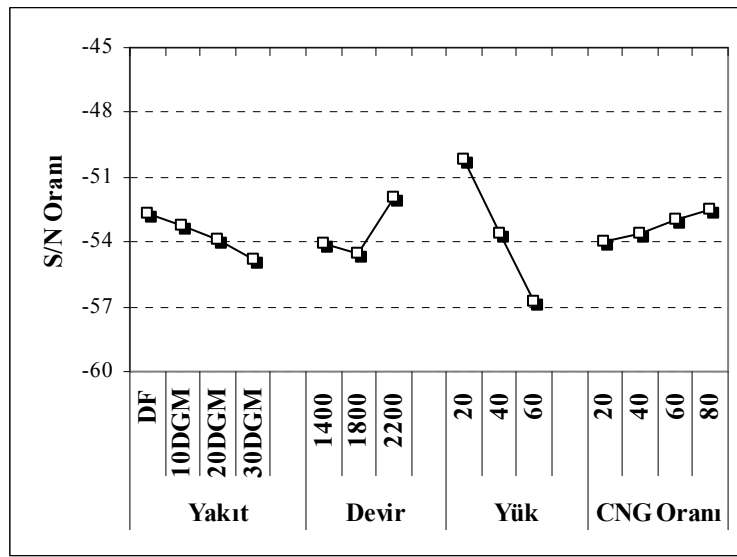


Şekil 6.45. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen NO emisyonlarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80CNG içerikli çift yakıtlar)

Çift yakıtların eşdeğer doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırılması sonucunda, F-DGM yakıtlarının kullanımıyla ve artan DGM oranı ile birlikte NO emisyonlarının standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı belirlenmiştir. Bu şartlarda en yüksek NO emisyonu değişimi yüksek oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı içeren 60CF30DGM yakıtıyla, en düşük NO emisyonu değişimi ise düşük oranda

doğalgaz ve düşük oranda DGM katkısı içeren 20CF10DGM yakıtıyla elde edilmiştir. 60CF30DGM yakıtıyla C60-D yakıtına göre %33.46 oranında, 20CF10DGM yakıtıyla ise C20-D yakıtına göre %4.55 oranında artış tespit edilmiştir.

Farklı motor parametrelerinin NO emisyonları üzerindeki etki düzeyleri Şekil 6.46'da görülmektedir. NO emisyonları üzerindeki en etkili faktörlerin motor yükü ve kullanılan doğalgaz oranı olduğu saptanmıştır.



Şekil 6.46. Farklı motor parametrelerinin NO emisyonlarında meydana getirdiği etki düzeyleri

Motor yükündeki artışın NO emisyonlarını arttırırken, doğalgaz oranındaki artışın NO emisyonlarında azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. F-DGM kullanımı ve DGM oranındaki artışla birlikte elde edilen NO emisyonlarının, standart çift yakıtların kullanımına göre arttığı gözlenmiştir. Motor devrindeki değişim dikkate alındığında 1800 d/d'de elde edilen NO emisyonlarının diğer devirlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Tüm deney sonuçları dikkate alındığında, NO emisyonları açısından en elverişli çalışma koşullarının yüksek motor devirlerinde ve düşük motor yüklerinde, yüksek doğalgaz içerikli ve düşük DGM oranına sahip çift yakıtların kullanımıyla elde edildiği saptanmıştır.

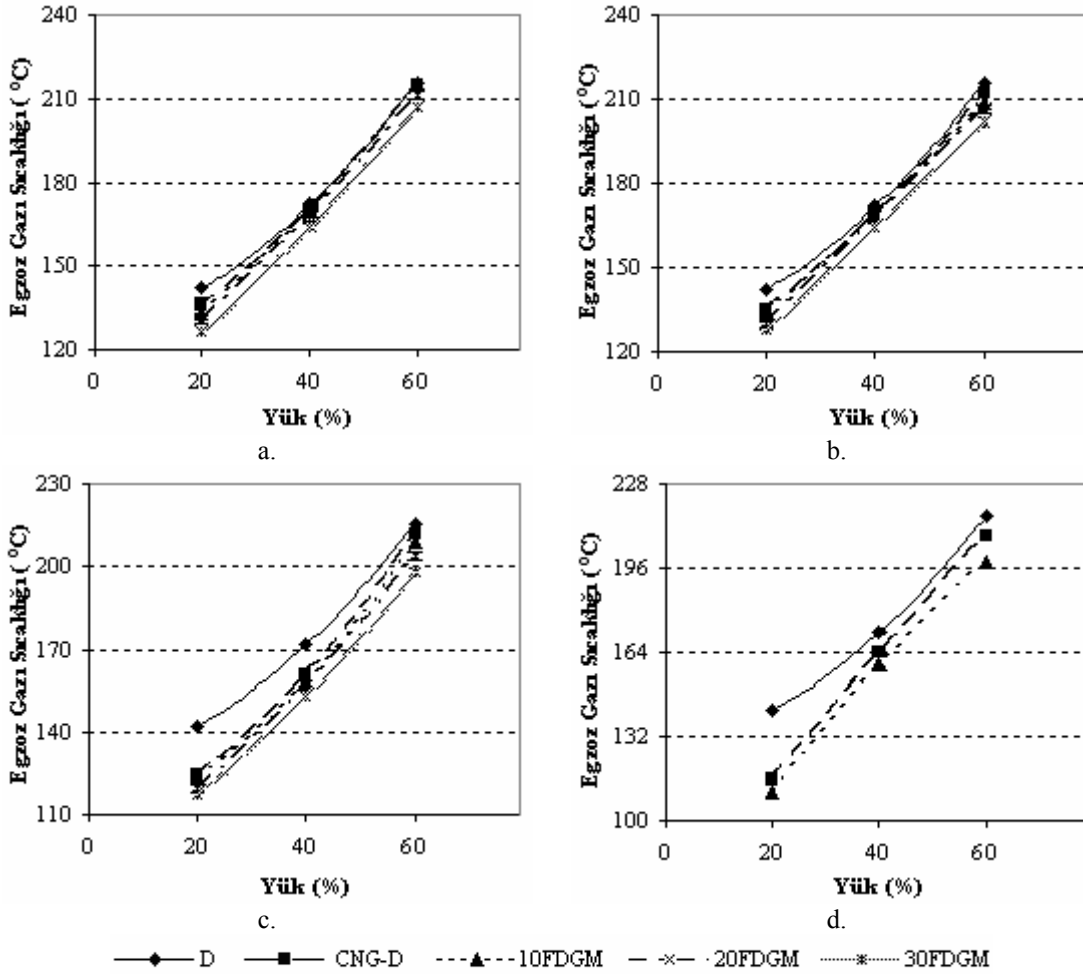
DGM oranındaki artışa bağlı olarak artan oksijen içeriği NO emisyonlarında artışa neden olmaktadır. Bunun yanı sıra yanma unsurlarının NO oluşumundaki etkisi

büyüktür. DGM'nin yüksek setan sayısı ve oksijen içeriği nedeniyle tutuşma gecikmesini azaltması, ısı yayımının merkezini ÜÖN'ya yaklaştırmaktadır. Bu durum yanmanın iyileşmesine ve yanma süresinin kısılmasına neden olmaktadır. [119]. Bu koşulda silindir içi sıcaklıkları da artış göstermekte ve oksijen miktarındaki artışla birlikte NO emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Song ve ark. [136] yaptıkları çalışmada oksijen içerikli DGM vb. bazı yakıtların bir dizel motordaki etkilerini incelenmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada DGM oranındaki artışa bağlı olarak NO_x emisyonlarının arttığını ifade etmişlerdir. NO_x emisyonlarının DGM oranı ile birlikte artış göstermesinin artan oksijen içeriği ile ilgili olduğunu vurgulamışlardır. Zannis ve ark. [140] gerçekleştirdikleri çalışmalarında kullandıkları DGM katkısı sonucu NO_x emisyonlarının dizel yakıtına göre artış gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bunun yanı sıra meydana gelen bu artışın DGM kullanımı ile artan oksijen içeriği sebebiyle oluştuğunu belirtmişlerdir.

