

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİFT YAKITLI MOTORLARDA PERFORMANS VE EMİSYON
OPTİMİZASYONU**

YASİN KARAGÖZ

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. TARKAN SANDALCI**

İSTANBUL, 2017

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÇİFT YAKITLI MOTORLARDA PERFORMANS VE EMİSYON
OPTİMİZASYONU

Yasin KARAGÖZ tarafından hazırlanan tez çalışması 21.04.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tarkan SANDALCI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Muammer ÖZKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ertuğrul ARSLAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet GÜNEY
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Övün IŞIN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2014-06-01-DOP05 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Öncelikle meslek hayatımda, yüksek lisans ve doktora tez çalışmalarımda benden bilgi ve tecrübesini esirgemeyen Yüksek Lisans ve Doktora Tez Danışmanı Sayın Hocam Doç.Dr. Tarkan SANDALCI'ya, bilgi ve tecrübelerini bizlerle paylaşmaktan her daim mutluluk duyan eski Anabilim Dalı Başkanımız Sayın Hocam Prof. İrfan YAVAŞLIOL'a ve Anabilim Dalı Başkanımız Sayın Hocam Prof.Dr. Muammer ÖZKAN'a ve diğer Otomotiv Anabilim Dalı Öğretim Üyelerine destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında, bana sürekli destek olan değerli meslektaşım İlker GÜLER'e ve değerli meslektaşlarım ve görev arkadaşlarım Emre ORAK, Sefa KALE ve Özgün BALCI'ya teşekkürlerimi sunarım. Diğer taraftan, çalışmalarım sırasında bana destek olan değerli meslektaşlarım Gökhan KAYA, Erdal TUNÇER, Engin YALIM ve Cansu ÖZMAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, benimle bilgi ve tecrübelerini paylaşan sayın hocalarım Yrd.Doç.Dr. Levent YÜKSEK ve Yrd.Doç.Dr. Orkun ÖZENER'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında, motor ve ekipman başışı, mühendislik ve teknik destek vs. gibi konularda hiçbir desteği esirgemeyen Sayın Mustafa ESER'e ve Sayın Ersin ŞAHİN'e ve Şahin Metal ve Erin Motor Şirketleri'ne teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında benden hiç bir desteğini esirgemeyen eşim Burcu Acunaş KARAGÖZ'e, anneme, babama, kardeşime ve de aileme teşekkürlerimi sunarım.

Mart, 2017

Yasin KARAGÖZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	ix
KISALTMA LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xx
ÖZET	xxi
ABSTRACT	xxiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	22
1.3 Hipotez	23
1.4 1.4 Yöntem	24
BÖLÜM 2	
TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI.....	25
2.1 DeneySEL Verilerin Teorik Modele Uygulanması	27
2.2 Elde Edilen Teorik Sonuçlar	30
2.2.1 1500 d/d Motor Hızı 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçlarının Boost Programı ile Karşılaştırılması	30
2.2.2 Motorin ve Motorin + Metan Yakıtları ile Elde Edilen Teorik ve DeneySEL Basınç Datalarının Karşılaştırılması	30
2.3 Boost Programının Teorik Verileri	32
2.3.1 Tekil Gaz Özellikleri.....	32
2.3.2 Karışım Özellikleri	32
2.3.3 Temel Korunum Denklemleri	33
2.3.3.1 Krank Açısı Hesabı	35

2.3.3.2	Silindir İçi Isı Transferi	35
2.3.3.3	Woschni Modeli	36
2.3.3.4	Blow By	36
2.3.3.5	Emme ve Egzoz Kanallarındaki Isı Transferi	37
2.4	Yanma Modelleri	37
2.4.1	Önceden Tanımlanmış Açığa Çıkan Isı	37
2.4.1.1	Vibe ve Tablo	37
2.4.1.2	Tablo	38
2.4.1.3	Vibe Denklemi	38
2.4.1.3	İki Bölge Denklem	39
2.4.1.4	Çift Vibe Fonksiyonu	40
2.4.1.5	Tutuşma Gecikmesi	41
2.4.2	Dizel Motorlar için MCC 2 Bölge Yanma Modeli	42
2.4.2.3	Karışım Kontrollü Yanma	43
2.4.2.4	Tutuşma Gecikmesi Modeli	43
2.4.3	Ön Karışım Yanma Modeli	43
2.4.3.3	Damlacık Kızışma ve Buharlaşma Modeli	44
2.4.4	Dizel Motorlar için Çok Bölge Yanma Modeli	44
2.5	Emisyon Modelleri	45
2.5.1	NOx Oluşum Modeli	45
2.5.2	CO Oluşum Modeli	45
2.5.3	İs Oluşum Modelleri	46
2.5.3.1	Schubiger ve Diğerleri	46
2.5.3.2	Hiroyasu ve Diğerleri	46
2.5.4	HC Oluşum Modelleri	47
2.5.4.1	Krevis Mekanizması	47
2.5.4.2	Hidrokarbon Emilim/Salınım Mekanizması	48
2.5.4.3	Kısmi Yanma Etkileri	49
2.5.4.4	HC Sonrası Oksidasyon	50
2.5.4.5	Dinamik Silindir İçi Türbülans (Silindir Cidarına teğetsel akış)	50
2.5.4.6	Dinamik Silindir İçi Silindir Eksenine Doğrultusunda Akış	50
2.5.4.7	Plenum ve Değişken Plenum	51
2.5.4.8	Akış Esnasındaki Lokal Kayıplar	51
2.6	Silindir İçi Gaz Basıncının Analizi	52
2.6.1	Deneyler Esnasında Silindir İçi Gaz Basıncının ve Isı Açığa Çıkış Oranının Elde Edilmesi	52
2.6.1.2	Silindir İçi Gaz Basıncı Hesabı	53
2.6.1.3	Yanma Verimi	53
2.6.1.4	Direkt Püskürtmeli Motorlar	54
2.6.1.5	Isı Açığa Çıkış Analizi	54

BÖLÜM 3

DENEY DÜZENİĞİ VE ÖZELLİKLERİ	57
2.2 Deney Motorunun Özellikleri	58
2.3 Motor Dinamometresinin Özellikleri	59
2.4 Gaz Yakıt Sistemi ve Teknik Özellikleri	60

2.5	Elektronik Kontrol Ünitesi	61
2.6	Common-rail Kontrol Sistemi.....	63
2.7	Gaz Püskürtme Kontrol Ünitesi.....	63
2.8	Dizel Yakıt Sisteminin Common-Rail Yakıt Sistemine Dönüştürülmesi.....	63
2.9	Gaz Yakıt Sistemi	65
2.10	Dizel Yakıt Sistemi Simülatörü	65
2.11	Motor Soğutma Sistemi	66
2.12	Emme Manifoldu	67
2.13	Egzoz Manifoldu.....	68
2.14	Motorin Debisinin Ölçümü	69
2.15	Gaz Yakıt Debisinin Ölçülmesi.....	70
2.16	Silindir-içi Gaz Basınçlarının Ölçülmesi	70
2.17	Gösterge Panosu	71
2.18	Silindir-içi Basınç Sensörü Kovanı	72
2.19	Dizel Enjektörü	72
2.20	Beş Gaz Emisyon Ölçüm Cihazı	73
2.21	İs Emisyonu Ölçümü.....	74
2.22	Sıcaklık Ölçümü	75
2.23	Veri Toplama Sistemi	75
 BÖLÜM 4		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		77
4.1	Deneyisel Çalışmalar	77
4.1.1	Performans Deneyi	78
4.1.2	Dizel Enjektör Kalibrasyonu.....	82
4.1.3	Gaz Enjektörü Kalibrasyonu.....	83
4.1.4	Mekanik Yakıt Sistemli Motorun Test Sonuçları.....	85
4.1.5	Common-rail Yakıt Sistemine Çevrilmiş Motorun Doğalgaz-Motorin Çift Yakıtlı Performans Deney Sonuçları	86
4.1.5.1	1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları	86
4.1.5.2	1.75ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları.....	115
4.1.5.2	2ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları.....	140
4.1.6	Common-rail Yakıt Sistemine Çevrilmiş Motorun Metan-Motorin Çift Yakıtlı Performans Deney Sonuçları.....	171
4.1.6.1	1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları.....	174
4.1.6.2	1.75ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları.....	199
4.1.6.3	2ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları.....	225
4.1.6.4	NO _x -İs Açısından ve Termik Verim-Güç Açısından En İyi Sonuçların Belirlenmesi	254

4.1.6.5	1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Biyogaz (%25 enerji)-Motorin Sonuçları	258
4.1.6.6	1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Biyogaz (%50 enerji)-Motorin Sonuçları	267
4.1.6.7	1300 d/d Motor Hızı 1. 5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları.....	276
6.1.6.7	1500 d/d Motor Hızı 1. 5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları.....	282
4.1.6.8	ESC Çevrimine Göre 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları.....	287
4.2.6.9	ESC Çevrimine Göre Rölanti Şartında Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları	304
4.2.6.10	ESC Çevrimine Göre 1300d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H ₂ +%90CH ₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları	308
4.2.6.11	ESC Çevrimine Göre 1500d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H ₂ +%90CH ₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları	313
4.2.6.12	ESC Çevrimine Göre 1300d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%30H ₂ +%70CH ₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları	318
4.2.6.13	ESC Çevrimine Göre 1500d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%30H ₂ +%70CH ₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları.....	322
4.2.6.14	ESC Çevrimine Göre Farklı Motor Yüklerinde Çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H ₂ +%90CH ₄ ve %30H ₂ +%70CH ₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları	327
4.3	Sonuç ve Öneriler.....	348
KAYNAKLAR.....		356
ÖZGEÇMİŞ.....		362

SİMGE LİSTESİ

c_{pk}	Sabit basınçta özgül ısı
H_k	Entalpi
S_k	Entropi
m_c	Silindir içi kütle
u	Özgül iç enerji
p_c	Silindir basıncı
V	Silindir hacmi
Q_F	Yakıt enerjisi
Q_w	Duvar ısı kaybı
α	Krank açısı
h_{BB}	Blow-by'ın entalpisi
dm_i	Silindir içerisine giren kütle elemanı
dm_e	Silindirden çıkan kütle elemanı
h_i	Silindir içerisine giren kütlenin entalpisi
h_e	Silindirden çıkan kütlenin entalpisi
q_{ev}	Yakıtın buharlaşma ısısı
f	Silindir dolgusunun buharlaşma ısısının fraksiyonu
m_{ev}	Buharlaşan yakıt
s	ÜÖN'dan piston mesafesi
r	Krank yarıçapı
l	Biyel uzunluğu
ψ	Pistonun ÜÖN pozisyonu ile dikey pozisyonu arasındaki krank açısı
e	Piston milinin kolu
Q_{wi}	Duvar ısı akışı (silindir kafası, piston, silindir gömleği)
A_i	Yüzey alanı (silindir kafası, piston, silindir gömleği)
α_w	Isı transfer katsayısı
T_c	Silindir içerisindeki gaz sıcaklığı
T_{wi}	Duvar sıcaklığı (silindir kafası, piston, silindir gömleği)
T_L	Silindir gömleği sıcaklığı
$T_{L,TDC}$	ÜÖN pozisyonunda silindir gömleği sıcaklığı
$T_{L,BDC}$	AÖN pozisyonunda silindir gömleği sıcaklığı
x	Rölatif strok (tam stroğa göre mevcut piston pozisyonu)

c_m	Ortalama piston hızı
D	Silindir çapı
c_u	Çevresel hız
V_D	Silindir başına yer değişimi
$p_{c,o}$	Dışarıdan tahrik edilmiş motorun silindir basıncı [bar]
$T_{c,1}$	Emme valfi kapanırken (IVC) silindir içi sıcaklığı
$p_{c,1}$	Emme valfi kapanırken (IVC) silindir içi basıncı [bar]
V_{TDC}	Silindir içi ÜÖN hacmi
V	Mevcut silindir hacmi
IMEP	Endike ortalama efektif basınç
α_w	Isı transferi katsayısı
c_u	Çevresel hız
A_{eff}	Efektif akış alanı
α_p	Porttaki ısı transfer katsayısı
T_d	Akış aşağı sıcaklık
T_u	Akış yukarı sıcaklık
T_w	Port duvar sıcaklığı
A_w	Port yüzey alanı
m	Kütle akış oranı
c_p	Sabit basınçta özgül ısı
h_v	Supap açılma mesafesi
d_{vi}	Supap oturma çapı
Q	Toplam yakıtın ısı girişi
α_o	Yanma başlangıcı
$\Delta\alpha_c$	Yanma süresi
IGN	Ateşleme zamanı
SOC	Yanma zamanının başlangıcı
A_{Id}	Tutuşma gecikmesi sabiti
A_{Ar}	Arrhenius sabiti
c_F	Molar yakıt buharı konsantrasyonu
c_{O_2}	Molar oksijen konsantrasyonu
p_c	Silindir dolgu basıncı
p_0	Referans basınç (1 bar)
ρ_0	Referans yoğunluk (1 kg/m ³)
T_c	Silindir dolgu sıcaklığı
A_{Mag}	Magnussen sabiti
m_F	Yakıt buharı kütlesi
$\sqrt[3]{V}$	Karakteristik türbülans uzunluğu
v_u	Yanmamış dolgunun kinematik viskozitesi
v_{lam}	Laminar alev hızı (m/s)
μ_F	Yakıt kütle oranı [-]
T_u	Yanmamış dolgunun sıcaklığı [K]
T_b	Yanmış dolgunun sıcaklığı [K]
T_f	Ortalama alev sıcaklığı [K]
p	Silindir basıncı (Pa)
γ_{FC}	Alev ön yanma ağırlığı

$m_{F,ub}$	Toplam yanmamış yakıt buharının kütlesi
Q_{MCC}	Karışım kontrollü yanma için açığa çıkan kümülatif ısı [kJ]
C_{Rate}	Karıştırma oranı sabiti [s]
k	Türbülanslı kinetik enerjinin bölgesel yoğunluğu [m^2/s^2]
m_F	Buharlaşan yakıt kütlesi (mevcut) [kg]
LCV	Alt ısı değeri [kJ/kg]
$w_{Oxygen,available}$	SOI'de mevcut oksijenin kütle oranı (emilmiş ve EGR'de) [-]
C_{EGR}	EGR etki sabiti [-]
I_{id}	Tutuşma gecikmesi integrali [-]
T_{ref}	505.0 [K]
T_{UB}	Yanmamış alanın sıcaklığı [K]
Q_{ref}	Referans aktivasyon enerjisi, f(damlacık çapı, oksijen içeriği,...) [K]
f_{id}	Tutuşma gecikmesi kalibrasyon faktörü [-]
Q_{PMC}	Ön karışimli yanma için toplam yakıt ısı girişi
λ_c	Silindirin ısıl kondüktivitesi [W/ms]
T_d	İzotermal damlacık buharlaşmasının denge sıcaklığı [K]
v_e	Buharlaşma hızı [m^2/s]
$d_{d,0}$	İlk damlacık çapı [m]
$E_{s,f}, E_{s,o}$	Aktivasyon enerji oluşumu / oksidasyonu [J/mol]
m_{soot}	Mevcut is kütlesi [kg]
$A_{s,f}$	İs oluşum parametresi [-]
$A_{s,o}$	İs oluşum parametresi [-]
τ_{char}	Karıştırma terimi
$C_{s,f}$	İs oluşum parametresi [-]
$C_{s,o}$	İs oluşum parametresi [-]
p_{O_2}	Oksijenin kısmi basıncı [Pa]
$m_{crevice}$	Küçük hacimler bölgesindeki yanmamış dolgunun kütlesi [kg]
$V_{crevice}$	Küçük hacimlerin toplamı [m^3]
R	Gaz sabiti [J/ (kmol K)]
T_{piston}	Piston sıcaklığı [K]
w_F	Yağ filmindeki yakıtın kütle oranı [-]
D	Göreceli (yakıt-yağ) difüzyon katsayısı [m^2/s]
μ	Yağ viskozitesi
Φ	Denge sabiti [-]
ϑ_{90}	%90 yakıt kütlesinde yanma zamanlaması [derece KMA]
ϑ_0	%0 yakıt kütlesinde yanma zamanlaması [derece KMA]
ϑ_{EVO}	Egzoz supabı açık zamanlaması [derece KMA]
C	HC ve O ₂ konsantrasyonu [kmol/ m^3]
F_{Ox}	HC oksidasyon sonrası çarpanı [-]
A_{Ox}	Frekans faktörü, varsayılan= $7.7E12$ [$m^3/kmol/s$]
T_{Ox}	Aktivasyon sıcaklığı, varsayılan= 18790.0 [K]
f	HC oksidasyon sonrası ölçeklendirme faktörü [-]
n_{sw}	Silindir içi türbülans (silindir cidarına teğetsel akış)
dm_i	İçeride akan kütle
n_{swi}	İçeride akan kütlenin türbülansı (silindir cidarına teğetsel akış)

V_i	Hacim akış girişi
V_D	Silindirin yer değişimi
n_{swr}	Supap hareketinin bir fonksiyonu olarak türbülans (silindir cidarına teğetsel akış) oranı
n_{tb}	Silindir içi silindir eksenini doğrultusunda akış
n_{tbi}	İçeride silindir eksenini doğrultusunda akan kütle
n	Motor hızı
n_{tbr}	Supap hareketinin bir fonksiyonu olarak silindir eksenini doğrultusunda akış oranı
m_{PI}	Plenumdaki kütle
p_{PI}	Plenumdaki basınç
Q_w	Duvar ısı kaybı
Q_{reac}	Kimyasal reaksiyonlara bağlı entalpi kaynağı
h_i	İçeri doğru akan kütlenin entalpisi
h_e	Plenumu terk eden kütlenin entalpisi
λ_f	Sürtünme faktörü
γ	Özgül ısı oranı
θ	Krank açısı

KISALTMA LİSTESİ

C	Karbon
CFD	Computational Fluid Dynamics
CH ₄	Metan
C ₂ H ₆	Etan
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Bütan
C ₅ H ₁₂	Pentan
C ₆ H ₁₄	Hekzan
C ₇ H ₁₆	Heptan
CNG	Sıkıştırılmış Doğalgaz
CO	Karbonmonoksit
CO ₂	Karbondioksit
DPF	Dizel Partikül Filtresi
EGR	Egzoz Gazı Geriçevrimi
ESC	European Stationary Cycle
FSN	Filter Smoke Number
H	Hidrojen
H ₂	Hidrojen Gazı
HC	Hidrokarbon
HCCI	Homojen Dolgulu Sıkıştırılmalı Ateşlemeli
HCl	Hidroklorik Asit
HCNO	Fulminik Asit
H ₂ O	Su
IMEP	Ortalama İndike Basınç
İYM	İçten Yanmalı Motor
KMA	Krank Mili Açısı
LNG	Sıvılaştırılmış Doğalgaz
LPG	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
Mtep	Milyon Ton Eşdeğer Petrol
N	Azot
N ₂	Azot Gazı
NH ₃	Amonyak
NO ₂	Azot Dioksit

NO ₃	Nitrat
N ₂ O	Nitrojen Oksit
NO _x	Azot Oksitler
O ₂	Oksijen Gazı
OH	Hidroksit
PCCI	Kısmi Homojen Dolgulu Sıkıştırılmalı Ateşlemeli
PM	Partikül Madde
ppm	milyondaki partikül miktarı
PWM	Sinyal Genişlik Modülasyonu
RED	Yenilenebilir Enerji Direktifi
SCR	Selective Catalytic Reduction
SI	Spark Ignition
SO	Kükürt Oksit
SO ₂	Kükürt Dioksit
SO ₃	Kükürt Trioksit
THC	Toplam Hidrokarbon
ÜÖN	Üst Ölü Nokta
V	Volt
VVT	Variable Valve Timing

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1. 1 Fakir karışımli doğalgaz/biyogaz-motorin çift yakıtlı motorların emisyon değerlerinin konvansiyonel benzinli ve dizel motorların emisyon değerleri ile karşılaştırılması[30].....	8
Şekil 1. 2 Doğalgaz-motorin çift yakıtlı yanma sonrası iyileştirme sistemsiz bir dizel motorla, yanma sonrası iyileştirme sistemli konvansiyonel bir dizel motorun emisyonlarının karşılaştırılması [30]	9
Şekil 2. 1 Motorun Boost Programındaki Motorun 1-D Modeli	25
Şekil 2. 2 Deney motorunun 3 boyutlu çizimleri.....	27
Şekil 2. 3 Boost programında, çift yakıtlı motorun 1-D (tek boyutlu) modelinin şematik gösterimi.....	28
Şekil 2. 4 Enjektörün şematik gösterimi	28
Şekil 2. 5 Boost programında çift yakıtlı motorun enjektör püskürtme karakteristiği grafiği.....	29
Şekil 2. 6 AVL MCC modelinde elde edilen basınç datasıyla, deneysel olarak elde edilen basınç datasının karşılaştırılması	29
Şekil 2. 7 Deneysel ve boost programı ile elde edilen CO,NOx, İs değerlerinin karşılaştırılması.....	30
Şekil 2. 8 Deneysel olarak ve de Boost programı ile elde edilen teorik sonuçların karşılaştırılması.....	31
Şekil 2. 9 Silindirdeki enerji dengesi.....	33
Şekil 2. 10 Standart krank açısı hesabı.....	35
Şekil 2. 11 Açığa çıkan ısı ölçümü yaklaşımı.....	39
Şekil 2. 12 Şekil parametresi “m” nin etkisi.....	39
Şekil 2. 13 İki Hareket Fonksiyonunun Süper pozisyonu.....	41
Şekil 2. 14 Alev ön yanma ağırlığı.....	42
Şekil 2. 15 Çok Bölgei Yanma Modelinde Püskürtme Ayrıştırma.....	44
Şekil 2. 16 Isıl analiz için sistem ve kabuller	53
Şekil 2. 17 Toplam ve net ısı açığa çıkışı ve ısı transferinin, alevin sönme bölgeleri ve yakıt buharlaşmasına etkisi	55
Şekil 3. 1 Deney setinin şematik gösterimi ve fotoğrafı	58
Şekil 3. 2 ApiCom Eddy Current dinamometre ve kontrol ünitesi.....	59

Şekil 3. 3 Gaz hattı ekipmanlarının şematik gösterimi ve fotoğrafı.....	61
Şekil 3. 4 Elektronik kontrol sistemi şematik gösterimi ve fotoğrafı	62
Şekil 3. 5 Dizel yakıt sistemi çizimi ve fotoğrafı	64
Şekil 3. 6 Mavi gaz enjektörü	65
Şekil 3. 7 Dizel yakıt sistemi similatörü şematigi ve fotoğrafı.....	66
Şekil 3. 8 Motorun soğutma sisteminin fotoğrafı	67
Şekil 3. 9 Motorun emme manifoldunun fotoğrafı.....	68
Şekil 3. 10 Motorun egzoz manifoldunun fotoğrafı.....	68
Şekil 3. 11 Motorin yakıt ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	69
Şekil 3. 12 Motorin yakıt ölçüm sisteminin fotoğrafı.....	70
Şekil 3. 13 Silindir içi gaz basıncı ölçüm sistemi	71
Şekil 3. 14 Motor gösterge panosu	71
Şekil 3. 15 Basınç sensörü kovanı	72
Şekil 3. 16 Elektromanyetik dizel enjektör fotoğrafı ve şematigi	73
Şekil 3. 17 AVL Digas 4000 Egzoz Emisyonu Ölçer	73
Şekil 3. 18 AVL 415S Is Emisyonu Ölçer	74
Şekil 3. 19 Soğutma suyu termokupl bağlantıları	75
Şekil 3. 20Egzoz hattı termokupl bağlantısı	75
Şekil 3. 21 National Instruments marka USB-6215 tipi veri toplama kartı	76
Şekil 3. 22 National Instruments cDAQ modül şasisi	76
Şekil 4. 1 Performans deneylerinin çalışma şartları.....	81
Şekil 4. 2 ESC ve enerji içeriği deneyleri.....	82
Şekil 4. 3 Dizel enjektörü püskürtme karakteristiği eğrileri.....	83
Şekil 4. 4 Gaz enjektörü püskürtme karakteristiği.....	84
Şekil 4. 5 Mekanik dizel yakıt sistemli motorun performans ve emisyon grafikleri	86
Şekil 4. 6 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	89
Şekil 4. 7 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	90
Şekil 4. 8 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	91
Şekil 4. 9 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği.....	92
Şekil 4. 10 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	96
Şekil 4. 11 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	97
Şekil 4. 12 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	98
Şekil 4. 13 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	99
Şekil 4. 14 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	100
Şekil 4. 15 Farklı püskürtme avanslarında egzoz sıcaklığı karakteristiği.....	101
Şekil 4. 16 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	102
Şekil 4. 17 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	103
Şekil 4. 18 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	105
Şekil 4. 19 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	107
Şekil 4. 20 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	109
Şekil 4. 21 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	110
Şekil 4. 22 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	112
Şekil 4. 23 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	114
Şekil 4. 24 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	117
Şekil 4. 25 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	118
Şekil 4. 26 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	119

Şekil 4. 27 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği.....	120
Şekil 4. 28 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	124
Şekil 4. 29 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	125
Şekil 4. 30 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	126
Şekil 4. 31 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	127
Şekil 4. 32 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	128
Şekil 4. 33 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği.....	129
Şekil 4. 34 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	130
Şekil 4. 35 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	131
Şekil 4. 36 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	132
Şekil 4. 37 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	134
Şekil 4. 38 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	135
Şekil 4. 39 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	136
Şekil 4. 40 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	138
Şekil 4. 41 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	140
Şekil 4. 42 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	143
Şekil 4. 43 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	144
Şekil 4. 44 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	145
Şekil 4. 45 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği.....	146
Şekil 4. 46 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	150
Şekil 4. 47 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	151
Şekil 4. 48 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	152
Şekil 4. 49 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	153
Şekil 4. 50 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	154
Şekil 4. 51 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği.....	155
Şekil 4. 52 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	156
Şekil 4. 53 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	157
Şekil 4. 54 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	158
Şekil 4. 55 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	159
Şekil 4. 56 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	161
Şekil 4. 57 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	162
Şekil 4. 58 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	163
Şekil 4. 59 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	164
Şekil 4. 60 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	174
Şekil 4. 61 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	175
Şekil 4. 62 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	176
Şekil 4. 63 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	177
Şekil 4. 64 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	181
Şekil 4. 65 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	182
Şekil 4. 66 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	183
Şekil 4. 67 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	184
Şekil 4. 68 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	185
Şekil 4. 69 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği.....	186
Şekil 4. 70 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	187
Şekil 4. 71 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	188
Şekil 4. 72 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	190

Şekil 4. 73 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	192
Şekil 4. 74 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	193
Şekil 4. 75 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	194
Şekil 4. 76 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	196
Şekil 4. 77 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	198
Şekil 4. 78 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	201
Şekil 4. 79 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	202
Şekil 4. 80 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	203
Şekil 4. 81 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği.....	204
Şekil 4. 82 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	209
Şekil 4. 83 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	210
Şekil 4. 84 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	211
Şekil 4. 85 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	212
Şekil 4. 86 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	213
Şekil 4. 87 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği.....	214
Şekil 4. 88 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	215
Şekil 4. 89 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	216
Şekil 4. 90 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	218
Şekil 4. 91 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	220
Şekil 4. 92 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	221
Şekil 4. 93 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	222
Şekil 4. 94 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	223
Şekil 4. 95 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	225
Şekil 4. 96 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği.....	227
Şekil 4. 97 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği.....	228
Şekil 4. 98 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği.....	229
Şekil 4. 99 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği.....	230
Şekil 4. 100 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği	233
Şekil 4. 101 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği	234
Şekil 4. 102 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği	235
Şekil 4. 103 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği.....	236
Şekil 4. 104 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği	237
Şekil 4. 105 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği	238
Şekil 4. 106 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	239
Şekil 4. 107 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	240
Şekil 4. 108 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	241
Şekil 4. 109 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği.....	242
Şekil 4. 110 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	244
Şekil 4. 111 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	245
Şekil 4. 112 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	246
Şekil 4. 113 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği.....	247
Şekil 4. 114 Farklı motor hızlarında ve motor çalışma şartlarında NOx ve is emisyonları açısından elde edilen değerler	256
Şekil 4. 115 Farklı motor hızlarında ve motor çalışma şartlarında termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler	258
Şekil 4. 116 Farklı CO2 içerikli biyogaz ilavesinde motor performans karakteristiği....	259

Şekil 4. 117 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde emisyon karakteristikleri	262
Şekil 4. 118 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde silindir içi gaz basıncı karakteristiği	264
Şekil 4. 119 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde ısı açığa çıkış oranı karakteristiği	266
Şekil 4. 120 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde motor performans karakteristiği	268
Şekil 4. 121 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde motor emisyon karakteristiği	271
Şekil 4. 122 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde silindir içi gaz basıncı karakteristiği	273
Şekil 4. 123 Farklı CO ₂ içerikli biyogaz ilavesinde ısı açığa çıkış oranı karakteristiği	275
Şekil 4. 124 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans karakteristikleri ...	278
Şekil 4. 125 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor emisyon karakteristikleri	279
Şekil 4. 126 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	280
Şekil 4. 127 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans karakteristikleri ...	283
Şekil 4. 128 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor emisyon karakteristikleri	285
Şekil 4. 129 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı karakteristikleri	286
Şekil 4. 130 1300d/d motor hızı için motor performans sonuçları	290
Şekil 4. 131 1300d/d motor hızı için emisyon sonuçları	291
Şekil 4. 132 1400d/d motor hızı için motor performans sonuçları	292
Şekil 4. 133 1400d/d motor hızı için emisyon sonuçları	293
Şekil 4. 134 1500d/d motor hızı için motor performans sonuçları	294
Şekil 4. 135 1500d/d motor hızı için emisyon sonuçları	295
Şekil 4. 136 Farklı motor yüklerinde silindir içi gaz basıncı karakteristikleri	298
Şekil 4. 137 Farklı motor yüklerinde ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	300
Şekil 4. 138 Rölanti şartında motor performans ve emisyon karakteristiği sonuçları..	307
Şekil 4. 139 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri	310
Şekil 4. 140 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	311
Şekil 4. 141 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri	315
Şekil 4. 142 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	316
Şekil 4. 143 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri	320
Şekil 4. 144 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	321
Şekil 4. 145 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri	325
Şekil 4. 146 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri	326
Şekil 4. 147 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor performans sonuçları	329
Şekil 4. 148 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor emisyonları sonuçları	330
Şekil 4. 149 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor emisyonu sonuçları	332
Şekil 4. 150 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde silindir içi gaz basıncı sonuçları ...	337
Şekil 4. 151 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde ısı açığa çıkış oranı sonuçları	341

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 2 Doğalgazın ÷lkere baēlı gaz kompozisyonu	4
Çizelge 1. 3 Dizel yakıtının hidrojen ve doğalgazın özellikleri ile karşılaştırılması	5
Çizelge 2. 1 Zeldovich mekanizması.....	45
Çizelge 2. 2 CO oluşum modeli	45
Çizelge 2. 3 Fanning sürtünme faktörü tablosu	51
Çizelge 3. 1 Deney motorunun teknik özellikleri	59
Çizelge 3. 2 ApiCom Eddy Current dinamometrenin teknik özellikleri.....	60
Çizelge 4. 1 Birim çevrimde motora gönderilen motorin yakıtı miktarı	80
Çizelge 4. 2 Soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları.....	80
Çizelge 4. 3 En iyi motor çalışma şartları ve performans-emisyon değerleri	349

ÇİFT YAKITLI MOTORLARDA PERFORMANS VE EMİSYON OPTİMİZASYONU

Yasin KARAGÖZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Tarkan SANDALCI

Petrol rezervlerinin hızla azalması ve son yıllarda hızla artan motorin fiyatları motor üretici firmalarını yeni bir alternatif yakıt bulmaya zorlamaktadır. Aynı zamanda, petrol türevi yakıtların çevreye ve insan sağlığına verdikleri zarar sebebiyle, daha çevreci bir alternatif yakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Giderek ağırlaşan emisyon regülasyonları, NO_x ve is partikülü emisyonları açısından motor üretici firmaları zorlamaktadır. Dizel motorlar yüksek verim avantajına rağmen, NO_x ve is partikülü emisyonları açısından dezavantaja sahiptirler. Dizel motorlarda, NO_x ve is partikülü emisyonunu azaltmak amacıyla sırasıyla SCR ve DPF kullanılmaktadır. Ancak, özellikle katalist malzemelerin pahalılığı yüzünden, alternatif gaz yakıtlara yönelim zaruri hale gelmiştir. Bu gelişmeler üzerine, otomotiv sektörü hali hazırda kullanımda olan motorlarda alternatif yakıtların kullanılması ile performans, egzoz emisyonu ve yanma karakteristiğinin iyileştirmesi üzerine çalışmalara başlamıştır. Alternatif yakıtların; kaynak ve potansiyel, yakıt temini, emniyet, zehirlilik ve sağlığa zararlılık, motor performansı ve emisyonları, depolama, yakıt deposu ve istenilen her yerde kolay bulunabilirlik gibi kriterler açısından incelenmesi gerekir. Doğalgaz, bu kriterlerin birçoğunu sağladığından içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilecek önemli alternatif yakıtlardan birisidir. Kolay bulunabilirliği, rezervlerinin petrole göre daha fazla olması, düşük maliyet ve temiz yanma

karakteristikleri ile dağıtım sistemlerinin var oluşuna ek olarak daha düşük araç emisyonlarına imkân vermesi, doğalgazı son derece elverişli bir alternatif yakıt yapmaktadır.