6.3.2.8. Egzoz gazı sıcaklığı

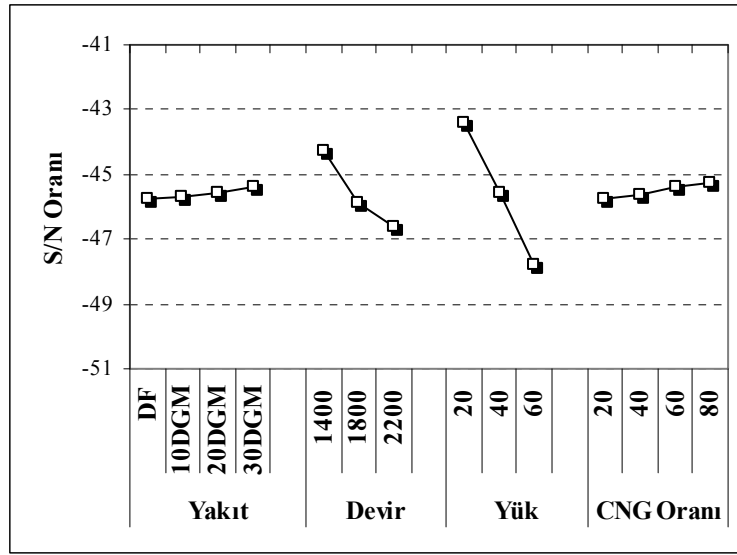
F-DGM yakıtlarıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının motor yüküne bağlı değişimleri, motorinle ve standart çift yakıtlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 6.47'de sunulmuştur. Elde edilen verilere göre, F-DGM yakıtlarıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının genel olarak motorin ve standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. F-DGM yakıtları arasında en yüksek egzoz gazı sıcaklığı %60 motor yükünde 20CF10DGM yakıtıyla 215 °C, en düşük egzoz gazı sıcaklığı ise %20 motor yükünde 20CF10DGM yakıtıyla 110 °C olarak belirlenmiştir.

Çift yakıtların doğalgaz oranı bazında birebir karşılaştırılması dikkate alındığında, F-DGM yakıtları ile elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının standart çift yakıtların kullanımına göre azaldığı ve DGM oranındaki artışın egzoz gazı sıcaklıklarını azalttığı belirlenmiştir. Standart çift yakıtlara göre elde edilen en düşük egzoz gazı sıcaklığı değişimi C20-D yakıtına yakın değerler gösteren 20CF10DGM ve 40CF10DGM yakıtlarıyla elde edilmiştir. En yüksek egzoz gazı sıcaklığı değişimi ise C60-D yakıtına göre %5.56 oranında azalan 60CF30DGM yakıtıyla saptanmıştır.



Şekil 6.47. F-DGM yakıtlarıyla elde edilen egzoz gazı sıcaklıklarının, motorin ve standart çift yakıt kullanımlarına göre değişimleri (a. %20 CNG, b. %40 CNG, c. %60 CNG, d. %80CNG içerikli çift yakıtlar)

Şekil 6.48'de farklı motor parametrelerinin egzoz gazı sıcaklıklarındaki etki düzeyleri görülmektedir. Motor yükü egzoz gazı sıcaklıklarını etkileyen en önemli faktör olarak belirlenmiştir. Motor devrindeki ve motor yükündeki artışların egzoz gazı sıcaklıklarını arttırdığı, doğalgaz oranındaki artışla egzoz gaz sıcaklıklarının azaldığı saptanmıştır. Bunun yanı sıra F-DGM kullanımı ile egzoz gaz sıcaklıklarının motorin kullanımına göre azaldığı belirlenmiştir. En yüksek egzoz gazı sıcaklıklarına yüksek devirlerde ve yüksek motor yüklerinde, düşük oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların kullanımıyla ulaşılmıştır. Bunun yanı sıra, en düşük egzoz gazı sıcaklıklarının, düşük motor devirlerinde, düşük motor yüklerinde yüksek doğalgaz içerikli ve yüksek DGM oranına sahip çift yakıtların kullanımıyla sağlandığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.48. Farklı motor parametrelerinin egzoz gaz sıcaklıklarında meydana getirdiği etki düzeyleri

DGM katkısının yüksek setan sayısı ile tutuşma gecikmesini kısaltması ve yanma oluşumunu daha erkene alması [119], yanmanın doğalgaz kullanımıyla genişlemeye sarkmasını iyileştirerek egzoz gazı sıcaklıklarının düşmesine neden olmuştur.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, bir dizel motorunda alternatif yakıt olarak doğalgaz kullanımının, motor performans karakteristiklerinde ve egzoz emisyonlarında neden olduğu olumsuzlukların belirlenmesi ve bu olumsuzlukların iyileştirilmesine yönelik çalışmaların uygulanması amaçlanmıştır. Bu hususta, çift yakıt yöntemiyle doğalgaz kullanımında, pilot yakıt olarak motorin yerine biyodizel kullanımı ve doğalgaza fumigasyon yöntemiyle diglyme katkısı uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, öncelikle dizel motoru, doğalgaz yakıt sistemi eklenerek çift yakıtla çalışabilecek duruma getirilmiştir. Deney motorunun ve deney düzeneğinin hazırlanmasından sonra, motorin ile ve çift yakıt olarak farklı oranlardaki doğalgaz-motorin yakıtlarıyla tam yük ve kısmi yük deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin sonucunda, motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları açısından, çift yakıt olarak doğalgaz-motorin kullanımının neden olduğu olumsuzluklar ve bu olumsuzlukların meydana geldiği çalışma koşulları belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise, elde edilen bulgular dikkate alınarak, sorunların meydana geldiği koşullarda, pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve diglyme katkısı uygulamalarına ait deneyler gerçekleştirilmiştir.

Çift yakıt uygulamasında, motorinin ısı değeri göz önüne alınarak %20, %40, %60 ve %80 oranlarında doğalgaz kullanılmıştır. Biyodizel yakıtı çift yakıt uygulamasında motorin yerine pilot yakıt olarak, diglyme ise doğalgaza fumigasyon yöntemiyle ilave katkı yakıtı olarak kullanılmıştır. Biyodizelin pilot yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtlar C20-B, C40-B, C60-B ve C80-B yakıtları olarak, DGM ise her bir standart çift yakıtta %10, %20 ve %30 oranlarında uygulanmak üzere F10DGM, F20DGM ve F30DGM yakıtları olarak tanımlanmıştır.

Dizel motorunda, doğalgazın çift yakıt olarak kullanımı sonucu, standart motorin kullanımına göre düşük-orta motor yükleri arasında motor performans karakteristiklerinin kötüleştiği, HC ve CO emisyonlarında önemli oranda artışın gerçekleştiği belirlenmiştir. Orta-yüksek motor yüklerinde ise motor performans karakteristiklerinin iyileşme gösterdiği, HC ve CO emisyonlarının belirgin bir azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, doğalgaz kullanımının düşük-orta motor yükleri arasında, belirgin sorunlara yol açtığı ve yapılacak çalışmaların bu koşullarda gerçekleştirilmesi gerektiği değerlendirilmiştir. Bu hususta, pilot yakıt olarak biyodizel kullanımının ve diglyme katkısı uygulamalarının %20-%60 motor yükü aralığında kullanımı öngörülmüştür.