Doğalgaz, yüksek oktan sayısı ile dizel motorlarda dual modda güvenilir şekilde kullanılabilir. Metan ana yakıt olarak kullanılırken, bir miktar dizel pilot püskürtme ile tutuşmanın gerçekleştirilmesi mümkün olmakla beraber, yanma stabilitesi açısından en kullanışlı yöntemdir. Bu sebepten dolayı, emme kanalına veya manifolda püskürtme, direkt metan püskürtme ve sürekli manifolda püskürtme gibi yöntemler kullanılmıştır. Dizel motorlarda, CNG emme kanalına püskürtülürken, pilot dizel ile tutuşmanın sağlanması yöntemi, en güvenilir ve uygulanabilir yöntemdir. Bu çalışmada da, elektronik olarak kontrol edilebilen bir dizel enjektörünün ve emme kanalına püskürtülen bir CNG enjektörünün kontrol edilmesi ile dizel püskürtme karakteristiklerinin motor performansı ve emisyonlar açısından en uygun şartları belirlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmayla, dizel motorlarda doğalgaz-motorin çift yakıtının alternatif bir çözüm olarak en uygun emisyon ve özgül yakıt tüketimi şartlarında kullanılabilmesi açısından yanma karakteristiği incelenmiştir. Yapılan çalışmada teorik model ve testler ile en uygun motorin püskürtme karakteristiği ve motorin/doğalgaz (veya metan, biyogaz) oranı bulunarak dizel motorların doğalgaz-motorin çift yakıtına dönüştürülmesi ve motor kalibrasyon sürecinin hızlandırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dizel Motorlar, Çift Yakıt, Doğalgaz, Metan, Biyogaz, Yanma Karakteristiği

ABSTRACT

PERFORMANCE AND EMISSION OPTIMIZATION OF DUAL FUEL ENGINES

Yasin KARAGÖZ

Department of Mechanical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Tarkan SANDALCI

Rapid extinction of fossil fuels and continuous increase on oil prices compel engine manufacturers to find out a new alternative fuel. In addition, it is an inevitable necessity to study on an alternative, reliable and environmentalist fuel due to damage given to environment and to human beings by oil derivative fuels. Furthermore, exigent emission regulations on exhaust emissions especially like NO_x, hydrocarbons and carbon monoxide, compel industry to make researches on alternative fuels. Despite high efficiency of diesel engines, they are disadvantageous in terms of NO_x and soot emissions. Diesel engines use SCR and DPF respectively to reduce NO_x and soot particules. But, high cost of catalyst materials, it became obligatory to use alternative gas fuels. Automotive industry has started to study on improvement of performance, exhaust emission and combustion characteristics with usage of alternative fuels on engines in service. Alternative fuels should be observed in terms of some criteria like source and potential, fuel supply, security, toxicity, toxicity for health, engine performance and emissions, storage, fuel tank and availability. Natural gas replies to most of these criteria, so it is considered as an important alternative fuel for internal combustion engines. Its availability, reserves, low cost and clean combustion characteristics, distribution systems and low emissions pave the way for its usage as an alternative fuel.

Due to high octane number of natural gas, it can be used safely in dual mode in diesel engines. Methane being primary fuel, ignition is realised with a diesel pilot pulverization, it is the most available method with regards to combustion stability. That's why, methods like pulverization to port or manifold, direct methane pulverization or continuous manifold pulverization are used. In diesel engines, during pulverization of CNG from port, availability of ignition via pilot diesel is the most reliable method. The target is to optimize diesel pulverization characteristics with regard to engine performance and emissions, by help of electronically controlled diesel injector and a CNG injector pulverized from port. With this study, combustion characteristics will be observed in terms of availability of natural gas-diesel fuel dual fuel as an alternative solution in diesel engines under optimum emission and specific fuel consumption conditions. With theoretical model and tests, optimum diesel fuel pulverization characteristic will be found; it will accelerate conversion of diesel engines to natural gas-diesel fuel dual fuel and engine calibration period.

Keywords: Diesel Engines, Dual Fuel, Natural Gas, Methane, Biogas, Combustion Characteristics

1.1 Literatür Özeti

Kara yolu taşımacılığı, dünya genelinde açığa çıkan emisyonların yaklaşık %17'sinden sorumludur [1]. Kyoto Protokolü ile United Nations Framework Convention on Climate Change' de alınan tüm önlemlere rağmen, 1990-2004 tarihleri arasında CO₂ emisyonu miktarı %27 artarken, ulaşım kaynaklı olarak yayılan CO₂ emisyonu miktarı ise %37 oranında artmıştır [2]. Avrupa Birliği Komisyonu Direktifi (2009/28/EC), 2020 yılına kadar ulaşım kaynaklı tüketilen yakıtların %10'unun biyolojik kökenli yakıtlardan oluşmasını hedeflemektedir. Ayrıca, Avrupa Birliği Komisyonu White Paper Report'a göre, 2050 yılında ulaşım kaynaklı sera gazı emisyonunda 1990 yılına göre %60 düşüş hedeflenmektedir [26]. 2010 ila 2011 yılları arasında ulaşım sektöründe yenilenebilir enerji tüketimi %3.5'tan %3.8 değerine çıkmasına karşın belirlenen hedefe ulaşabilmesi için bu oranın en az %4.1 olması gerektiği belirtilmiştir [3]. Dizel motorlar, ulaşım sektöründe yaygın olarak kullanılmakla beraber, özellikle otomobillerde yüksek termik verim, düşük HC, CO ve CO₂ değerleri gibi üstün özelliklere sahip olmalarına rağmen, yüksek miktarda PM ve NO_x emisyonu açığa çıkarmaktadırlar [4]. NO_x, fotokimyasal is oluşumuna ve asit yağmuru oluşumuna sebep vermektedir. İs partikülü emisyonları ise, kalp ve damarla ilgili ölüm oranlarını arttırırken, çocuklarda akciğer gelişimini olumsuz etkilemekte, diğer bir takım sağlık sorunlarına da yol açmaktadır[5]. 2013 Air quality report in Europe'a göre, 2011 yılında trafik kontrol noktalarından yapılan ölçümlerin %42'sinde NO₂ emisyonu sınır değeri geçmiştir [3]. 2011 yılında, partikül madde (<=10µm) emisyonları trafikli alanlarda %43, şehir içlerinde %38, endüstriyel alanlarda %25, kırsal alanlarda ise %15 olarak belirlenen sınırı aşmıştır [3]. Yine aynı raporda

İstanbul yüksek tehlike sınırındaki şehirler arasında belirtilmiştir. Meydana gelen NOx ve özellikle partikül madde artışının temel nedeni, son yıllardaki dizel motorlu araç sayısındaki artıştır [3],[6].

Yapılan bazı çalışmalarda, 2035 yılında araç sayısının, 2010 yılındaki araç sayısının 2 katına çıkabileceği öngörülmüştür [7]. Bu araçların büyük çoğunluğunu dizel taşıtlar oluşturmaktadır. Diğer taraftan, son yıllarda fosil yakıtların hızla tükenmesi ile artan motorin fiyatları benzine oldukça yaklaşmıştır. Ayrıca, giderek ağırlaşan emisyon regülasyonları, gerek dizel, gerekse pozitif ateşlemeli (Otto) motorların yanma sonu ekipmanları teknolojilerini geliştirmek zorunda bırakmıştır. Ağırlaşan emisyon regülasyonları ise NOx emisyonlarının 0'a yakın açığa çıkmasını istemektedir [8]. Özellikle son yıllarda yüksek emisyon normlarını karşılamak için yanma sonu iyileştirme ekipmanlarının maliyetinin, neredeyse motor maliyetine yaklaşmasıyla, alternatif yakıt arayışları hız kazanmıştır. Dizel motorlar, NOx ve is partikülü emisyonunu azaltmak için, sırasıyla SCR ve DPF kullanırlar. Ancak, özellikle katalist malzemelerin pahalılığı yüzünden, alternatif gaz yakıtlara yönelimi zaruri hale gelmiştir [9]. Ayrıca, petrol bazlı yakıtların hızla tükenmesi ve bununla beraber artan petrol fiyatları motor üretici firmaları yeni bir alternatif yakıt bulmaya zorlamaktadır [10]. Aynı zamanda, petrol türevi yakıtların çevreye ve insan sağlığına verdikleri zarar sebebiyle, alternatif, güvenilir ve çevreci gaz yakıtların üzerine çalışılması kaçınılmaz bir gereksinim haline gelmiştir [11].

Bu gelişmeler üzerine otomotiv sektörü, hem enerji verimliliği ve yakıt ekonomisini arttırmak, hem de kirletici egzoz emisyonlarını azaltmak amacıyla çeşitli hibrit konfigürasyonlu araçlara ve/veya hali hazırda kullanımda olan motorlarda alternatif yakıtların kullanılması yönünde çalışmalara hız vermiştir [10],[12]. Yine Avrupa Birliği Yenilenebilir Enerji Direktifi'nde (RED), alınan tüm tedbirlere rağmen karayolu ulaşım sektöründe, hibrit araç ve elektrikli araç gibi alternatif tahrik sistemlerinin ve doğalgaz, biyogaz, hidrojen gibi alternatif yakıtların kullanım oranlarının beklentilerin çok uzağında kaldığı ve alternatif yakıt kullanımını büyük oranda LPG ve biyodizelin oluşturduğu; önümüzdeki yıllarda başta hibrit ve elektrik gibi alternatif tahrik sistemleri olmak üzere, doğalgaz, biyogaz, etanol gibi alternatif yakıtların kullanım oranlarının artışının zaruri hale geldiği belirtilmiştir [3].

Elektrikli araçların yüksek maliyetleri, araç pazarında yer bulmalarını sınırlamaktadır. Batarya gibi kritik parçaların ömürlerinin ortalama 3 ila 5 yıl olması ve 5 ila 8 saat gibi uzun batarya şarj süreleri (hızlı şarjlı sistemlerde bile bu süre 3-4 saatin altına inmemektedir), elektrikli araçların diğer dezavantajlarıdır [13]. Ayrıca, elektrikli araçların menzillerinin sınırlı olması sebebiyle, özellikle ağır ticari yük ve yolcu taşımacılığında, batarya teknolojisinin gelişimini tamamlayıp, bataryaların enerji yoğunlukları arttırılana kadar yakın gelecekte ticari olarak kullanılmaları mümkün görülmemektedir [14].

Elektrikli araçların sınırlı menzile sahip olması ve şarj problemleri gibi sebeplerden, elektrikli araçlara doğrudan geçiş yapılamadığından dolayı, elektrikli araçların dezavantajlarını gidermek adına hibrit elektrikli araçlar açığa çıkmıştır [13]. Hibrit elektrikli araçlar, konvansiyonel motorlu araçlara göre, rejeneratif frenleme ile enerji kaybını en aza indirmesi, İYM boyutlarının küçültülmesi ile yakıt verimi ve emisyonların iyileşme göstermesi gibi pek çok avantaja sahiptirler. Ancak, günümüz batarya teknolojisi de göz önünde bulundurulduğunda, hibrit araçlar da, daha çok şehir içi ulaşımda kullanılabilmektedir ve araçlara içten yanmalı motor yanında batarya, elektrik motoru ve sürücüsü vs. ekipman maliyetleri ekleneceği için, maliyetleri yüksektir. Bu sebepten dolayı, geçiş döneminde mevcut motorlardaki konvansiyonel dizel motorların, alternatif gaz yakıtlarla çalıştırılabilir hale getirilmesi, daha fizibil ve ekonomik bir çözümdür.

Taşıtlarda kirletici egzoz emisyonlarını iyileştirmede ve yakıt ekonomisi sağlamada kullanılabilecek en ticari ve ekonomik yöntem de konvansiyonel motorlarda alternatif yakıtlar kullanmaktır. Alternatif yakıtlar arasında, alkoller, sebze yağı, LPG, CNG, LNG, hava gazı, biyogaz ve hidrojen ön plana çıkmaktadır. Alternatif yakıtların; kaynak ve potansiyel, yakıt temini, emniyet, zehirlilik ve sağlığa zararlılık, motor performansı ve emisyonları, depolama, yakıt deposu ve istenilen her yerde kolay bulunabilirlik gibi kriterler açısından incelenmesi gerekir. Doğalgaz, bu kriterlerin birçoğunu sağladığından içten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılabilecek önemli alternatif yakıtlardan birisidir. Kolay bulunabilirliği, rezervlerinin petrole göre daha fazla olması, düşük maliyet ve temiz yanma karakteristikleri ile dağıtım sistemlerinin var oluşuna ek olarak daha düşük araç emisyonlarına imkân vermesi, doğalgazı son derece elverişli bir

alternatif yakıt yapmaktadır. Doğalgazın büyük bölümünü %90-96 CH₄ (metan) gazı oluşturmaktadır. Geri kalan bölümünü ise %2.411 C₂H₆ (etan), %0.736 C₃H₈ (propan), %0.371 C₄H₁₀ (bütan), %0.776 N₂ (azot), %0.164 C₅H₁₂ (pentan) ve %0.085 CO₂ (karbondioksit) oluşturmaktadır [15]. Temel içeriğini metan gazının oluşturduğu doğalgazın kompozisyonu, Çizelge 1.1’de görüldüğü gibi ülkelere bağlı olarak değişmektedir. Ancak, yüksek metan içeriğinden dolayı, doğalgazda metanın özellikleri ön plana çıkmaktadır. Dizel motorlarda güncel emisyon standartlarını yakalamamanın bir yolu da, dizel yakıtını daha temiz, düşük karbon içerikli bir alternatif yakıtla değiştirmektir [5]. Ayrıca, CNG (yüksek basınç altında sıkıştırılmış doğalgaz) bir fosil yakıt olmasına karşın, metanın düşük C:H atomu oranından dolayı, sera gazlarında (green house gases) %25’e varan azalma sağlayabilmektedir.

Çizelge 1. 1 Doğalgazın ülkere bağlı gaz kompozisyonu [16]

Komponent	%Hacim				
	Avustralya	Yunanistan	İsveç	İngiltere	Malezya
Metan (CH ₄)	90.0	98.0	87.58	91.1	92.74
Etan (C ₂ H ₆)	4.0	0.6	6.54	4.7	4.04
Propan (C ₃ H ₈)	1.7	0.2	3.12	1.7	0.77
Bütan (C ₄ H ₁₀)	0.4	0.2	1.04	1.4	0.14
Pentan (C ₅ H ₁₂)	0.11	0.1	0.17	-	-
Hekzan (C ₆ H ₁₄)	0.08	-	0.02	-	-
Heptan (C ₇ H ₁₆)	0.01	-	-	-	-
Karbondioksit (CO ₂)	2.7	0.1	0.31	0.5	1.83
Nitrojen (N ₂)	1.0	0.8	1.22	0.6	0.45

Metan, dar tutuşabilirlik limitlerine ve fakir karışımlarda düşük alev hızına sahiptir [9]. Karbon içeriğinin benzin ve dizel yakıtı göre düşük olmasından dolayı CO₂ emisyonlarında aynı enerji değerine göre azalma görülür [17]. CNG (yüksek basınç altında sıkıştırılmış doğalgaz) büyük oranda metan gazından oluşan, temiz bir yakıt olmakla beraber, 540 C kendi kendine tutuşma sıcaklığı ve dar tutuşabilirlik limitleri (%5 ila %15) gibi sebeplerden dolayı, dizel motorlarda kullanılmasında pilot dizel püskürtme ile tutuşma sağlanmaktadır [8]. Çizelge 1.3’de, dizel yakıtının hidrojen ve doğalgaz yakıtlarının özellikleri ile karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 1. 2 Dizel yakıtının hidrojen ve doğalgazın özellikleri ile karşılaştırılması [16]

Özellik	Dizel	Hidrojen	Doğalgaz
Ana komponent	C ₁₂ H ₂₃	H ₂	Metan CH ₄
Kendi kendine tutuşma sıc (K)	553	858	923
Alt ışıık değeri (MJ/kg)	42.5	119.93	50
Yoğunluk (kg/m ³)	833-881	0.08	0.862
Moleküler ağırlığı (g/mol)	170	2.016	16.043
Tutuşabilirlik limitleri (%hacim)	0.7-5	4-75	5-15
Alev hızı (m/s)	0.3	2.65-3.25	0.45
Özgöl ağırlık	0.83	0.091	0.55
Kanyama noktası (K)	453-653	20.2	11.5
Setan sayısı	40-60	-	-
Oktan sayısı	30	130	120
CO ₂ emisyonu (%)	13.4	0	9.5
Havadaki difüzyonu (cm ₂ /sn)	-	0.61	0.16
Min. tutuşma enerjisi (MJ)	-	0.02	0.28

Diğer taraftan, biyogaz, artık organik maddelerin aneorobik (havasız) fermantasyonu sonucu açığa çıkan, renksiz, kokusuz, havadan yoğunluğu düşük (havaya göre yoğunluk oranı 0.83) ve oktan sayısı 110 olan, parlak mavi alevle yanan ve birleşiminde %54-80 oranında metan (CH₄) ve %20-46 oranında karbondioksit (CO₂) olan gaz karışımıdır.

Bilindiği gibi, ülkemizde mevcut enerji tüketiminin en az %60'ı ithalat ile karşılanmaktadır [20]. Türkiye İstatistik Kurumu'nun 2006 yılı verilerine göre, Türkiye'de küçük baş, büyük baş ve kümes hayvanları için hesaplama yapılırca, Türkiye'de kullanılabilir hayvansal atık miktarı 1.8 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) değerine eşittir [20]. Bir başka kaynaktaki verilere göre ise, ülkemizdeki tarım atıklarından her yıl elde edilebilecek enerji miktarı 5.4 Mtep değerine, orman ve sanayii atıklarından elde edilebilecek enerji miktarı 5.9 Mtep değerine, hayvansal atıklardan elde edilebilecek enerji miktarı ise 1.5 Mtep değerine karşılık gelmektedir [21]. Bu da, toplamda 12.8 Mtep (milyon ton eşdeğer petrol) eşdeğer petrol değerine denk gelmektedir. Yalnızca tarımsal, orman sanayii ve hayvansal atıklardan elde edilebilecek kullanılabilir enerji, Türkiye'nin yıllık enerji tüketiminin %22 ila %27'si arasında olduğu görülmektedir.

Türkiye sadece hayvansal atıklar ile çalışabilecek en az 2000 adet biyogaz tesisi kapasitesine sahiptir [22],[23]. Ancak, şu anda yalnızca 36'sı çalışan 85 biyogaz tesisimiz

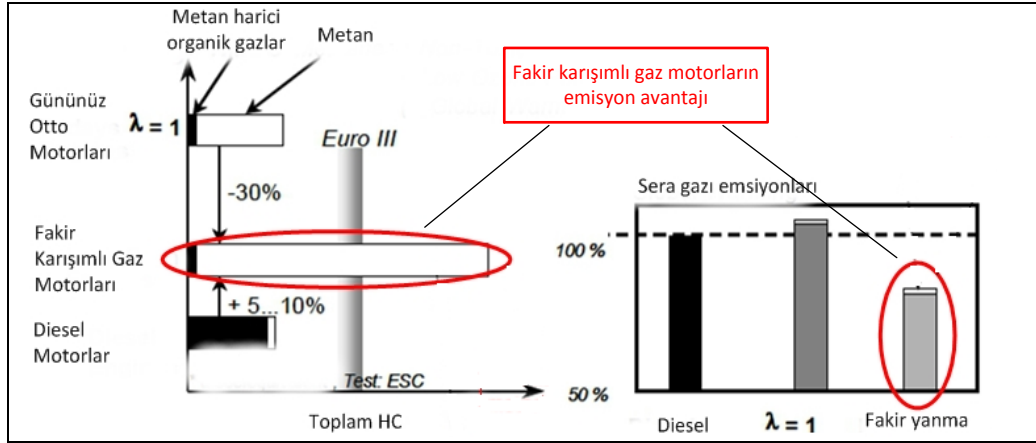
bulunmaktadır. Biyogaz üretiminden sonra açığa çıkan mükemmel gübre ile bitkinin besleme değeri %20'ye kadar artış sağlandığı bilinmektedir [24].

Dizel motorlar için alternatif, temiz bir yakıt olan biyogazın temel bileşeninin metan (CH_4) olduğu göz önüne alınırsa, fosil yakıtlara göre oldukça temizdir [4]. Organik maddelerin aneorobik fermantasyonuyla üretilmektedir. Yüksek oranda CO_2 içeren ve bu yüzden düşük ısı enerjisiye sahip bir yakıttır. Yüksek oktan sayısından dolayı, biyogaz yüksek sıkıştırma oranlı motorlarda daha yüksek verim elde etmek için kullanılabilir. Bu yüzden, biyogaz dizel motorlarda dual modda rahatlıkla kullanılabilir. Ancak, düşük yüklerde, biyogazın yüksek CO_2 içeriğinden dolayı, uzun tutuşma gecikmesi, fakir karışımdan dolayı düşük alev hızı ve düşük termik verim sorunu ile karşılaşmaktadır [18],[25]. İçeriğindeki CO_2 ve diğer gazların varlığından dolayı, doğalgaza göre daha düşük enerji içeriğine sahiptir. Ayrıca bu yüzden alev hızı düşer ve tutuşma gecikmesi süresi artar. Ayrıca, biyogaz ile yapılan çalışmalarda, doğalgaza göre CO miktarında bir artış, NO_x miktarında ise bir miktar düşüş gözlenmiştir [19].

Ekonomik ve çevresel avantajlarından dolayı, biyogazın dizel motorlarda çift yakıt moduyla kullanılması oldukça avantajlıdır [4]. Biyogazın veya doğalgazın dizel motorlarda motorin veya biyodizel gibi bir dizel yakıtı ile beraber çift yakıt yöntemi ile kullanılması ile hem NO_x , hem PM emisyonlarında düşüş sağlanırken, yakıt maliyetleri açısından da oldukça avantajlıdır. Biyogaz ve doğalgaz yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığından dolayı, dizel motorlarda doğrudan kullanılamazlar. Bu yüzden, pilot motorin püskürtme ile tutuşma sağlanır. Aynı zamanda, biyogazın geniş tutuşabilirlik limitlerine sahip bir gaz yakıt olmasından dolayı, fakir ve seyreltilmiş karışımda lokal yanma sonu sıcaklıklarının düşmesi sayesinde, NO_x emisyonları kontrol altında tutulabilir[4]. Yüksek reaktiviteye sahip bir yakıtla tutuşmayı sağlamak ve düşük reaktiviteye sahip bir yakıt porttan göndermek çözüm olabilir. Ayrıca, biyogaz yüksek oktan sayısı ve içeriğindeki yüksek CO_2 oranı sayesinde, EGR yapmadan, dizel motorlarda dual modda rahatlıkla kullanılabilir [26]. Biyogaz veya doğalgaz ana yakıt olarak kullanılırken, bir miktar dizel pilot püskürtme ile tutuşmanın gerçekleştirilmesi mümkün olmakla beraber, yanma stabilitesi açısından en kullanışlı yöntemdir. Bu sebepten dolayı, emme kanalına veya manifolda püskürtme, direkt biyogaz püskürtme ve sürekli manifolda püskürtme gibi yöntemler kullanılmıştır. Emme kanalına veya

manifolda püskürtme yönteminde bazen, anormal yanma (vuruntu, ön-ateşleme, alev tepmesi) görülme ihtimali vardır. Ayrıca, hem emme kanalına veya manifolda püskürtme yönteminde, hem de sürekli manifolda püskürtme, emme havasının bir kısmı ile metanın yer değiştirmesinden dolayı, volümetrik verimde düşüş görülmekle beraber, motor gücünde bir miktar düşüş gözlenir. Direkt gaz püskürtme ile bu zorlukların üstesinden gelinebilir. Ancak, direkt metan püskürtme yönteminde ise, dizel motorda modifikasyon yapmak, silindir kafasına ekstradan yüksek basınçlı metan enjektörü yerleştirmek gerekmektedir. Ayrıca, bu yüksek basınçlı metan enjektörü piyasada mevcut olmamasından dolayı özel tasarıma ihtiyaç duyulmakla beraber, yüksek yanma sıcaklıklarına dayanıklı olması gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, emme kanalına veya manifolda püskürtme yöntemi ile dual modda pilot dizel püskürtme ile biyogazın dizel motorlarda kullanılması ön plana çıkmakta ve birçok araştırmacı tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [12]. Bu yöntemde, fümigasyon yöntemi de denir ve kolaylıkla dizel motorlarda ufak modifikasyonlarla kullanılabilir. Bu yöntemde, hava ile biyogaz (veya doğalgaz) yanma odasına girmeden önce karıştırılmış olur ve yukarıda belirtildiği gibi, sıkıştırma strokunun sonlarına doğru pilot dizel püskürtme ile tutuşma sağlanır [27],[28]. Karim'e göre dual modda gaz yakıt ve dizel'in yanması 3 modda gerçekleşir: 1)Pilot dizel'in yanması, 2)Dizel spreyi etrafında metanın yanması, 3)Biyogaz-hava karışımında alevin ilerlemesidir. Ancak, düşük yüklerde, aşağıdaki şekilden de görüleceği gibi, 3. modda, kısmi yüklerde karışımın aşırı fakir olmasıyla, alev sönme bölgelerinin artması ve eksik yanma sonucunda THC (toplam hidrokarbon) emisyonlarında artış gözlenebilir [29]. Ancak, biyogaz/doğalgaz ana yakıt olarak kullanıldığı ve pilot motorin püskürtme yönteminin kullanıldığı motorlarda, fakir karışimli yanma koşullarında (yüksek hava fazlalık katsayılarında), Şekil 10'dan da anlaşıldığı gibi toplam sera gazı kirleticileri düşmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, fakir karışimli biyogaz/doğalgaz-motorin çift yakıtlı motoru, konvansiyonel dizel motorlara ve otto çevrimi ile çalışan (pozitif ateşlemeli) motorlara göre başta PM ve NO_x olmak üzere, emisyonlar açısından büyük ölçüde avantaj sağlamaktadır. Yalnızca, yukarıda belirtildiği gibi aşırı fakir karışımda, alev sönme bölgelerinin artmasından dolayı THC emisyonlarında bir miktar artış gözlenir ancak, açığa çıkan THC emisyonların büyük kısmı yanmamış metandır. Kaldı ki, Otto ve dizel motorlarda yanma sonrası iyileştirme

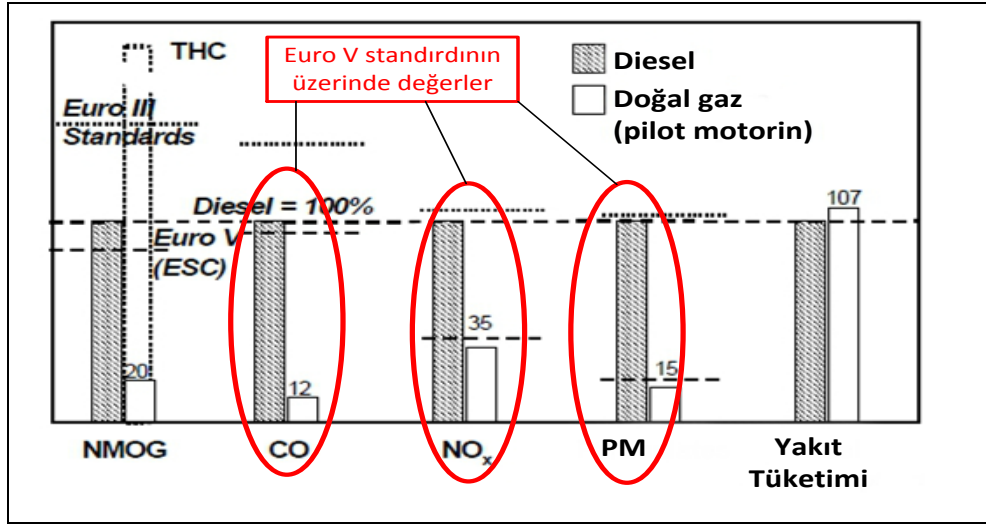
ekipmanları olduğu ve doğalgaz/biyogaz-motorin çift yakıtlı motorda, herhangi bir yanma sonrası iyileştirme sistemi bulunmadığı düşünülürse, biyogaz/doğalgaz-motorin çift yakıtlı dizel motorunda yanma sonrası iyileştirme ekipmanlarının kullanılmasıyla, aradaki farkın çok daha artacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 1. 1 Fakir karışımli doğalgaz/biyogaz-motorin çift yakıtlı motorların emisyon değerlerinin konvansiyonel benzinli ve dizel motorların emisyon değerleri ile karşılaştırılması[30]

Biyogazın veya doğalgazın dizel motorlarda motorin veya biyodizel gibi bir dizel yakıtı ile beraber kullanılması NOx ve PM emisyonlarında düşüş sağlarken, yakıt maliyetleri açısından da oldukça avantajlıdırlar. Şekil 10'da görüldüğü gibi, yanma sonrası iyileştirme sistemli Euro V dizel motor ile herhangi bir emisyon iyileştirme sistemine sahip olmayan doğalgaz-motorin çift yakıtlı motorun emisyon değeri karşılaştırılması verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, doğalgaz/motorin çift yakıtlı dizel motor Euro V emisyon standardı gereksiniminin çok altındadır. Doğalgazın emme kanalından püskürtüldüğü (fümigasyon), pilot motorin püskürtme yöntemi ile tutuşmanın sağlandığı bu yöntemde, yanma sonrası emisyon iyileştirme sistemlerine gerek kalmaksızın CO, NOx ve PM emisyonlarında büyük oranda iyileşme sağlanmıştır. Özellikle, dizel motorlarda önemli olan PM ve NOx emisyonlarının beraber düşürülmesi ve bu değerlerin Euro V regülasyon kriterlerinin oldukça altında olması önemlidir. Ancak, THC (toplam hidrokarbon) emisyonlarında, fakir karışım şartlarında ($\lambda > 1$) çalışıldığı için, alev sönme bölgelerinin artmasıyla bir miktar artış gözlenmiştir. Ancak, açığa çıkan THC'lerin büyük kısmını yanmamış hidrokarbon yerine metanın (CH_4) oluşturduğu görülmektedir. Ayrıca, doğalgaz/biyogaz-motorin çift yakıtının toplam

yakıt tüketiminin eşdeğer motorin karşılığı hesaplanarak, konvansiyonel dizel motorun motorin tüketimi ile karşılaştırıldığında, yakıt tüketiminde çok az bir miktar düşüş gözlenmesine rağmen, doğalgaz/biyogaz yakıtlarının, motorine göre daha ekonomik olmasından dolayı, doğalgaz yakıt ekonomisi açısından büyük avantaj sağlamaktadır.