Deneyler sonucunda, düşük-orta motor yükleri arasında standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen ÖYT değerlerinin motorin kullanımına göre artış gösterdiği saptanmıştır. 1400 d/d'de, düşük oranda doğalgaz kullanılan C20-D yakıtıyla motorin kullanımına göre %2.37 olarak belirlenen artış oranı, C80-D yakıtıyla %10.85'e yükselmiştir. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarıyla yapılan deneyler sonucunda, bu motor devrinde ÖYT değerlerinin motorin ve standart çift yakıtların kullanımına göre artış gösterdiği, bunun yanı sıra DGM katkısının pilot yakıt olarak biyodizel kullanımına göre daha olumlu sonuçlar verdiği belirlenmiştir. ÖYT değerleri incelendiğinde, pilot yakıt olarak biyodizel kullanılan C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %9.93 ve C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %5.12 oranında artış tespit edilmiştir. DGM katkısının kullanıldığı çift yakıtlar arasında ise, 20CF10DGM yakıtıyla C20-D yakıtına göre %6.20 ve 80CF10DGM yakıtıyla C80-D yakıtına göre %4.18 oranında artış saptanmıştır.

Standart çift yakıt olarak doğalgaz-motorin kullanımıyla elde edilen ÖET değerlerinin, doğalgaz oranındaki artışla birlikte motorin kullanımına göre arttığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve DGM katkısı sonucunda elde edilen ÖET değerlerinin, standart çift yakıt olarak doğalgaz kullanımına göre azaldığı tespit edilmiştir. 1400 d/d'deki değerler dikkate alındığında, motorin kullanımına göre C20-D yakıtıyla %6.73 ve C80-D yakıtıyla

%28.27 oranlarında artış belirlenmiştir. ÖET değerlerinin pilot yakıt olarak biyodizel kullanılan C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.82 ve C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %2.05 oranlarında azaldığı saptanmıştır. DGM katkısı uygulamaları ile, 20CF30DGM yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.72 ve 60CF10DGM yakıtıyla C60-D yakıtına göre %6.32 oranlarında azalma tespit edilmiştir.

Efektif verim değerleri, standart çift yakıt kullanımıyla düşük-orta motor yükleri arasında, motorin kullanımına göre azalmıştır. 1400 d/d'deki değerler incelendiğinde, C20-D yakıtıyla elde edilen efektif verim değerlerinin motorin kullanımına göre %6.25 oranında, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla ise %21.52 oranında azaldığı belirlenmiştir. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarının standart çift yakıtların kullanımıyla elde edilen efektif verim değerlerini iyileştirdiği saptanmıştır. Efektif verimin, biyodizelin kullanıldığı çift yakıtlar arasında C20-B yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.94 ve C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %2.12 oranlarında arttığı belirlenmiştir. DGM katkısı içeren çift yakıtlar arasında ise efektif verim değerlerinin, 20CF30DGM yakıtıyla C20-D yakıtına göre %2.87 ve 60CF30DGM yakıtıyla C60-D yakıtına göre %6.84 oranında arttığı tespit edilmiştir.

HC ve CO emisyonlarının, standart çift yakıt olarak doğalgaz kullanımıyla motorin kullanımına göre artış gösterdiği, bu artışın yüksek doğalgaz oranına bağlı olarak arttığı belirlenmiştir. Biyodizelin pilot yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtlı çalışmalarda, HC ve CO emisyonlarında, standart çift yakıtların kullanımına göre azalma saptanmıştır. C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre HC emisyonlarında %25.48 oranında, CO emisyonlarında ise %11.53 oranında azalma belirlenmiştir. DGM katkısının kullanımı HC emisyonlarında önemli oranda azalmaya neden olmuştur. 60CF30DGM yakıtıyla C60-D yakıtına göre %61.44 oranında azalma tespit edilmiştir. DGM katkısının kullanımıyla CO emisyonlarında elde edilen değerlerin genel ortalamaları dikkate alındığında bir miktar artış görülse de, bu değerlerin belirsizlik sınırlarının içerisinde kaldığı belirlenmiştir.

CO₂ emisyonlarının, standart çift yakıt olarak doğalgaz kullanımıyla motorin kullanımına göre azaldığı, biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarıyla ise

standart çift yakıt kullanımlarına göre arttığı tespit edilmiştir. Düşük-orta motor yüklerinde, yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla elde edilen CO₂ emisyonlarının, motorin kullanımına göre %17.73 oranında azaldığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, CO₂ emisyonlarının biyodizelin pilot yakıt olarak kullanıldığı C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %4.85 oranında ve DGM katkısının kullanıldığı 80CF10DGM yakıtıyla ise %5.75 oranında arttığı saptanmıştır.

NO emisyonları, standart çift yakıt olarak doğalgaz kullanımı ile düşük-orta motor yüklerinde motorin kullanımına göre azalmıştır. Bu azalmanın doğalgaz oranındaki artışa göre daha da belirginleştiği gözlenmiştir. Yüksek oranda doğalgaz içeren C80-D yakıtıyla elde edilen azalma oranı %22.14 olarak saptanmıştır. Biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamaları sonucu elde edilen NO emisyonlarının standart çift yakıt kullanımına göre bir miktar arttığı belirlenmiştir. Bu şartlarda C80-B yakıtıyla C80-D yakıtına göre %16.29 oranında, 80CF10DGM yakıtıyla ise %9.49 oranında NO artışı tespit edilmiştir.

Yapılan deneylerin yanı sıra, yakıt türü, motor devri, motor yükü ve doğalgaz oranı değişkenlerinden oluşan faktörlerin motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri Ki Kare Testi kapsamında belirlenen ANOVA ve S/N oranları dikkate alınarak yorumlanmıştır.

ÖYT değerleri üzerinde en etkili faktörler, %99 güven aralığında motor devri ve motor yükü olarak belirlenmiştir. Optimum ÖYT değerlerinin, düşük oranda doğalgaz kullanılan standart çift yakıtlarla, düşük motor devrinde ve yüksek motor yükünde elde edildiği saptanmıştır.

Motor yükündeki değişimin %99 güven aralığında ÖET değerleri üzerindeki en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda, ÖET değerlerinin pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarıyla ve motor yükündeki artışla birlikte azaldığı, motor devrindeki ve doğalgaz oranındaki artışa bağlı olarak yükseldiği saptanmıştır. Bu şartlarda, ÖET değerleri açısından optimum çalışma koşullarının düşük oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı içeren

çift yakıt kullanımıyla, yüksek motor yükünde ve düşük motor devrinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

Efektif verim değerleri açısından en etkili faktörün %99 güven aralığında motor yükü olduğu saptanmıştır. Efektif verim için optimum çalışma koşullarının düşük oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıt kullanımıyla yüksek motor yükünde ve düşük motor devrinde gerçekleştiği tespit edilmiştir.