Şekil 1. 2 Doğalgaz-motorin çift yakıtlı yanma sonrası iyileştirme sistemli bir dizel motorla, yanma sonrası iyileştirme sistemli konvansiyonel bir dizel motorun emisyonlarının karşılaştırılması [30]

Diğer taraftan, hem NO_x, hem de is emisyonlarını azaltmada, HCCI (homojen dolgu sıkıştırılmalı ateşlemeli) motorlar çözüm olabilirler çünkü ultra düşük NO_x emisyonu ve neredeyse 0 is partikülü emisyonu değerine sahiptirler. HCCI motorlar, dizel ve otto motorların üstün özelliklerini taşırlar. Ön karışım ve fakir karışımın, yüksek sıkıştırma oranı ile kendi kendine tutuşmasıyla yanma gerçekleştiğinden, düşük emisyon, yüksek termik verim ve yüksek ısı açığa çıkış oranı gibi pek çok avantaja sahiptirler. Ancak, HCCI motorların en büyük dezavantajı, geniş bir devir ve yük aralığında tutuşmanın başlama noktasının kontrol edilmesinde güçlük çekilmesidir [8]. HCCI motorların yanmayı kontrol etme güçlüğüne aşmak için, VVT ve EGR ile yanma fazı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Ancak, HCCI motorlarda yanmayı kontrol etmenin en etkili yöntemlerinden birisi de, yanmayı başlatmak için çok az bir miktar pilot dizel püskürtmektir (PCCI veya diğer bir ifadeyle kısmi HCCI yöntemi) [8]. Metanın yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığına ve dar tutuşabilirlik limitlerine sahip olmasından dolayı, dizel motorlarda kullanılmasında pilot dizel püskürtme ile tutuşma sağlanması ve alternatif çevrimler için PCCI metodunun kullanılması en uygun yöntemlerdir[8].

Doğalgaz taşıtlarda yakıt olarak iki şekilde depolanır ve kullanılır:

1. Sıkıştırılmış Doğalgaz (Compressed Natural Gas - CNG): 200-250 bar basınçta sıkıştırılıp gaz tüplerinde depolanır. 250 barda atmosfer basınç ve sıcaklığındaki doğalgaza oranla yaklaşık 1/200 hacim kaplar [15].
2. Sıvılaştırılmış Doğalgaz (Liquefied Natural Gas - LNG); Düşük basınç fakat kriyojenik olarak soğutulmuş tanklarda sıvı (boiling cryogen) olarak atmosfer basıncında -160°C sıcaklıkta çift duvarlı, vakum yalıtımlı tüplerde depolanır. Atmosfer basınç ve sıcaklığındaki doğalgaza oranla 1/600 hacim kapladığından, sıvı olarak taşıtların döşeme altında kullanılır [15].

Taşıtlarda doğalgazın uygulaması, yüksek basınçlı tanklara ihtiyaç duyulması ve düşük menzile sahip olmalarından dolayı güçtür, ancak otobüslerde kullanılması daha uygundur. Gaz yakıtların şehir içi trafiğinde kullanılmaları, düşük emisyon ve is partikülü açısından avantajlıdır. Ayrıca doğalgazın SI motorlarda kullanılmasında, sıkıştırma oranı 10 ila 12 arasında olduğu kabul edilirse silindir içi basıncı 30 bar civarındayken, tam yükte süper şarjlı bir motorda 90 bar silindir içi basınç değerlerine ulaşıldığı için, buji tırnak gerilimi yaklaşık üç katına çıkmaktadır. Bu sorunu aşmak için az miktarda pilot dizel püskürtme ile tutuşmanın sağlanması daha uygundur[30]. Ayrıca, kısmi yüklerde doğalgazın SI motorlarda kullanılması ile Otto motorlarda gaz keleşi bulunmasından ve düşük sıkıştırma oranlarından dolayı verim ve performansları düşmektedir, bu sebepten dolayı biyogazın ve doğalgazın dizel motorlarda çift yakıt yöntemi ile kullanılması daha uygundur [30].

Biyogaz konusunda motor performansı ile ilgili yapılan araştırmalarda, çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bazı araştırmacılar motor gücünde düşüş meydana geldiğini [31], bazıları değişmediğini [32], bazıları ise motor gücünün arttığını [33],[34],[35] ifade etmiştir. Ayrıca, bazı araştırmacılar termik verimde düşüş [36],[37] bulurken, bazıları yüksek termik verim [38],[39],[40],[41],[42] bazıları ise düşük ve orta yüklerde termik verimde düşüş [43],[44],[45],[35] bulmuşlardır. Ancak, araştırmacıların hepsi, biyogazın kullanımı ile özellikle NO_x ve PM emisyonlarda iyileşme sağlandığı sonucuna varmıştır. Carlucci ve diğerleri [25], biyogazın ana yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtlı dizel motorlarda tutuşma gecikmesi süresinin uzayabileceği, bunun da emisyon ve performans üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Bir başka

çalışmada, düşük yükte çift yakıtlı motorlarda uzun tutuşma gecikmesi süresinden dolayı, termik verim ve açığa çıkan kirletici emisyon miktarında problem yaşanabileceği belirtilmiştir [25]. Kısmi yüklerde (özellikle düşük yüklerde) yüksek miktarda motorin ile biyogazın yer değiştirmesi ile termik verimde bir miktar düşüş; CO ve HC emisyonlarında ise bir miktar artış meydana geleceği sonucu elde edilmiştir [27]. Nathan ve diğerleri [46] ise, biyogazın ana yakıt olarak kullanıldığı çift yakıtlı dizel motorlarda, biyogazın içerisinde yüksek miktarda CO₂ bulunmasından dolayı düşük termik verim açığa çıkabileceğini belirtmiştir. Bir başka çalışmada ise, düşük güçlerde biyogaz ilavesi ile CH₄/CO₂ oranına bağlı olarak termik verimde %10'a varan düşüş yaşanabileceği belirtilmiştir [47]. Ancak, termik verimde bir miktar düşüş meydana gelmesi, biyogazın oldukça ekonomik bir yakıt olmasından dolayı bir dezavantaja sebep olmamakta, biyogaz yakıt olarak kullanıldığında yakıt tüketimi hala daha ekonomik olmaktadır.

Karim ve diğerleri [48], çeşitli gaz yakıtların dizel motorlarda çift yakıt olarak kullanılmasını incelemiş ve motor yükünün, motorin/gaz yakıt oranının, püskürtme avansının, emme havası sıcaklığı ve EGR'nin, motorun egzoz gazı emisyonlarını ve yanma karakteristiğini ciddi miktarda etkilediğini iddia etmiştir. Dizel motorlarda, CNG'nin emme kanalından püskürtülürken, pilot dizel ile tutuşmanın sağlanması (fümigasyon) yöntemi, en güvenilir ve uygulanabilir yöntemdir. Özellikle dizel motorlarda, kısmi yüklerde, aşırı fakir karışımda düşük alev hızı ve alev sönme bölgelerinden dolayı yüksek miktarda THC ve CO emisyonunun açığa çıkması ve düşük verim en önemli problemlerdir. Kısmi yüklerdeki sıkıntıları çözmek için, dolgu sıcaklığını ve basıncını değiştirme, sıvı yakıt miktarını değiştirmek, hava fazlalık katsayısını değiştirmek, dizel püskürtme karakteristiğini değiştirmek gibi yöntemler kullanılabilir [25]. Bazı araştırmacılar motorin/biyogaz değişim oranı üzerinde çalışırken [49], bazıları gaz yakıt-hava karışımını ısıtmış [43],[50], bazıları hava keleşliği ile karışımı zenginleştirme [43], bazıları EGR ile dolgu sıcaklığını değiştirme [51], bazıları direkt silindirlere gaz püskürtme [52] ve bazıları da pilot yakıt püskürtme parametreleri üzerinde [53] çalışmışlardır. Ayrıca, püskürtülen pilot dizel yakıtın türü, özellikleri ve kalitesinin özellikle setan sayısının tutuşma gecikmesi süresini doğrudan etkileyerek, ön karışımli yanma periyoduna ve dolayısıyla termik verim ve emisyonlara etki edeceği

bilinmektedir [54],[27]. Ayrıca, özellikle kısmi yüklerde açığa çıkan HC sorunu, sıcak ve soğuk EGR, ön ısıtma, kademeli dolgu, yardımcı yakıt (H₂ veya benzin) veya motor hızını düşürme gibi konular da çalışılmıştır.

Biyogazın özellikleri kompozisyonuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin, %60 metan içeren bir biyogazın hacimsel olarak alt ısı değeri 21.5 MJ/m³ iken, %96 metan içeren bir biyogazın hacimsel olarak alt ısı değeri 35 MJ/m³'tür [55]. Ayrıca, biyogaz bazı ülkelerde toplu taşımada kullanılmaktadır. Örneğin Lipkoping (İsveç) şehrinde, %97 metan konsantrasyonundaki biyogaz 64 otobüste ve birçok binek otomobil ve ticari araçta kullanılmaktadır. İsveç'te 2002'de hayata geçirilen ve hala yürürlükte olan proje ile ulaşım sektöründe CO₂ salınımı yaklaşık 9000 ton/yıl düşerken, yakıt maliyeti açısından da önemli ölçüde kazanç elde edilmiştir [56]. Biyogazın ulaşım sektöründe kullanılması ile ilgili uluslararası bir standart olmamakla beraber, gelişmiş bazı ülkeler (Almanya, Fransa, Hollanda, İsveç, Avusturya ve İsviçre) biyogazın ulaşım sektöründe kullanılması ile ilgili kendi standartlarını yayınlamışlardır [57]. Birçok ülkede metan konsantrasyonu en az %96 iken, CO₂ konsantrasyonu %4'ü geçmemektedir. Bu değerlerden, biyogazın çeşitli teknolojilerle CO₂ başta olmak üzere sülfür ve su buharı gibi gazlardan ayrılarak, neredeyse doğalgaz elde edilerek ulaşım sektöründe kullanılmıştır. Yüksek Wobbe indeksi, biyogaz için üst ısı değere bağlı bir diğer değerlendirme kriteri olarak kullanılmıştır. Hidrojen sülfür ve su buharı konsantrasyonu reaksiyonları neticesinde motoru korozyona uğratabileceğinden, Soretion teknolojisi ile uzaklaştırılmaktadır [58],[59],[60]. Biyogazın içerisindeki, CO₂ içeriği de kaldırılabilir veya azaltılabilir, ancak bilindiği gibi en çok enerji biyogaz konsantrasyonunu azaltmada harcanmaktadır [55]. Ayrıca, Avrupa'da, Arjantin, İran, Hindistan ve Pakistan gibi ülkelerde, sıkıştırılmış formda doğalgazın yaygın olarak araçlarda kullanıldığı bilinmektedir [59]. Ülkemizde de, bazı belediyelerin (İstanbul, Kocaeli) doğalgazlı kentsel ulaşım araçları kullandığı bilinmektedir.

Bazı araştırmacılar, biyogazın motorin yakıtı ile birlikte çift yakıt olarak dizel motorlarda kullanımı üzerinde çalışmışlardır. Duc ve Wattenachien [28], küçük bölünmüş yanma odalı zirai amaçlı bir dizel motoru biyogaz-motorin çift yakıtı ile çalıştırmışlardır. Dual modda biyogaz kullanımı ile motor performansında neredeyse hiç düşüş meydana gelmemiştir. Ayrıca, düşük yüklerde dual modda termik verimde düşüş gözlemlenirken,

yük miktarı arttıkça termik verimdeki düşüş azalmaktadır. Ayrıca, elde edilen sonuçlarda, biyogazın düşük maliyetinden dolayı, termik verimde meydana gelen bir miktar düşüşe rağmen, motorin yakıtına göre yakıt maliyeti açısından oldukça ekonomik olduğu bulunmuştur. Barik ve Murugan'ın yaptıkları çalışmada [11], dizel bir motorda değişik miktarlarda biyogaz (0.3 kg/h, 0.6 kg/h, 0.9 kg/h ve 1.2 kg/h) fümigasyon yöntemi ile gönderilmiş, motor performansı ve emisyonlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, dual modda, NO ve is emisyonlarında yalnız motorin yakıtına göre sırasıyla %39 ve %49 düşüş görülmüştür.

Bazı araştırmacılar ise, biyogaz ile birlikte biodizel yakıtını çift yakıt olarak kullanmışlardır. Bedoya ve diğerleri [27], %60CH₄ ve %40 CO₂ gazları karışımı ile simüle edilen bir biyogaz-dizel çift yakıtı ile çalışan bir motorda, 1500 d/d sabit motor hızında, dört farklı yük kademesinde çalışmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre, süperşarjlı sistemle beraber biodizel yakıtı kullanılması ile termik verim artmış, emisyonlardaki CO ve CH₄ miktarı düşmüştür. Yoon ve Lee [4], yalnız motorin ve yalnız biodizel yakıtları ile motorin-biyogaz ve biyodizel-biyogaz çift yakıtlarını karşılaştırmışlardır. Tüm çift yakıt çalışma şartlarında NO_x emisyonlarının arttığı ancak, is emisyonunun ise düştüğü sonucu elde edilmiştir [4].

Bazı araştırmacılar ise, farklı içeriklerdeki biyogazın (farklı CH₄/CO₂ oranlarının) motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Luijten ve Kerkhof [47] 12 kW'lık bir dizel motor-jeneratör setinde, çeşitli CH₄/CO₂ oranlarında biyogazı emme havasından fümigasyon yöntemi ile göndermişlerdir ve elde ettikleri sonuçlara göre, biyogaz kullanımı ile düşük yüklerde termik verimde %10'a kadar düşüş görülmüştür. Makareviciene ve diğerleri [55], biyogaz içerisindeki CO₂ konsantrasyonunun motor çalışma karakteristiği ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Biyogaz içerisindeki metan oranı arttıkça, püskürtme avansı da arttırılmıştır. Böylece termik verimde artış, CO, HC ve is emisyonlarında ise düşüş sağlanmıştır. Mustafi ve Raine [19] tek silindirli, 4 stroklu, direkt püskürtmeli Lister Petter PHW1 dizel bir motorda, pilot dizel püskürtme ile tutuşma gerçekleşecek ve emme manifoldundan iğne vana ile gaz yakıtı gönderecek şekilde çift yakıt ile çalışmışlardır. Gaz yakıt olarak boru hattından alınan doğalgaz kullanılırken, biogazı simüle etmek için doğalgazın içerisine çeşitli oranlarda CO₂ ilave edilmiştir. Deneyisel çalışmada hacimsel olarak %80 CH₄ ve %20

CO₂, %67 CH₄ ve %33 CO₂ ve %58 CH₄ ve %42 CO₂ olmak üzere 3 ayrı biogaz mevcuttur. Yapılan tüm çalışmalarda, biogaz çeşitleri veya doğalgaz kullanımı ile THC emisyonları hariç tüm emisyonlarda yalnız dizel yakıtı göre düşüş gözlenmiştir.

Bazı araştırmacılar ise, motorin biyogaz çift yakıtı ile çalışan dizel motorda emme havasını O₂ ile zenginleştirerek kısmi yüklerdeki yüksek THC ve CO emisyonları ve düşük termik verim sorunlarının üstesinden gelmeye çalışmışlardır. Cacua ve arkadaşları [25], 4 stroklu, doğal emişli, 2 silindirli, hava soğutmalı, direkt püskürtmeli bir Lister Petter dizel motorda, biyogaz ve dizel yakıtları dual modda kullanılmışlardır. Daha sonra, emme manifolduna O₂ göndererek, motor emme havasının oksijen miktarının hacimce zenginleştirilmesi ile çeşitli kısmi yük şartlarında yanma verimi ve emisyonlara etkisini incelemişler ve birbirleri ile karşılaştırmışlardır. %27 O₂ zenginleştirilmesi ile CH₄ emisyonları %35 azalmıştır.

Bazı araştırmacılar ise, doğalgaz veya metan gaz yakıtını, motorin yakıtı ile beraber çift yakıt olarak kullanmışlardır. Aroonsrisopon ve diğerleri [61], 4 stroklu, doğal emişli, common rail direkt püskürtme sistemli bir Ricardo Hydra dizel motorda, doğalgaz yakıtını pilot dizel püskürtme ile tutuşturmuştur. Çalışmada, gönderilen doğalgaz yakıt enerji içeriği olarak %70'ini oluşturmakla beraber, yapılan çalışmada tek kademeli ve 2 kademeli pilot dizel püskürtme ve çeşitli püskürtme avansının yanma karakteristiği ve emisyonlar üzerine etkisi incelenmiştir. 2 kademeli püskürtme motor gürültüsü açısından bir avantaja sahipken, tek kademeli püskürtme ise CO emisyonları açısından bir avantaja sahiptir. Liu ve diğerleri [26], 6 silindirli, turboşarjlı, common rail yakıt sistemli bir direkt püskürtmeli motorda, bir karıştırıcı ile CNG'yi emme manifolduna yollarken, pilot dizel püskürtme ile tutuşmayı sağlamıştır. ESC çevriminin 3 ayrı hızında ve %50, 75 ve 100 yük kademelerinde, 3 farklı dizel püskürtme avansı ve dizel miktarı araştırılmıştır. CO emisyonları CNG'nin motorda kullanılması ile artış göstermiştir. NO_x emisyonlarında ise en uygun dizel püskürtme avansı miktarı ile dizel yakıtına göre %30'a varan azalma sağlanmıştır.

Bazı araştırmacılar ise, çok düşük enerji içeriği olarak pilot motorin (toplam yakıtın %1'i ila %5'i arası) püskürtmüşler ve bu yöntemi mikro dizel püskürtme olarak adlandırmışlardır. Umierski ve Stommel [30], 6 silindirli, 4 stroklu, turboşarjlı, common rail yakıt sistemli bir prototip direkt püskürtmeli dizel motorda, metan (CH₄) gazının

mikro dizel pilot püskürtme yöntemi ile tutuşturulması üzerine çalışmışlardır. Bir kompresör yardımıyla manifolddan CH_4 gönderilirken, common rail enjektör sistemi ise direkt dizel püskürtme amacı ile kullanılmıştır. Gönderilen dizel miktarı, toplam yakıtın enerji değerinin %1-5 arası oldukça küçük değerine eşdeğer olduğu için, yöntemle mikro dizel pilot püskürtme yöntemi denilmiştir. Neredeyse hiç is emisyonu açığa çıkmazken, NO_x emisyonlarında da ciddi miktarda düşüş gözlemlenmiştir.

Bazı araştırmacılar ise, metan-motorin çift yakıtı ile çalışan bir motorda, erken pilot dizel püskürtme yönteminin ve EGR'nin yanma karakteristiği ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Tomita ve diğerleri, tek silindirli, 4 stroklu, su soğutmalı, direkt püskürtmeli dizel bir motorda, ateşleme için silindirlere dizel göndererek, emme kanalına ise metan göndererek çift yakıtla dizel motoru çalıştırmıştır. Dizel püskürtme avansı ÜÖN'dan 50oKMA öncesi ile ÜÖN arasında değiştirilmiş ve özellikle erken pilot dizel püskürtme yönteminin ve EGR'nin yanma karakteristiği ve emisyonlar üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Egzoz emisyonlarında ise, is emisyonları neredeyse tüm püskürtme avansında 0'a yakinken, ÜÖN'dan 10oKMA önceden, 50oKMA önceye doğru gidildikçe, NO_x emisyonlarında artış, CO ve HC emisyonlarında ise düşüş gözlemlenmiştir. Bazı araştırmacılar ise, metan-motorin çift yakıtını HCCI, PCCI gibi farklı seyir çevrimleri ile kullanmışlardır. Königsson ve diğerleri tek silindirli [29], 4 stroklu, common rail enjektör sistemine sahip direkt püskürtmeli bir motoru CH_4 ve dizel yakıtları ile çalıştırmışlardır. Yapılan çalışmalarda 3 ayrı yöntem kullanmışlardır. Bunlar: 1)Fümigasyon yöntemi ve pilot motorin püskürtme, 2)HCCI yöntemi, 3)PCCI yöntemidir. HCCI ve PCCI yöntemlerinde ise, HC ve CO dual yakıt moduna göre oldukça düşmüştür. PCCI modda CO ve HC emisyonları HCCI'dan nispeten daha yüksektir. Ayrıca, NO_x emisyonları da yine PCCI modda nispeten yüksektir. Garg ve diğerleri[8], tek silindirli, 4 stroklu, direkt püskürtmeli bir dizel motorda, homojen dolgu sıkıştırılmalı ateşleme yöntemi ile metan ve dizel yakıtını dual modda çalıştırmışlardır. HCCI yönteminde, metan emme manifolduna yerleştirilen bir ventüriden gönderilirken, çok az bir miktar dizel sıkıştırma sırasında silindir içerisine direkt olarak püskürtülmüş, ayrıca ÜÖN'ya yakın bir yerde silindir içerisine pilot dizel püskürtülerek asıl tutuşma sağlanmıştır. En yüksek termik verim CNG-HCCI'da açığa çıkarken, NO_x emisyonları açısından ise en düşük değer su püskürtmeli CNG-HCCI'da açığa çıkmıştır.

Bazı araştırmacılar ise, metan gazını hidrojenle zenginleştirerek, pilot motorin püskürtme yöntemi ile motor performansı ve emisyonlara etkisini incelemiştir. Zhou ve arkadaşları [9], 4 stroklu, 4 silindirli, doğal emişli, Isuzu marka bir dizel motorda, H_2 , CH_4 ve H_2-CH_4 gaz karışımlarının dual modda pilot dizel püskürtme yöntemi ile çalıştırılması yöntemi incelenmiştir. Gaz yakıt olarak CH_4 , H_2 , hacimce %30 H_2 %70 CH_4 , %50 H_2 %70 CH_4 ve %70 H_2 %30 CH_4 kullanılmıştır. H_2-CH_4 karışımındaki CH_4 miktarının artması ile özellikle yüksek yüklerde NOx artışı azalmıştır ancak yine de yalnız dizel ile işletme koşulunun üzerindedir. Is partikülü emisyonlarında ise, tüm gaz ve gaz karışımlarının dual modda kullanılmasıyla ve neredeyse tüm yük koşullarında ciddi miktarda iyileşme gözlemlenmiştir.

Bazı araştırmacılar ise, CH_4-H_2 gaz karışımını direkt gaz püskürtme yöntemi ile doğrudan silindir içerisine göndermişler ve pilot motorin püskürtme ile tutuşmayı sağlamışlardır. McTaggart-Cowan ve diğerleri [5], Cummins marka, 6 silindirli, 4 stroklu, direkt püskürtmeli bir motorda pilot dizel püskürtme yöntemi ile CH_4-H_2 gaz karışımının tutuşturulmasını incelemiştir. Westport yüksek basınçlı gaz enjektörü ile CH_4-H_2 gaz karışımını, sıkıştırma stroku sonlarına doğru silindir içerisine direkt gaz püskürtme yöntemi ile göndermişlerdir. Gaz karışımındaki H_2 oranı arttıkça, tutuşma gecikmesi süresinin kısaldığı (%20 oranında düşüş) ve is emisyonlarının ise iyileştiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlardan, biyogazın veya doğalgazın dizel motorlarda kullanımı ile motor performansı, emisyonlar ve yanma karakteristiği açısından avantaja sahip olduğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı, ilk olarak tek silindirli dizel bir motor, gerekli modifikasyonlar yapılarak biyogaz/doğalgaz ile çalışacak hale getirilerek, mevcut sistemin yanma karakteristiği açısından daha detaylı olarak incelenmesi hedeflenmiştir. Doğalgazın yaygın kullanımı, erişilebilirliği, ekonomik ve yaygın kullanılan bir yakıt olması sebebiyle ve biyogazın ülkelerin kendi imkânları ile elde edebilecekleri alternatif bir yakıt olması sebebiyle, dizel motorlarda pilot motorin püskürtme yöntemi ile birlikte kullanılmasının incelenmesi hedeflenmiştir. Motorda kullanılacak, kendi imkânlarımızla kullanılan EKÜ geliştirilerek, elektronik kontrollü dizel enjektörlerin pilot motorin püskürtme miktarını kontrolü ve biyogaz/doğalgazı yakıtının gaz enjektörleri ile emme manifolduna püskürtülmesi (fümigasyon yöntemi) gerçekleştirilecektir. Ayrıca, silindir içi basınç verilerinden yararlanılarak yanma karakteristiği incelenecektir.

Papagiannakis vd. [62] yapmış oldukları çalışmada, doğrudan enjeksiyonlu tek silindirli bir dizel motorunda farklı oranlarda çift yakıt (dizel ve %98 metan içeren doğalgaz) kullanılarak farklı hava-yakıt oranında, yüklerde, hızlarda testler yapıp emisyon gazları üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Kullanılan ek yakıt oranı artırıldığında, hava fazlalık katsayısı düştüğünden yapılan deneylerde termik veriminin azaldığı görülmektedir. Kullanılan doğalgazın oranı artırıldıkça NO ve is oluşumu azalırken, CO ve yanmamış HC değerlerinde artış görülmektedir. Düşük devir ve yüklerde dizel yakıt ile çift yakıt kullanımında, emisyon değerleri arasındaki farkın çok daha fazla olduğu gözlemlenirken, yüksek yük ve devirlerde ve stokiometriye yakın çalışma koşullarında bu fark daha az olmaktadır. Tüm bulgular dikkate alındığında, motorin yakıtı için bir takviye olarak doğalgaz kullanan çift yakıtlı yanmanın, mevcut direkt püskürtmeli dizel motorlarda hem NO emisyonunun, hem de isin kontrol edilmesi için umut verici bir teknik olduğu ortaya çıkmaktadır.

Hernandez vd. [63] tek silindirli bir dizel motorunda yapılan çalışmada H₂, CH₄ ve CO gazlarının dizel yakıt ile karıştırılıp tek yakıt olarak kullanıldığında emisyon miktarları ve motorun veriminin değişimi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda indike termik verim ve yanma verimi tüm yakıt tiplerinde düşüş göstermiştir. NO_x, HC, CO, PM ve is oluşumuna en olumlu etkiyi gösteren H₂ yakıtının karışımı olduğu görülmektedir. CH₄ kullanıldığında PM, NO_x ve is miktarında düşüş görülürken, yakıtta kullanılan CO oranının artmasıyla CO, NO_x miktarlarının arttığı görülmektedir. Yüksek motor devri, EGR'nin kullanımı ve emme havasının sıcaklığının arttırılmasının genel olarak emisyon değerlerinde iyileşme sağladığı görülmektedir.

Wang vd. (64) yaptıkları çalışmada, çift yakıt olarak çalışan bir dizel motorun işletmesinde pilot dizel püskürtme yönteminin, yanma ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deney sırasında pilot dizel ve CNG'nin sabit bir akış oranı ile üst ölü noktadan 5 ila 55° KMA arasında değişen çeşitli dizel enjeksiyon zamanlaması ile ayrıntılı bir inceleme yapılmıştır. Çift fazlı motorin püskürtme yapıldığında, motor performansı, yanma ve emisyon özellikleri daha iyidir. Çift fazlı motorin püskürtmede, termik verim ve THC emisyonları hemen hemen değişmeden kalırken, NO_x emisyonu dizel enjeksiyon avansının düşürülmesi ile azalır. Fakat çok erken motorin püskürtülmesi, silindirin sıcaklığı düşük olduğunda dizel çarpmasına ve zayıf

atomizasyon kalitesine yol açacaktır. Çift yakıt modunda, iki fazlı motorin püskürtmede, en iyi sonucu, pilot motorin püskürtme avansı, üst ölü noktadan 42.5° KMA öncede sabitlendiğinde termik verimin % 35, NOx 60 ppm ve THC % 0.4 hacim değerleri ile elde edilebilir.

Li vd. (65) doğalgaz ve dizel yakıtın birlikte kullanılarak, ağır ticari taşıtlar için kullanılan (heavy-duty) dizel motorunda yapılan çalışmada, farklı yakıt eşdeğerlik oranlarında yanma, termik verim ve egzoz gazı emisyonları araştırılmıştır. Yanma sırasında yakıt eşdeğerlik oranı değişiminin, silindir içi sıcaklık ve basınca etkisi oldukça karmaşık olduğu geçtikten sonra üst ölü noktadan çok uzaklaşmakta, oran 0,90 civarındayken ise pik basınç görülmemektedir. Termik verim, oran 0,65 ile 0,75 arasına kadar artıp daha sonra azalmaya başlamaktadır. Verimin en yüksek olduğu bu aralıktaki değeri 0,28 civarı olduğu görülmektedir. Emisyonlara bakıldığında oran arttıkça THC emisyonları belirgin bir şekilde azalırken NOx emisyonunun önce artıp, oran 0,75'i geçtikten sonra düşüşe geçtiği görülmektedir.

Shan vd. (66) yapmış oldukları çalışmada, H₂ ve CO içeriği farklı oranlarda olan iki tip dizel/biyogaz karışımı kullanılarak direkt püskürtmeli dizel motorda emisyon gazları ve termik verim üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucu EGR oranının artmasının silindir içi basıncını ve sıcaklığını genel olarak düşürdüğü ve yanma süresini uzattığı görülmektedir. CO, HC emisyonlarını ve isi arttırmasına rağmen NOx emisyonunda ciddi oranda azalma sağlamaktadır. H₂ oranı fazla olan biyogaz yakıtında silindir içi basınç ve sıcaklık diğer yakıta göre daha fazla olmaktadır. Bunun sebebi olarak bu yakıt kullanıldığında CO, HC emisyonları ve is daha az olurken, diğer yakıtta daha fazla çıkmaktadır. Ancak, NOx emisyonu H₂'nin daha az oranda olduğu yakıtta düşük silindir içi basınç ve sıcaklıktan dolayı çok daha azdır. Termik verime bakıldığında ise, verimin EGR artışıyla azaldığı, H₂ oranı yüksek yakıtta, diğerine göre daha yüksek değerler elde edildiği görülmektedir.

Yılmaz vd. (67) yapmış oldukları çalışmada, biyogaz ve termal bariyer kaplamanın bir dizel motorun yanma özellikleri ve egzoz emisyonları üzerindeki etkisini araştırmıştır. Pilot yakıt olarak her iki yakıtta da dizel kullanılmıştır. Biyogaz kullanıldığında daha yüksek basınç elde edilse de yalnızca is oluşumda iyileştirme sağlanmıştır. NOx ve HC emisyonlarının biyogaz kullanımında dizele göre daha fazla olduğu görülmektedir.

Termal bariyer kaplamada ise, yalıtımdan kaynaklı daha yüksek basınçlar ve sıcaklıklar elde edilmiştir ve bu da NO_x emisyonlarının artmasına neden olsa da diğer emisyonlarda ve yanma karakteristiğinde iyileşmeyi sağlamıştır. Deneysel sonuçlara dayanarak, biyogazın özellikle is emisyonlarının azaltılması konusunda dizel motorlar için bir yakıt olarak kullanılabileceği söylenebilir. Termal bariyer kaplama ve biyogaz kullanımıyla egzoz emisyonlarında ve yanma özelliklerinde önemli iyileştirmeler elde edilebilir.

Mansor vd. (68) yaptıkları çalışmada, hidrojen-metan karışımının farklı oranları ve dizel yakıtla farklı oranlarda gönderilmesinin dizel motordaki yanma karakteristiği ve emisyon değerleri üzerindeki etkisini CFD kullanarak ve nümerik olarak incelemiştir. Sonuçlara göre dizel oranı en düşük ve hidrojen oranı en yüksek olan yakıttaki silindir içi basınç ve sıcaklıklar en yüksek değerlerde, tutuşma gecikmesinin en düşük değerlerde olduğu görülmektedir. Emisyonlara bakıldığında hidrojen NO emisyonlarını olumsuz yönde etkilerken, metan oranının artması CO emisyonlarını olumsuz etkilemektedir. Hidrojen ve metanın birlikte kullanılmasının hem emisyonların dengeli olması, hem de hidrojenin yarattığı yüksek kontrolsüz yanmanın olumsuz etkilerini azaltmakta faydalı olacağı sonucuna varılmıştır.

Xu vd. [69] püskürtme avansının yanma performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisini altı silindirli, turbo şarjlı bir dizel motor üzerinde deneysel olarak araştırmıştır. Maksimum silindir basıncı, püskürtme avansının azalmasıyla artmakta ve pik basıncın oluşumunun üst ölü noktaya yaklaştığı görülmektedir. Bu durum, dizel püskürtme piston üst ölü noktaya gelmeden çok önce yapıldığı takdirde püskürtülen yakıtın yanma başlangıcına kadar enerjisinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Aynı şekilde püskürtme avansı arttığı zaman tutuşma gecikmesi de artmaktadır. Açığa çıkan ısının da silindir içi basınçla aynı değişim profilini izlediği görülmektedir. Püskürtme, motorda harcanan mekanik enerjinin azaltılmasında da etkilidir. Üst ölü noktadan 20 KMA öncesinde yapılan püskürtmeyle en düşük silindir içi ortalama indike basınç (IMEP) elde edilmektedir. Püskürtme avansı arttıkça pik basınçta olduğu gibi etki azalacak ve harcanan mekanik güç artacaktır. Silindir içi sıcaklığın ön püskürtmeyle aşırı yükselmesinden dolayı NO_x oluşumu önemli ölçüde artmaktadır. Püskürtme avansı üst ölü noktadan 70 KMA öncesi gibi yüksek değerlerde olduğunda NO_x emisyonunda

%30'luk bir düşüş elde etmişlerdir. HC ve CO emisyonları birbirleriyle aynı eğilimi takip ederken, NO_x emisyonlarıyla zıt olduğu görülmektedir. Çünkü, artan silindir içi sıcaklıklar HC ve CO oluşumunu azaltıcı etki oluşturmaktadır.