HC emisyon değerleri üzerindeki en etkili faktörlerin %99 güven aralığında doğalgaz oranı ve motor yükü olduğu saptanmıştır. Pilot yakıt olarak biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarının yanı sıra, motor devrindeki ve motor yükündeki artışla birlikte HC emisyonlarının azaldığı, çift yakıt içeriğindeki doğalgaz oranının artışına bağlı olarak HC emisyonlarının arttığı saptanmıştır. HC emisyonları açısından optimum çalışma koşullarının, düşük oranda doğalgaz ve yüksek oranda DGM katkısı içeren çift yakıtların kullanımıyla, yüksek motor devrinde ve yüksek motor yükünde elde edildiği belirlenmiştir.

Doğalgaz kullanımı %99 güven aralığında CO emisyonlarını etkileyen en önemli faktör olarak belirlenmiştir. Çift yakıt içeriğindeki doğalgaz oranının artması CO emisyonlarını arttıran bir etki göstermiştir. CO emisyonları açısından optimum çalışma koşulları düşük oranda doğalgaz içeren ve biyodizel yakıtının pilot olarak kullanıldığı çift yakıt karışımının düşük motor devrinde ve yüksek motor yükünde kullanımı sonucu elde edilmiştir.

CO₂ emisyonları üzerinde en etkili faktörün %99 güven aralığında motor yükü olduğu belirlenmiştir. Motor yükü ve devrindeki artışın yanı sıra, biyodizel kullanımı ve DGM katkısı uygulamalarının CO₂ emisyonlarını arttırdığı, doğalgaz kullanımının ise CO₂ emisyonlarını azalttığı saptanmıştır. CO₂ emisyonları açısından optimum çalışma koşullarının, yüksek oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların düşük motor devrinde ve düşük motor yükünde kullanımı ile elde edildiği belirlenmiştir.

%99 güven aralığında motor yükü ve %95 güven aralığında doğalgaz kullanımı NO emisyonları üzerinde en etkili faktörler olarak tespit edilmiştir. Bu faktörler arasında motor yükündeki artışın NO emisyonlarını arttırırken, doğalgaz oranındaki artışa

bağlı olarak NO emisyonlarının azaldığı belirlenmiştir. NO emisyonları açısından en elverişli çalışma koşulları, yüksek oranda doğalgaz içeren standart çift yakıtların yüksek motor devrinde ve düşük motor yükünde kullanımıyla sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen testler ve uygulanan deneysel tasarım sonucu belirlenen optimum çalışma koşulları, motor performans karakteristikleri ve egzoz emisyonları açısından aşağıdaki gibi değerlendirilmiştir;

Motor performans karakteristikleri açısından DGM katkısı uygulamasının çift yakıtlar arasında, standart çift yakıt olarak doğalgaz kullanımına ve pilot yakıt olarak biyodizel kullanımına göre daha olumlu sonuçlar gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun en yüksek motor döndürme momentinin elde edildiği 1400 d/d'de, yüksek motor yükünde ve düşük oranda doğalgazın kullanıldığı koşullarda daha etkin olarak sağlandığı saptanmıştır.

Egzoz emisyonları açısından ise daha değişken etki faktörlerinin olduğu gözlenmiştir. HC emisyonları açısından DGM katkısı kullanımının, CO emisyonları açısından biyodizelin pilot yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtların kullanımının, CO₂ ve NO emisyonları açısından ise standart çift yakıtların kullanımının daha etkin olduğu belirlenmiştir. Genel olarak emisyonlar üzerinde motor yükünün en etkin faktör olduğu saptanmıştır.

Çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, ileriki çalışmalara yön verebilmesi açısından şu öneriler yapılabilir;

DGM katkı yakıtı olarak motor performansını iyileştirici bir etki meydana getirmekte, ancak bu etki emisyonlar üzerinde sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle yanma sonrasında alınabilecek önlemlerle bu emisyonların iyileştirilmesi de mümkün olabilir. Doğalgazın düşük-orta motor yüklerinde kullanımında motor performans karakteristiklerinin ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi için farklı pilot yakıt kullanımları ve farklı katkı maddeleri geliştirilip test edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] SOYSAL, C., BİLGİN, H., Dizel Motorlarında Dizel Yakıtı-Biyodizel Yakıt Karışımlarının Kullanılmasının Motor Performansına Etkisi, 11.Uluslararası Yanma Sempozyumu, 24-27 Haziran 2010, Saraybosna
- [2] AKSOY, F., BAYRAKÇEKEN, H., ÖZGÖREN, Y.Ö., Palmiye ve Ayçiçeği Yağı Metil Esterlerinin Motor Performans ve Emisyonlarına Etkilerinin İncelenmesi, 11.Uluslararası Yanma Sempozyumu, 24-27 Haziran 2010, Saraybosna
- [3] HEYWOOD, J., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Publishing, New York, 1988
- [4] GÜRÜ, M., KOCA, A., CAN, Ö., ÇINAR, C., ŞAHİN, F., Biodiesel Production from Waste Chicken Fat Based Sources and Evaluation with Mg Based Additive in a Diesel Engine, Renewable Energy, Vol. 35, pp. 637-643, 2010
- [5] AGARWAL, A.K., Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 33, pp. 233-271, 2007
- [6] ERGENEMAN, M., ARSLAN, H., MUTLU, M., Tasıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998
- [7] Ulaştırma İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu, Mayıs 2011
- [8] LIN, C.Y., HUANG, J.C., An Oxygenating Additive for Improving The Performance and Emission Characteristics of Marine Diesel Engines, Ocean Engineering, Vol. 30, pp. 1699-1715, 2003
- [9] OWEN, K., COLEY, T., Automotive Fuels Reference Book, Second Edition, Society of Automotive Engineers Inc, USA, 1995
- [10] PASCOLI, S.D., FEMIA, A., LUZATTI, T., Natural Gas, Cars and The Environment. A (Relatively) Clean and Cheap Fuel Looking For Users, Ecological Economics, Vol. 38, pp. 179-189, 2001
- [11] YEH, S., An Emprical Analysis on The Adoption of Alternative Fuel Vehicles: The Case of Natural Gas Vehicles, Energy Policy, Vol. 35, pp. 5865-5875, 2007

- [12] PAPAGIANNAKIS, R.G., HOUNTALAS, D.T., Combustion and Exhaust Emission Characteristics of A Dual Fuel Compression Ignition Engine Operated With Pilot Diesel Fuel and Natural Gas, *Energy Conversion and Management*, Vol.45, pp.2971–2987, 2004
- [13] SELIM, M.Y.E., RADWAN, M.S., SALEH, H.E., Improving The Performance of Dual Fuel Engines Running on Natural Gas/LPG by Using Pilot Fuel Derived From Jojoba Seeds, *Renewable Energy*, Vol.4833 pp. 1173–1185, 2008
- [14] PAPAGIANNAKIS, R.G., HOUNTALAS, D.T., Experimental Investigation Concerning The Effect of Natural Gas Percentage on Performance and Emissions of a DI Dual Fuel Diesel Engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol.23, pp. 353–365, 2003
- [15] NWAFOR, O.M.I., Effect of Choice of Pilot Fuel on The Performance of Natural Gas in Diesel Engines, *Renewable Energy*, Vol.21, pp. 495–504, 2000
- [16] GALAL, M.G., AAL M.M.A., ELKADY, M.A.A., Comparative Study Between Dieel And Dual-Fuel Engies Performance And Emissions, *Combustion Science and Technical*, Vol.174, pp.241-56, 2002
- [17] PAPAGIANNAKIS, R.G., HOUNTALAS, D.T., RAKOPOULOS, C.D., Theoretical Study of The Effects of Pilot Fuel Quantity and Its Injection Timing on The Performance and Emissions of A Dual Fuel Diesel Engine, *Energy Conversion and Management*, Vol.48, pp.2951–2961, 2007
- [18] ABD-ALLA, G.H., SOLIMAN, H.A., BADR, O.A., ABD-RABBO, M.F., Effects of Diluent Admissions and Intake Air Temperature in Exhaust Gas Recirculation on The Emissions of An Idirect Injection Dual Fuel Engine, *Energy Conversion and Management*, Vol.42, pp.1033-1045, 2001
- [19] CARLUCCI, A.P., RISI, A.D., LAFORGIA, D., NACCARATO, F., Experimental Investigation and Combustion Analysis of A Direct Injection Dual-Fuel Diesel-Natural Gas Engine, *Energy*, Vol. 33, pp.256-263, 2008
- [20] SELIM, M.Y.E., Pressure–Time Characteristics in Diesel Engine Fueled With Natural Gas, *Renewable Energy*, Vol.22, pp.473–489, 2001
- [21] ABD-ALLA, G.H., SOLIMAN, H.A., BADR, O.A., ABD-RABBO, M.F., Effect of Injection Timing on The Performance of A Dual Fuel Engine, *Energy Conversion and Management*, Vol.43, pp. 269-277, 2002
- [22] PIROUZPANAH, V., SARAY, R.K., SOHRABI, A., NIAEI, A., Comparison of Thermal and Radical Effects of EGR Gases on Combustion Process in Dual Fuel Engines at Part Loads, *Energy Conversion and Management*, Vol.48, pp.1909–1918, 2007

- [23] ERGENEMAN, M., SORUŞBAY, C., GÖKTAN, A.G., Exhaust Emission and Fuel Consumption of CNG/Diesel Fueled City Buses Calculated Using A Simple Driving Cycle, *Energy Sources*, Vol.21, pp. 257-268, 1999
- [24] SELIM, M.Y.E., Sensvity of Dual Fuel Combustion and Knocking Limits to Geseous Fuel Composition, *Renewable Energy*, Vol.22, pp. 473–489, 2001
- [25] COHEN, J.T., Diesel vs. Compressed Natural Gas for School Buses: A Cost-Effectiveness Evaluation of Alternative Fuels, *Energy Policy*, Vol.33, pp.1709-1722, 2005
- [26] ANYOGITA, S., PRAKASH, A., JAIN, V.K., A Study of Noise CNG Driven Modes of Transport in Delhi, *Applied Acoustics*, Vol.65, pp. 195-201, 2004
- [27] PAPAGIANNAKIS, R.G., RAKOPOULOS, C.D., HOUNTALAS, D.T., RAKOPOULOS, D.C., Emission Characteristics of High Speed, Dual Fuel, Compression Ignition Engine Operating in A Wide Range of Natural Gas/Diesel Fuel Proportions, *Fuel*, Vol.89, pp.1397–1406, 2010
- [28] PAPAGIANNAKIS, R.G., KOTSIPOULOS, P.N., ZANNIS, T.C., YFANTIS, E.A., HOUNTALAS, D.T., RAKOPOULOS, C.D., Theoretical Study of The Effects of Engine Parameters on Performance and Emissions of A Pilot Ignited Natural Gas Diesel Engine, *Energy*, Vol.35, pp.1129-1138, 2010
- [29] MIDKIFF, K.C., WONG, W.Y., BELL, S.R., Performance and Emissions of a Natural Gas Dual-Fueled Indirect Injected Diesel Engine, *SAE Paper*, No. 911766
- [30] DAISHO, Y., TAKAHASHI, K., HUOSHIRO, Y., NAKAYAMA, S., KIHARA, R., SAITO, T., Controlling Combution and Exhaust Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine Dual-Fueled with Natural Gas, *SAE Paper*, No. 952436
- [31] FRITZ, S.G., EGBUONU, R.I., Emissions From Heavy-Duty Trucks Converted to Compressed Natural Gas, *SAE Paper*, No. 932950
- [32] ALBAYRAK, K., YAHŞI, O.S., ERALP, O.C., BAYKA, D., Otobüslerde Doğalgaz Kullanımı, *Doğalgaz Dergisi*, Sayı.29, pp.122-131, 1993
- [33] ŞAHİNER, S., Türkiye Cumhuriyeti Enerji Politikasına Amerika Birleşik Devletleri ve Avrupa Birliği Enerji Politikaları Bağlamında Genel Bir Bakış ve Elektrik Enerjisi Özelleştirme Politikası ile Çevresel ve Hukuksal Alt Yapı Yaklaşımları, *DEKTMK 11. Enerji Kongresi*, 21-23 Ekim 2009
- [34] ÜNLER, A., Improvement of Energy Demand Forecasts Using Swarm Intelligence: The Case of Turkey With Projections to 2025, *Energy Policy* Vol. 36, pp. 1937-1944, 2008

- [35] World Energy Outlook 2010, Uluslar arası Enerji Ajansı, 2011
- [36] BP Energy Outlook 2030 Summary, British Petroleum (BP) Statistics, 2011
- [37] Statistical Review of World Energy 2011, British Petroleum (BP) Statistics, 2011
- [38] KESKİN, T., İklim Değişikliği ve Enerji Sektörü, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt.52, Sayı.617, 2011
- [39] GILL, S.S., TSOLAKIS, A., DEARN, K.D., FERNANDEZ, J.R., Combustion Characteristics and Emissions of Fischer-Tropsch Diesel Fuels in IC Engines, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.33, pp.503-523, 2011
- [40] BARI, S., ESMAEIL, M.M., Effect of H₂/O₂ Addition in Increasing The Thermal Efficiency of A Diesel Engine, Fuel, Vol. 89, pp. 378-383, 2010
- [41] ÇANAKÇI, M., Combustion Characteristics of A Turbocharged DI Compression Ignition Engine Fueled With Petroleum Diesel Fuels and Biodiesel, Biosource Technology, Vol. 98, pp. 1167-1175, 2007
- [42] JACCARD, M., Sustainable Fossil Fuels, The Unusual Suspect in The Quest for Clean and Enduring Energy, Cambridge, 2005
- [43] ROKOPOULOS, D.C., GIAKOUMIS, E.G., Diesel Engine Transient Operation, Principles of Operation and Simulation Analysis, Springer-Verlag London Limited, 2009
- [44] BORAT, O., BALCI, M., SÜRMEŒ, A., Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, İstanbul/ Ankara/ Bursa, 1992
- [45] BAYRAKTAR, H., An Experimental Study on The Performance Parameters of An Experimental CI Engine Fueled with Diesel-Methanol-Dodecanol Blends, Fuel, Vol.87, pp.158-164, 2008
- [46] XINLING, L., ZHEN, H., Emission Reduction Potential of Using Gas-to-Liquid and Dimethyl Ether Fuels on a Turbocharged Diesel Engine, Science of The Total Environment, Vol.407, pp.2234-2244, 2009
- [47] REN, Y., HUANG, Z., JIANG, D., LIU, D., ZENG, K., LIU, B., WANG, X., Combustion Characteristics of A Compression-Ignition Engine Fuelled with Diesel-Dimethoxy Methane Blends Under Various Fuel Injection Advance Angles, Applied Thermal Engineering, Vol.26, pp.327-337, 2006
- [48] FINO, D., SPECCHIA, V., Open Issues in Oxidative Catalysis for Diesel Particulate Abatement Powder Technology, Vol.180, pp.64-73, 2008