Mittal vd. (70) yaptıkları çalışmada, farklı çalışma koşullarında doğalgaz ile çift yakıtlı bir dizel motorun egzoz emisyon özelliklerini belirlemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dizel ve çift yakıt kullanımı sırasında farklı yüklerde hidrokarbon, karbon monoksit, azot oksit, kurum, partikül madde ve karbon dioksit değerleri ölçülmüştür. NO_x emisyonlarının çift yakıtlı çalışmada tüm işletme yüklerinde dizel yakıtla kıyasla azaltıldığı görülmektedir. Daha yüksek yüklerde, çift yakıtlı çalışmanın NO_x azaltılmasına etkisi, hafif veya orta yüklerde gözlemlenene kıyasla daha belirgin olmaktadır. HC ve CO emisyonları çift yakıt şartlarında tüm işletme yüklerinde artmıştır. Bununla birlikte, CO emisyon konsantrasyonu, oksidasyon katalizörü ile tüm işletme yüklerinde sifıra yakın seviyeye indirilmiştir. İS emisyonu miktarı çift yakıt şartında, yalnız dizel yakıtına kıyasla artmıştır. Karbon dioksit emisyonu, çift yakıtlı çalışmada dizele oranla azalmaktadır.

Zhang vd. (71) gerçekleştirdikleri çalışma, pilot ateşlemeyle çift yakıt modunda çalıştırılan direkt püskürtmeli dizel motorda, püskürtme parametrelerinin yanma ve emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişler. İki farklı motor hızıyla çalışma koşulları ayarlanmış ve motorin püskürtme avansı incelenmiştir. Üst ölü noktaya 19 KMA önce yapılan püskürtme ve yüksek devirde en yüksek pik basınç elde edilmektedir, enjeksiyon üst ölü noktaya yakın zamanlamayla yapıldığında ise açığa çıkan ısının arttığı görülmektedir ancak pik basınç üst ölü noktadan sonrasına kaymaktadır ve tutuşma gecikmesi ve art yanma süresi artmaktadır. THC emisyonuna bakıldığında, yüksek devirlerde daha fazla olduğu görülmektedir. Enjeksiyon başlangıcı üst ölü noktaya yakınlığı zaman THC emisyonları, yanma süresi arttığı için düşürülebilmektedir. CO emisyonlarının püskürtme üst ölü noktadan erkene çekildikçe arttığı görülmektedir. NO_x emisyonları ise püskürtme basıncı arttıkça, püskürtme avansı üst ölü noktadan uzaklaştıkça artmaktadır. Termik verim ve birim yakıt tüketimi püskürtme zamanı üst ölü noktadan uzaklaştıkça iyileşmektedir.

Kakaee vd. (72) gerçekleştirdikleri çalışmada, dizel motorda iki farklı metan oranına sahip doğalgaz/dizel karışımli yakıt kullanmış, farklı emme sıcaklıkları ve devirlere göre

yanma karakteri ve emisyonları incelemişlerdir. Silindir içi basınç ve sıcaklıkların metan oranı yüksek olan yakıtta daha fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle, bu yakıtın kullanımında NO_x emisyonu diğerine oranla oldukça fazla çıkmıştır. HC emisyonu ise silindir içi sıcaklığının artışıyla HC oksidasyonunun artmasından dolayı düşmektedir ve aynı nedenle metan oranı yüksek yakıtta daha düşük seviyelerdedir. Devir artışıyla tutuşma gecikmesinin artmasından dolayı ise HC emisyonu yükselmektedir. CO emisyonuna bakıldığında, yakıtların basınç ve sıcaklık karakterinin volümetrik verimi değiştirmesinden etkilenmekte, yüksek devirlerde ciddi oranlarda artmaktadır. Genellikle, verimlilik ve emisyon açısından, yüksek metan oranına sahip yakıtla daha yüksek motor devirlerinde çalışmaya uygundur.

Bora vd. (73) pilot yakıt olarak pirinç kepeğinden üretilmiş biyodizel kullanan, ve biyogaz/biyodizel dizel motorun farklı sıkıştırma oranları ve yüklerde performans, yanma ve emisyon karakterlerini inceleyen deneysel bir çalışma yapmıştır. Performans değerlerine bakıldığında, silindir içi basınç ve sıcaklıklarda dizel yakıt kullanımında daha yüksek değerler görülmektedir. Ayrıca tutuşma gecikmesi de dizel kullanımında daha düşüktür. Termik verim de yine dizel yakıt kullanımında daha yüksek çıkmaktadır. Emisyon değerlerine bakıldığında, biyodizel kullanıldığında ve sıkıştırma oranları değiştirildiğinde CO ve HC emisyonlarında sırasıyla %17.67 ve %17.18 oranında bir düşüş elde edilmektedir. Bununla birlikte, aynı sıkıştırma oranı değişimi için NO_x ve CO₂ emisyonunda sırasıyla %42,85 ve %14,43 oranında bir artış görülmektedir.

Zhang vd. (74) yapmış oldukları çalışmada, farklı yükler ve hızlar altında doğalgaz ve dizel yakıt karışımıyla çalışan dizel motorunda, yakıtın doğalgaz içeriği değiştirilerek analiz yapılmıştır. Düşük yüklerde, özgül yakıt tüketimi (BSFC) yakıttaki doğalgaz oranının artmasıyla önce artan, sonra azalan bir profil izlemekte iken, yüksek yüklerde kayda değer değişim görülmemiştir. Doğalgaz oranının artması, kısmi yüklerde HC ve CO emisyonunu artırırken, NO_x emisyonunu pek etkilememiştir. Yük artışıyla ise HC azalırken, CO ve NO_x emisyonları artmaktadır. İş oluşumunda ise doğalgaz oranı arttıkça dizel kullanımı azaldığından dolayı büyük oranda düşüş görülmüştür.

Yang vd. (75) çalışmalarında, kombine bir biyodizel ve metan kimyasal reaksiyon kinetiği mekanizması geliştirerek, CFD çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlar, her koşulda, metan yakıtının setan sayısının azalmasından ötürü, tutuşma gecikmesinin

metan yüzdesinin artması ile arttığını göstermiştir. Tam yük koşullarında, metan yüzdesi arttıkça, CH₄ yakıtının gaz yakıt olmasından ve homojene yakın olarak havayla karışım oluşturmamasından dolayı, çok hızlı yanabilir, sonuç olarak hem silindir basıncı hem de pik ısı açığa çıkış oranı artmaktadır. CO ve is emisyonları önemli ölçüde azaltılmaktadır. NO_x emisyonlarıyla belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Bunun nedeni, metanın yanmadan önce havayla tamamen karışmış bir gaz yakıtı olması ve bu arada motora daha az biyodizel enjekte edilmesi, daha az yakıtla zengin bölgelerin oluşması, daha düşük CH₄, CO ve kurum emisyonlarına neden olmasıdır. Ayrıca, daha homojen bir yanma ile pik sıcaklığı düşürdüğü için daha homojen bir sıcaklık dağılımı oluşur, NO_x emisyonları artmaz.

Yapılması hedeflenen çalışmayla, günümüzde emisyon regülasyonlarıyla birlikte, artan yanma sonrası iyileştirme sistemlerinin maliyetleri (özellikle katalizör malzeme ücretleri) ve dizel yakıtının da maliyetlerinin benzine yaklaşmasıyla, dizel motorlarda doğalgaz/biyogaz-motorin çift yakıtının kullanılmasının alternatif bir çözüm olarak en uygun emisyon ve özgül yakıt tüketimi şartlarında kullanılabilmesi açısından yanma karakteristiği incelenecektir.

1.2 Tezin Amacı

Günümüzde dizel motorlar gerek ulaşım, gerek tarım gerekse elektrik üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Ancak, giderek artan motorin fiyatları, aynı zamanda giderek ağırlaşan emisyon regülasyonlarından dolayı, alternatif yakıt arayışları sürmektedir. Doğalgazın çevreci, ekonomik ve yaygın ulaşılabilen bir yakıt olmasından dolayı, mevcut dizel motorların ufak modifikasyonlarla çift yakıt olarak pilot motorin püskürtme yöntemi ile kullanılması ve ayrıca, dizel motorlarda biyogazın aynı yöntemle doğalgazın yerine kullanılması hedeflenmiştir. Yapılması hedeflenen çalışmayla, günümüzde zorlayıcı emisyon regülasyonlarıyla birlikte, artan yanma sonrası iyileştirme sistemlerinin maliyetleri ve dizel yakıtının da maliyetlerinin benzine yaklaşmasıyla, dizel motorlarda doğalgazın alternatif bir çözüm olarak en uygun emisyon ve özgül yakıt tüketimi şartlarında kullanılabilmesi açısından yanma karakteristiği incelenecektir.

Yapılan çalışma, halihazırda kullanılan mevcut dizel motorların ufak modifikasyonlarla doğalgaz ve motorin çift yakıt modunda pilot püskürtme yöntemi ile çalıştırılabilmesi

açısından temel teşkil edecektir. Doğalgazın mevcut dizel motorlarda kullanılması ile, hem yakıt ekonomisi sağlanacak, hem de giderek artan emisyon regülasyonlarına ulaşmak mümkün olacak ve ayrıca içten yanmalı motorlarda giderek artan yanma sonrası iyileştirme sistemleri masraflarından kurtulunmuş olacaktır. Böylece, motorların dual modda çalıştırılması için bir model teşkil edecek ve en uygun püskürtme karakteristikleri belirlenebilecektir.

1.3 Hipotez

Günümüzde, literatürde dizel motorların doğalgaz-motorin çift yakıtı ile çalıştırılmasına yönelik çalışmalar olmasına rağmen, pratikte mevcut dizel motorların doğalgaza çevrilmesi üzerine çalışmaların sayısı azdır. Ayrıca, motor üretici firmaların motorin-doğalgaz çift yakıtlı dizel motora yönelik bir çalışmaları bulunmamaktadır. Bu sebepten dolayı, yapılacak olan çalışma, dizel motorların çift yakıt modunda doğalgaz-motorin yakıtına dönüştürülmesi için gerekli olan motor kalibrasyonu süreci için bir ön çalışma olacak ve özellikle en uygun motorin püskürtme karakteristikleri açısından temel oluşturacak ve en uygun püskürtme avanslarının ve gönderilen yakıt oranlarının belirlenmesinde, kalibrasyon süresini kısaltacak, en uygun şartlara ulaşmada yardımcı olacaktır.

Dizel motorlar gününüzde yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, yüksek miktarda NO_x ve is partikülü emisyonlarından dolayı dezavantaja sahiptirler. Giderek ağırlaşan emisyon regülasyonları yanma sonrası iyileştirme sistemlerinin maliyetlerini, dolayısıyla motorun maliyetlerini arttırmaktadır. Aynı zamanda, son yıllarda motorin fiyatlarındaki artış, araştırmacıları dizel motorlarda alternatif bir yakıt arayışına sevk etmektedir. Bu sebepten dolayı, hali hazırdaki mevcut motorlarda ufak modifikasyonlarla, dizel motorlar pilot motorin püskürtme yöntemi ile rahatlıkla doğalgaz-motorin çift yakıtıyla çalışacak şekilde modifiye edilebilirler. Bu sayede, hem yanma sonrası iyileştirme sistemlerinin masrafı hafifletilebilir, hem de yakıt ekonomisi sağlanabilir. Yapılacak olan testler ve teorik model ile, dizel motorların doğalgaz-motorin çift yakıtına dönüştürülmesinde, kalibrasyon süresi kısılacağı gibi, püskürtme karakteristikleri açısından en iyi koşullar seçilerek kalibrasyon için bir yol haritası çizilmiş olacak ve böylece emisyonlar ve yakıt ekonomisi iyileştirilebilecektir.

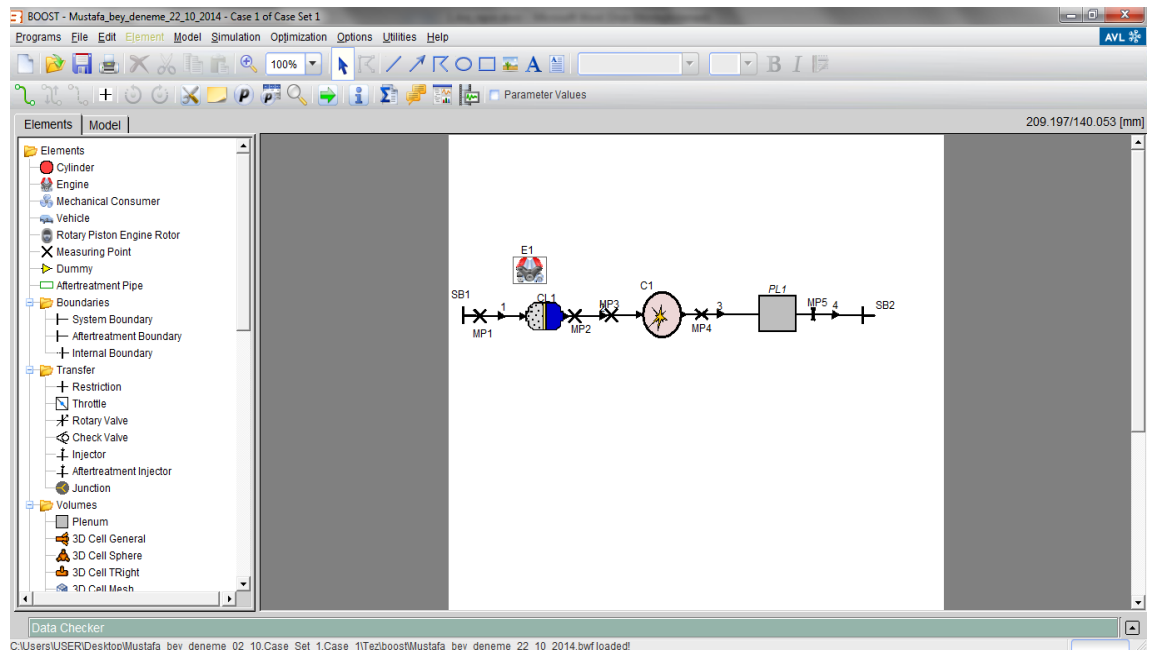
1.4 Yöntem

Yapılan çalışmada, dizel motoru emme kanalından metan ile beslenirken, tutuşma pilot dizel püskürtme ile gerçekleştirilmiştir. Motorun mekanik dizel enjektörü, elektronik bir dizel enjektörü ile değiştirilerek, dışarıdan geliştirilen bir elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmiştir. CNG amacıyla, yüksek basınç tüplü sıkıştırılmış doğalgaz kullanılmış, motorun emme kanalına LPG-CNG gaz enjektörü yerleştirilerek, yine aynı elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilmiştir. Çalışmanın diğer aşamalarında emme kanalından CO₂ gazı gönderilerek, biyogaz simüle edilmiş, motor performansı, emisyonlara etkisi incelenmiştir. Motorun, uygun bir dinamometre ile yüklenmesi ve belirlenen deney matrisi doğrultusunda, en uygun motor performansı ve emisyon değerlerini elde edilmiştir. Dizel motor, çift yakıt modunda (dual modda), pilot dizel püskürtme yöntemi ile doğalgaz (veya biyogaz) motorin yakıtları ile çalıştırılması yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, motor krankına bağlı olarak silindir içi basınç verileri toplanarak, motorun yanma karakteristiği incelenmiştir. Teorik olarak ise, motorun gönderilen metan miktarı, pilot dizel miktarı ve pilot dizel püskürtme avansına bağlı olarak bir model üzerinde çalışılmıştır. Daha sonradan, elde edilen deney sonuçları modele uyarlanarak yani motorun kendine özgü karakteristik değerleri modele uyarlanarak, motor haritası için en uygun püskürtme karakteristikleri belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