- [49] YOON, S.H., CHA, J.P., LEE, C.S., An Investigation of the Effects of Spray Angle and Injection Strategy on Dimethyl Ether (DME) Combustion and Exhaust Emission Characteristics in A Common-Rail Diesel Engine Fuel, *Processing Technology*, Vol.91, pp.1364-1372, 2010
- [50] YANFENG, G., SHENGHUA, L., HEJUN, G., TIEGANG, H., LONGBAO, Z., A New Diesel Oxigenate Additive and Its Effects on Engine Combustion and Emissions, *Applied Thermal Engineering*, Vol.27, pp.202-207, 2007
- [51] XING-CAI, L., JIAN-GUANG, Y., WU-GAO, Z., ZHEN, H., Effect of Cetane Number Improver on Heat Release Rate and Emissions of High Speed Diesel Engine Fueled With Ethanol-Diesel Blend Fuel, *Fuel*, Vol.83, pp.2013-2020, 2004
- [52] HE, B., SHUAI, S., WANG, J., HE, H., The Effect of Ethanol Blended Diesel Fuels on Emissions from A Diesel Engine, *Atmospheric Environment*, Vol.37, pp.4965-4971, 2003
- [53] DOĞAN, O., The Influence of n-Butanol/Diesel Fuel Blends Utilization on A Small Diesel Engine Performance and Emissions, *Fuel*, Vol.90, pp.2467-2472, 2011
- [54] WATANABE, S., KINOSHITA, K., HAYASHI, N., OHASHI, A., UCHIDA, Y., DYKES, D., TOUCHARD, G., An Experiment to Purify Diesel Exhaust Gas Using An Electric Trap and Three Types of Catalyser, *Journal of Electrostatics*, Vol.40&41, pp.723-728, 1997
- [55] QI, D., H., BIAN, Y., ZH., MA, ZH., Y., ZHANG, CH., H., LIU, SH., Q., Combustion and Exhaust Emission Characteristics of A Compression Ignition Engine Using Liquefied Petroleum Gas-Diesel Blended Fuel, *Energy Conversion and Management*, Vol.48, pp.500-509, 2007
- [56] LEE, S., OH, S., CHOI, Y., Performance and Emission Characteristics of An SI Operated With DME Blended LPG Fuel, *Fuel*, Vol.88, pp.1009-1015, 2009
- [57] PARK, S.H., KIM, H.J., LEE, C.S., Effects of Dimethyl-Ether (DME) Spray Behavior in The Cylinder on the Combustion and Exhaust Emissions Characteristics of A High Speed Diesel Engine, *Fuel Processing Technology*, Vol.91, pp.504-513, 2010
- [58] KARTHIKEYAN, B., SRITHAR, K., Performance Characteristics of A Glowplug Assisted Low Heat Rejection Diesel Engine Using Ethanol, *Applied Energy*, Vol.88, pp.323-329, 2011
- [59] SAYIN, C., Engine Performance and Exhaust Gas Emissions of Methanol and Ethanol-Diesel Blends, *Fuel*, Vol. 89, pp 3410-3415, 2010

- [60] KARABEKTAŞ, M., ERGEN, G., HOŞÖZ, M., Effects of The Blends Containing Low Ratios of Alternative Fuels on The Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine, *Fuel*, 2011
- [61] POULTON, M., L., *Alternative Fuels for Road Vehicles*, Computational Mechanics Publications, USA, 1994
- [62] POON, R., WADE, M., VALLI, V., E., CHU, I., Short-Term Oral Toxicity of Buthyl Ether, Ethyl Ether, Methyl Eptyl Ether and 1.6-Dimetoxyhexane in Male Rats and The Role of 2-Methoxyacetic Acid, *Toxicology*, Vol. 214, pp. 99-112, 2005
- [63] ARCOUMANIS, C., BAE, C., CROOKES, R., KINOSHITA, E., The Potential of Di-Methyl Ether (DME) as An Alternative Fuel for Compression-Ignition Engines-A Review, *Fuel*, Vol. 87, pp 1014-1030, 2008
- [64] KARABEKTAŞ, M., HOŞÖZ, M., Performance and Emission Characteristics of A Diesel Engine Using Isobutanol-Diesel Fuel Blends, *Renewable Energy*, Vol.34 pp.1554-1559, 2009
- [65] NATHAN, S.S., MALLIKARJUNA, J.M., RAMESH, A., An Experimental Study of The Biogas-Diesel HCCI Mode of Engine Operation, Vol.51, pp.1347- 1353, 2010
- [66] BEDOYA, I.D., ARRIETA, A.A., CADAVID, F.J., Effects of Mixing System and Pilot Fuel Quantity on Diesel-Biogas Dual Fuel Engine Performance, *Bioresource Technology*, Vol.100, pp.6624-6629, 2009
- [67] JOTHI, N.K.M., NAGARAJAN, G., RENGANARAYANAN, S., Experimental Studies On Homogeneous Charge CI Engine Fueled With LPG Using DEE as An Ignition Enhancer, *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1581-1593, 2007
- [68] LATA, D.B., MISRA, A., Analysis of Ignition Dela Period of A Dual Fuel Diesel Engine With Hydrogen and LPG as Secondary Fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.36, pp.3746-3756, 2011
- [69] LATA, D.B., MISRA, A., Theoretical and Experimental Investigations on The Performance of Dual Fuel Diesel Engine With Hydrogen and LPG as Secondary Fuels, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.35, pp.11918-11931, 2010
- [70] KARABEKTAŞ, M., ERGEN, G., HOŞÖZ, M., The Effects of Preheated Cottonseed Oil Methyl Ester on The Performance and Exhaust Emissions of A Diesel Engine, *Applied Thermal Engineering*, Vol.28 pp.2136-2143, 2008
- [71] ÇANAKÇI M., ERDİL, A., ARCAKLIOĞLU, E., Performance and Exhaust Emissions of a Biodiesel Engine , *Applied Energy*, Vol. 83, pp. 594–605, 2006

- [72] PARLAK, A., KARABAŞ, H., AYHAN, V., YAŞAR, H., SOYHAN, H.S., ÖZSERT, İ., The Effects of Various Parameters on The Yield of Tobacco Seed Oil Methyl Ester, Sakarya Üniversitesi, 10. Uluslararası Yanma Sempozyumu, Sakarya, 9-10 Ekim 2008
- [73] ABU-JRAI, A., YAMIN, J.A., AL-MUHTASEB, A.H., HARARAH, M.A., Combustion Characteristics and Engine Emissions of A Diesel Engine Fueled With Diesel and Treated Waste Cooking Oil Blends, Chemical Engineering Journal, Vol. 172, pp. 129-136, 2011
- [74] GODIGANUR S., SURRAYANARA MURTHY C.H., REDDY R.P., Performance and Emission Characteristics of A Kirloskar HA394 Diesel Engine Operated on Fish Oil Methyl Esters, Renewable Energy, Vol. 35, pp.355-359, 2010
- [75] PUHAN, S., JEGAN, R., BALASUBBRAMANIAN, K., NAGARAJAN, G., Effect of Injection Pressure on Performance, Emission and Combustion Characteristics of High Linolenic Linseed Oil Methyl Ester in a DI Diesel Engine, Renewable Energy, Vol. 34, pp.1227-1233, 2009
- [76] ÖZSEZEN, A.N., ÇANAKÇI M., Determination of Performance and Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Canola and Waste Palm Oil Methyl Esters, Energy Conversion and Management, Vol. 52, pp. 108–11, 2011
- [77] HAŞIMOĞLU, C., CİNİVİZ, M., ÖZSERT, İ., İÇİNGÜR, Y., PARLAK, A., SALMAN, M.S., Performance Characteristics of A Low Heat Rejection Diesel Engine Operating With Biodiesel, Renewable Energy, Vol. 33, pp.1709-1715, 2008
- [78] ERGEN, G., KARABEKTAŞ, M., Çift Yakıt Olarak Doğalgaz Ve Biyodizel Kullanılan Bir Dizel Motorunda Emisyon Karakteristiklerinin İncelenmesi, 11.Uluslararası Yanma Sempozyumu, 24-27 Haziran 2010, Saraybosna
- [79] 2010 Enerji Raporu, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, 2010
- [80] SEZGİN, B., Bir Dizel Motorun Doğalgaz İle Çalışır Hale Getirilmesi ve Analizi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2009
- [81] BALAT, M., World Natural Gas (NG) Reserves, NG Production and Combustion Trends and Future Appearance, Energy Sources, Vol.27, pp.921-929, 2005
- [82] YETİŞKEN, Y., EKMEKÇİ, İ., Türkiye Şartlarında Sıkıştırılmış CNG’li Araçların Kullanımının İrdelenmesi, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007

- [83] AKANSU, S.O., DULGER, Z., KAHRAMAN, N., VEZİROĞLU, Internal Combustion Engines Fueled By Natural Gas-Hydrogen Mixtures, Internal Journal of Hydrogen Energy, Vol.29, pp.1527-1539, 2004
- [84] BALDASSARI, L.T., BATTISTELLI, C.L., CONTI, L., CREBELLI, R., BERARDIS, B.D., IAMICELLI, A.L., GAMBINO, M., IANNACCONE, S., Evaluation of Emission Toxicity of Urban Bus Engines: Compressed Natural Gas and Comparison With Liquid Fuels, Science of The Total Environment, Vol.335, pp.64-77, 2006
- [85] ÇETİNKAYA, S., Taşıtlarda Yakıt Olarak CNG Kullanımının Teknolojik Açıdan Değerlendirilmesi, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007
- [86] ACAROĞLU, M., Alternatif Enerji Kaynakları, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, 2003
- [87] GÜMÜŞ, M., İçten Yanmalı Motorlarda Doğalgazın Alternatif Yakıt Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998
- [88] ERGEN, G., KARABEKTAŞ, M., Taşıtlarda Doğalgaz Kullanım Teknolojileri, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 2009
- [89] Natural Gas Vehicles Statistics Data, International Association of Natural Gas Vehicles, 2010
- [90] SİYALOM, Y., Araçlarda LPG ve CNG Karşılaştırılması, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007
- [91] AHOUISSOUSSI, N.B.C., WETZSTEIN, M.E.A Comparative Cost Analysis of Biodiesel, Compressed Natural Gas, Methanol and Diesel for Transit Bus Systems, Resource and Energy Economics, Vol.20, pp.1-15, 1997
- [92] ÇETİNKAYA, S., Kapalı Mekan Taşıtlarında Yakıt Olarak CNG Kullanımı, II. Doğalgaz ve Enerji Yönetimi Kongre ve Sergisi, Gaziantep, 2003
- [93] TSE Standartları, Türk Standartları Enstitüsü
- [94] BAL, B., CNG Otogaz Dolu İstasyonları Dizayn Kriterleri, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007
- [95] BORA, H., Y., Doğalgazlı Taşıtlar ve CNG Dolu İstasyonları, II. Doğalgaz ve Enerji Yönetimi Kongre ve Sergisi, Gaziantep, 2003
- [96] GÜVEN, G., ŞENEL, F., MİSKBAY, O., PARNAS, L., Taşıtlarda Kullanılan Kompozit CNG Tanklarının Sertifikasyonu, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007

- [97] ÇETİNKAYA, S., Benzin ve Dizel Motorların Doğalgaz Motoruna Dönüştürülmesi, Tesisat Mühendisliği Dergisi, s.81, sn.14-31, 2004
- [98] FINO, D., RUSSO, N., SARACCO, G., SPECCHIA, V., CNG Engines Exhaust Treatment Via Pd-Spinel-Type-Oxide Catalysts, Catalysis Today, Vol.117, pp.559-563, 2006
- [99] SILVA, M.J.M., SPHAIER, L.A., Dimensionless Lumped Formulation for Performance Assessment of Adsorbed Natural Gas Storage, Applied Energy, Vol.87, pp.1572-1580, 2010
- [100] DEMİRBAŞ, A., Fuel Properties of Hydrogen, Liquefied Petroleum Gas (LPG) and Compressed Natural Gas (CNG) for Transportation, Energy Sources, Vol.24, pp.601-610,2002
- [101] BHATTACHARJEE, G., BHATTACHARYA, S., NEOGI, S., DAS, S.K., CNG Cylinder Burst in A Bus During Gas Filling – Lesson Learned, Safety Science, Vol.48, pp.1516-1519, 2010
- [102] TOPUZLAR, G., Otomotiv Sektöründe Doğalgaz, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007
- [103] JACOP, A., CNG Tanks Manufactured Using Glass Fibre by Greenes Group, Reinforced Plastics, Vol.55, Iss.3, p.9, May-June 2011
- [104] JACOP, A., Composite CNG Tanks Travel The World by MCS Technology, Reinforced Plastics, Vol.55, Iss.3, p.17, May-June 2011
- [105] GORLA, R.S.R., Probabilistic Analysis of A Liquefied Natural Gas Storage Tank, Applied Thermal Engineering, Vol.30, pp.2763-2769, 2010
- [106] MACLEAN, H.L., LAVE, L.B., Evaluating Automobile Fuel/Propulsion System Technologies, Progress in Energy and Combustion Science, Vol.29, pp.1-69, 2003
- [107] RAHMAN, K.A., LOH, W.S., CHAKRABORTY, A., SAHA, B.B., CHUN, W.G., Thermal Enhancement of Charge and Discharge Cycles for Adsorbed Natural Gas, Applied Thermal Engineering, Vol.31, pp.1630-1639, 2011
- [108] GORD, M.F., DASHTEBAYAZ, M.D., RAHBARI, H.R., Studying Effects of Storage Types on Performance of CNG Filling Stations, Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol.3, pp.334-340, 2011
- [109] RADWAN, E.H., CNG Fuelling Stations Design Philosophy, NGV 2006 Conference, Egypt, 7-9 November 2006
- [110] BRAES, H.H., SEIFFERT, U., Handbook of Automotive Engineering, SAE, International, USA, 2005

- [111] BAYKA, D., Doğalgazın Taşıtlarda Yakıt Olarak Kullanımı, III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi, 2007
- [112] SHIGA, S., OZONE, S., MACHACON, H.T.C., KARASAWA, T., NAMAKURA, H., UEDA, T., JINGU, N., HUANG, Z., TSUE, M., KONO, M., A Study of The Combustion and Emission Characteristics of Compressed-Natural-Gas Direct Injection Stratified Combustion Using a Rapid-Compression-Machine, *Combustion and Flame*, Vol.129, pp.1-10, 2002
- [113] HUANG, Z., WANG, J., LIU, B., ZENG, K., YU, J., JIANG, DEMING, Combustion Characteristics of A Direct-Injection Engine Fueled With Natural Gas-Hydrogen Blends Under Different Ignition Timings, *Fuel*, Vol.86, pp.381-387, 2007
- [114] CARLUCCI, A.P., FICARELLA, A., LAFORGIA, D., Control of The Combustion Behaviour in A Diesel Engine Using Early Injection and Gas Addition, *Applied Thermal Engineering*, Vol.26, pp.2279-2286, 2006
- [115] LOPEZ, J.M., GOMEZ, A., APARICIO, F., SANCHEZ, F.J., Comparison of GHG Emissions from Diesel, Biodiesel and Natural Gas Refuse Trucks of The City of Madrid, *Applied Energy*, Vol.86, pp.610-615, 2009
- [116] MANSOUR, C., BOUNIF, A., ARIS, A., GAILLARD, F., Gas-Diesel (Dual-Fuel) Modeling in Diesel Engine Environment, *International Journal of Thermal Science*, Vol.40, pp.409-424, 2001
- [117] KARIM, G.A., An Examination of Some Measures for Improving the Performance of Gas Fuelled Diesel Engines at Light Load, *SAE Papers*, No. 912366
- [118] SAHOO, B.B., SAHOO, N., SAHA, U.K., Effect of Engine Parameters and Type of Gaseous Fuel on The Performance of Dual-Fuel Gas Diesel Engines- A Critical Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.13, pp.1151-1184, 2009
- [119] REN, Y., HUANG, Z., MIAO, H., DI, Y., JIANG, D., ZENG, K., LIU, B., WANG, X., Combustion and Emissions of A DI Diesel Engine Fuelled With Diesel-Oxygenate Blends, *Fuel*, Vol. 87, pp. 2691-2697, 2008
- [120] GRAHAM, L.A., RIDEOUT, G., ROSENBLATT, D., HENDREN, J., Greenhouse Gas Emissions from Heavy-Duty Vehicles, *Atmospheric Environment*, Vol.42, pp.4665-4681, 2008
- [121] GOGOI, T.K., BARUAH, D.C., The Use Of Koroch Seed Oil Methyl Ester Blends As Fuel In A Diesel Engine, *Applied Energy*, Vol. 88, pp.2713-2725, 2011

- [122] KANNAN G.R, KARVENBU R., ANAND R., Effect Of Metal Based Additive On Performance Emission And Combustion Characteristics Of Diesel Engine Fuelled With Biodiesel, *Applied Energy*, Vol 88, pp 3694-3703, 2011
- [123] LAPUERTA, M, HERREROS, J.M., LYONS, L.L., CONTRERAS, R.G., BRICENO, Y., Effect Of The Alcohol Type Used In The Production Of Waste Cooking Oil Biodiesel On Diesel Performance And Emission, *Fuel*, Vol. 87, pp. 3161-3169, 2008
- [124] GOKALP, B., BUYUKKAYA, E., SOYHAN, H.S., Performance and Emissions Of A Diesel Tractor Engine Fueled With Marine Diesel and Soybean Methyl Ester, *Biomass And Bioenergy*, Vol.35, pp.3575-3583, 2011
- [125] SAHOO, P.K, DAS, L.M., BABU, M.K.G, NAIK, S.N., Biodiesel Development from High Acid Value Polanga Seed Oil and Performance Evaluation in a CI Engine, *Fuel*, Vol. 86, pp.448-454, 2007
- [126] PUHAN, S., JEGAN, R., BALASUBBRAMANIAN K., NAGARAJAN, G., Effect of Injection Pressure on Performance, Emission and Combustion Characteristics of High Linolenic Linseedoil Methyl Ester in A DI Diesel Engine, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp.1227-1233, 2009
- [127] GANAPATHY, T.,GAKKHAR R.P, MURUGESAN K., Influence of Injection Timing Performance, Combustion And Emission Characteristics of Jatropha Biodiesel Engine *Applied Energy*, Vol. 88, pp.4376-4386, 2011
- [128] GUMUS M., KASİFOĞLU S., Performance and Emission Evaluation of A Compression İngitioan Engine Using A Biodiesel (Apricotseed Kernel Oil Methyl Ester) and Its Blends With Diesel Fuel, *Biomanss And Bioenergy* Vol. 34, pp. 134-139, 2010
- [129] GODIGANUR S., SURRAYANARA MURTHY C.H., REDDY R.P., 6BTA 5.9 G2-1 Cummins Engine Performance An Emission Tests Using Methyl Ester Muhua (Madhuca Indica) Oil/Diesel Blends, *Renewable Energy*, Vol. 34, pp.2172-2177, 2009
- [130] NWAFOR, O.M.I., Emission Characteristics of Diesel Engine Operating on Rapeseed Methyl Ester, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp.119-129, 2004
- [131] LABECKAS, G., SLAVINSKAS, S., The Effect of Rapeseed Oil Methyl Ester on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions, *Energy Conversion And Management*, Vol. 47, pp.1954-1967, 2006
- [132] JINDAL, S., NANDWANA, B.P., RATHORE, N.S., VASHISTHA, V., Experimental in Investigation of The Effect of Comparison Ratio and Injection Pressure in A Direct Injection Diesel Engine Running On Jatropha Methyl Ester, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp.442-448, 2010

- [133] WU, F., WANG, J., CHEN, W., SHUAI, S., A Study on Emission Performance of A Diesel Engine Fueled With Five Typhical Methyl Ester Biodiesels, *Atmospheric Environment*, Vol. 41, pp. 1481-1485, 2009
- [134] MONYEM, A., GERPEN, J.H.V., The Effect of Biodiesel Oxidation on Engine Performance and Emission, *Biomass And Bioenergy*, Vol. 20, pp. 317-325, 2001
- [135] LIN, C.H., LI, R.J., Engine Performance and Emission Characteristics of Marine Fish-Oil Biodiesel Produced from The Discarded Parts of Marine Fish, *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, pp. 883-888, 2009
- [136] SONG, J., CHEENKACHORN, K., WANG, J., PEREZ, J., YOUNG, P.J., WALLER, F.J., Effect of Oxygenated Fuel on Combustion and Emissions in A Light-Duty Turbo Diesel Engines, *Energy and Fuels*, Vol. 16, pp. 294-301, 2002
- [137] NABI, N., CHOWDHURY, W., Improvement of Engine Performance Using Diethylene Glycol Dimethylether (DGM) as Additive, *Journal Technology*, Vol. 44(A), pp. 1-12, 2006
- [138] DI, Y., CHEUNG, C.S., HUANG, Z., Experimental Investigation of Particulate Emissions from A Diesel Engine Fueled With Ultra-Sulfur Diesel Fuel Blended with Diglyme, *Atmospheric Environment*, Vol. 44, pp. 55-63, 2010
- [139] BASKAR, P.K., NANTHAGIPAL, K., ELANGO, T., The Effect of Two Oxygenates on Diesel Engine Emissions, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, pp. 55-60, 2011
- [140] ZANNIS, T.C., PARIOTIS, E.G., HOUNTALAS, D.T., RAKOPULOS, D.C., LEVENDIS, Y.A., Therotical Study of DI Diesel Engine Performance and Pollutant Emissions Using Comparable Air-Side and Fuel-Side Oxygen Addition, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2962-2970, 2007

ÖZGEÇMİŞ

Gökhan ERGEN, 10.08.1980'de Kocaeli'de doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İzmit'te tamamladı. 1998 yılında Kocaeli Endüstri Meslek Lisesi, Motor Bölümünden mezun oldu. 1998 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü Otomotiv Öğretmenliği Programı'nda başladığı lisans eğitimini 2002 yılında bitirdi. Yüksek Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesinde Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı'nda 2006 yılında tamamladı. 2004 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı ve halen bu görevine devam etmektedir.