TEORİK MODELİN OLUŞTURULMASI

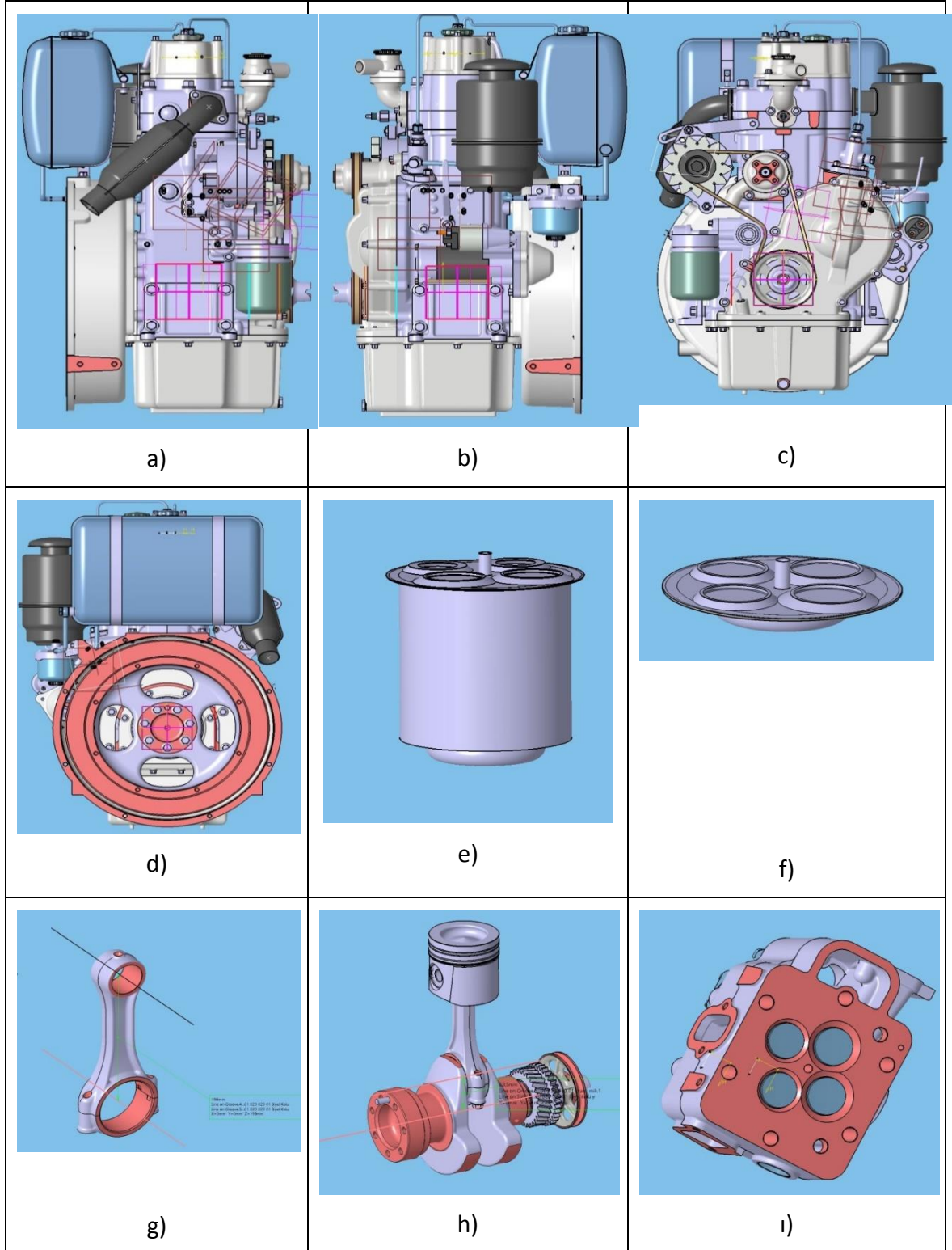
Teorik model oluşturulması için, öncelikli olarak aşağıda görüldüğü gibi motor ekipmanlarının parçaları, Catia V5 çizimlerinden yararlanarak bilgisayar ortamında ölçülmüş ve gerekli datalardan yararlanılmıştır. İlk olarak, AVL firmasının AST Boost 1-D programı kullanılarak modelleme çalışmaları yapılmıştır. Öncelikle, program kendi kütüphanesindeki örnekler çalışılmış, testlerin yapılacağı dizel motorun şematik modeli oluşturulmuştur(Şekil 2.1).

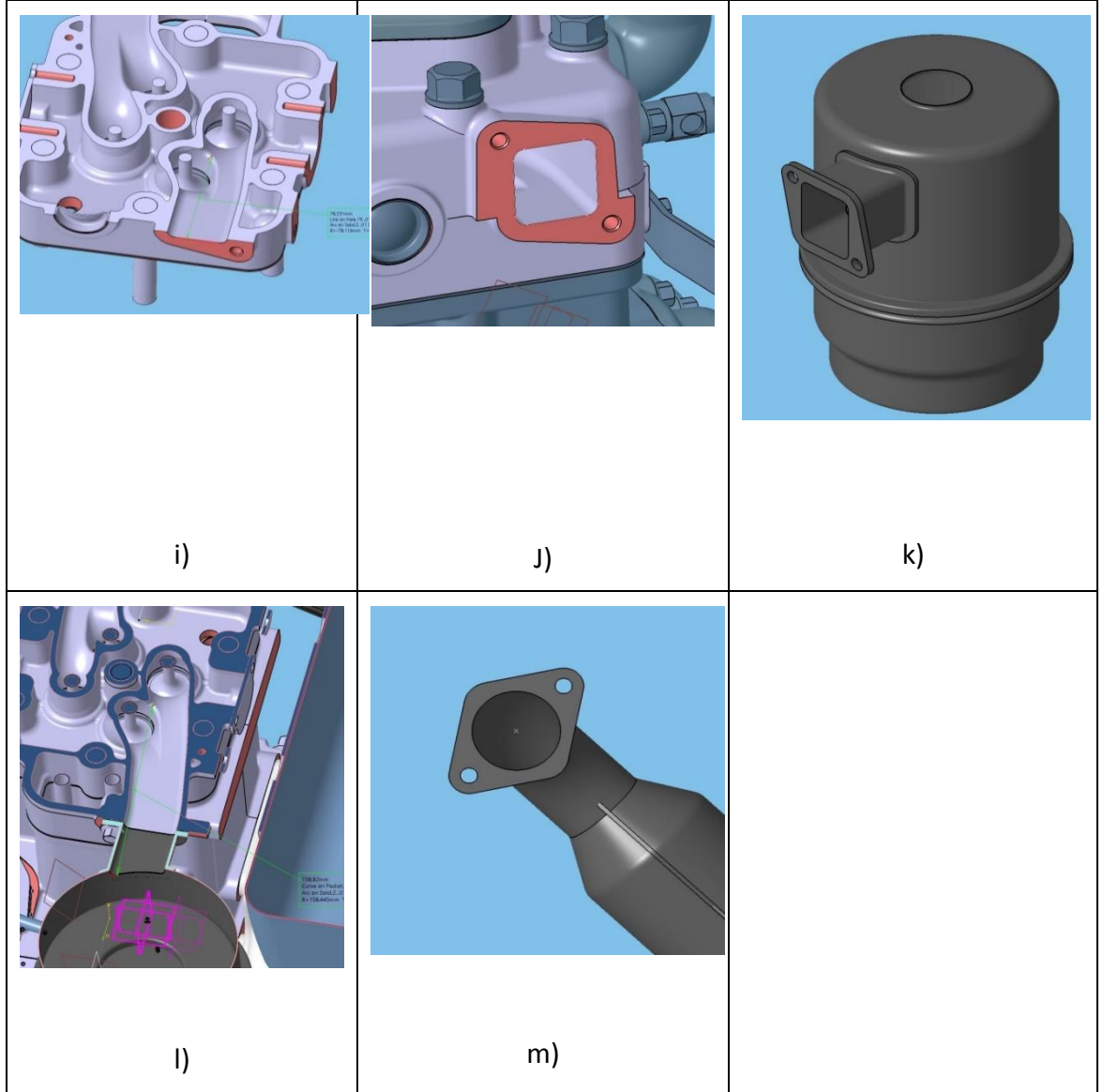


Şekil 2. 1 Motorun Boost Programındaki Motorun 1-D Modeli

Boost 1-D programına, motorun Catia V5 programı çizimlerinden yararlanarak, gerekli olan ölçüler ve parametreler girilmiştir.

Motorin-doğalgaz çift yakıtı ile yapılan çalışmalarda, model üzerine emme manifolduna bir enjektör yerleştirilerek, birim çevrimde püskürtülen metan gazı miktarı girilmiştir. Böylece, motor çift yakıt modunda da test edilmiştir.



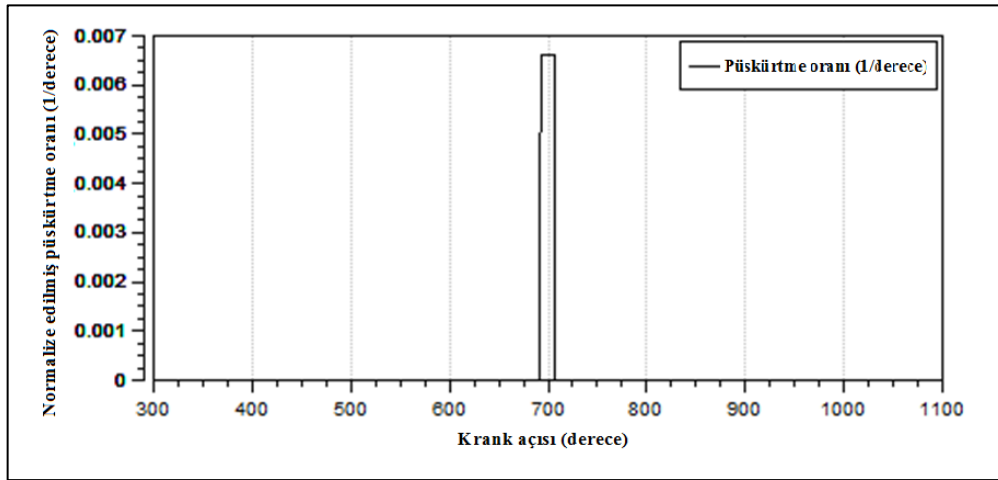


Şekil 2. 2 Deney motorunun 3 boyutlu çizimleri

2.1 Deneyisel Verilerin Teorik Modele Uygulanması

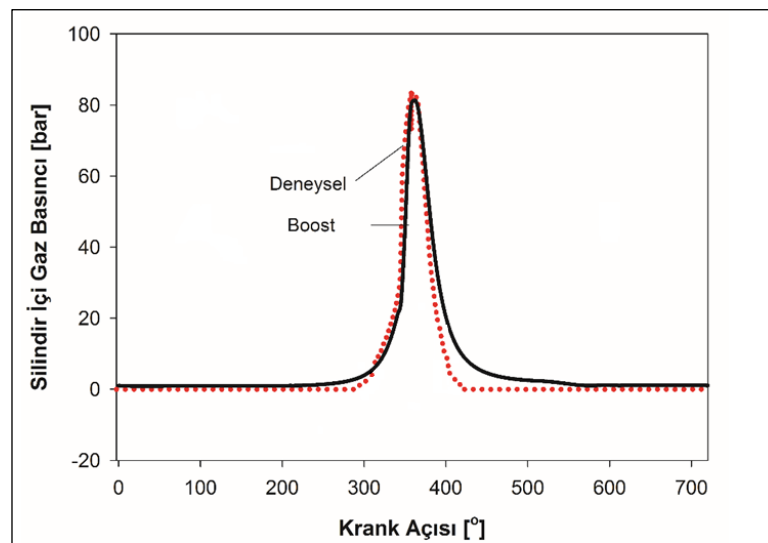
Şekil 2.3'te, 1-D (tek boyutlu) Boost programında geliştirilen motorun teorik modelinin şematik gösterimi verilmiştir. Şematik gösterimi verilen elemanların özellikleri detaylı olarak ve elde edilen deneyisel verilere (dizel ve gaz enjektörü verileri vs.) ve motorun teknik çizimlerine bağlı olarak oluşturulmuştur.

(boyutsuz) dizel enjektörünün püskürtme karakteristiği elde edilerek, teorik modele veri olarak girilmiştir.



Şekil 2. 5 Boost programında çift yakıtlı motorun enjektör püskürtme karakteristiği grafiği

Şekil 2.6'da görüleceği üzere, deneysel olarak ve Boost programı ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Alternatif olarak, Boost programına, deneysel olarak elde edilen normalize edilmiş (boyutsuz) ısı açığa çıkış oranları, programa gönderilen yakıt miktarı ile birlikte girilerek, elde edilen modelde kullanılabilmektedir. Ancak, gerçekleştirilen çalışmalarda, normalize edilmiş enjektör püskürtme karakteristiği grafikleri girilmiştir.

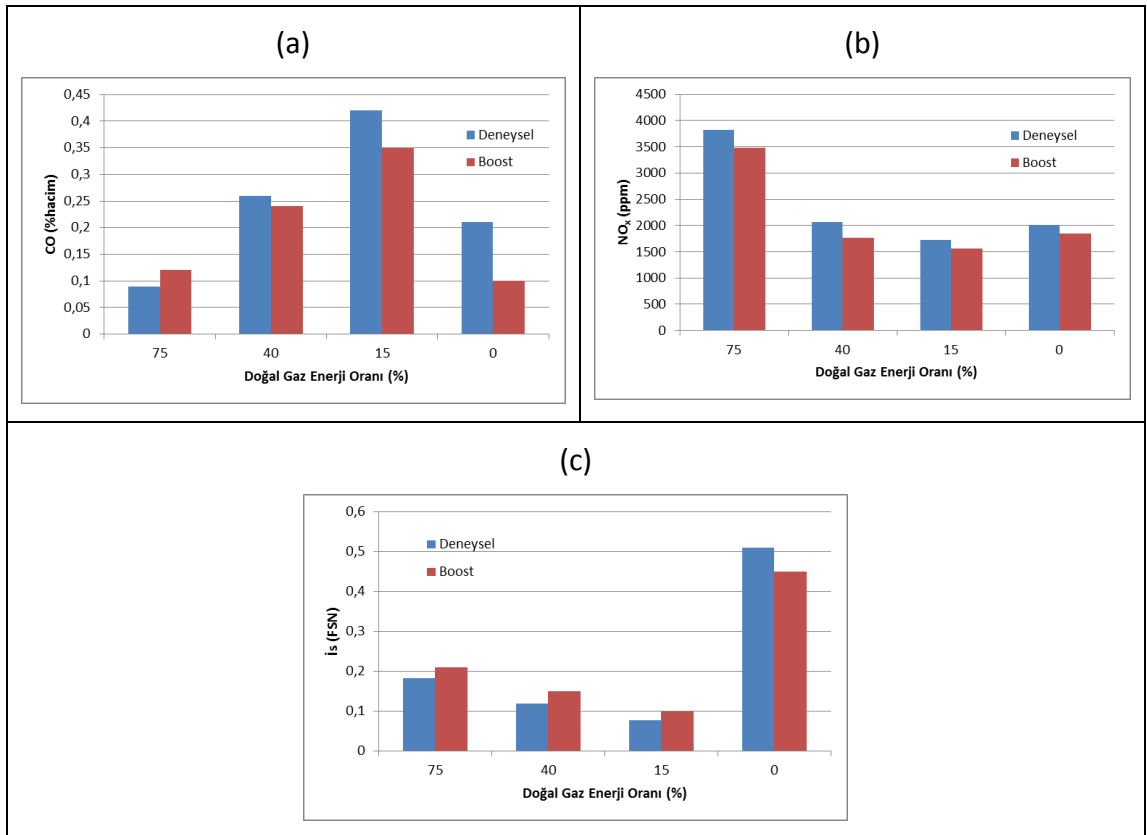


Şekil 2. 6 AVL MCC modelinde elde edilen basınç datasıyla, deneysel olarak elde edilen basınç datasının karşılaştırılması

2.2 Elde Edilen Teorik Sonuçlar

2.2.1 1500 d/d Motor Hızı 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçlarının Boost Programı ile Karşılaştırılması

Şekil 2.7’de 1500 d/d motor hızında, 1.5 ms motorin püskürtme şartında farklı enerji içeriklerindeki (%0, %15, %40 ve %75) doğalgaz – motorin çift yakıtının, CO, NO_x ve is emisyonları için elde edilen deneysel sonuçların ve teorik modelin karşılaştırılması sonuçları verilmiştir.

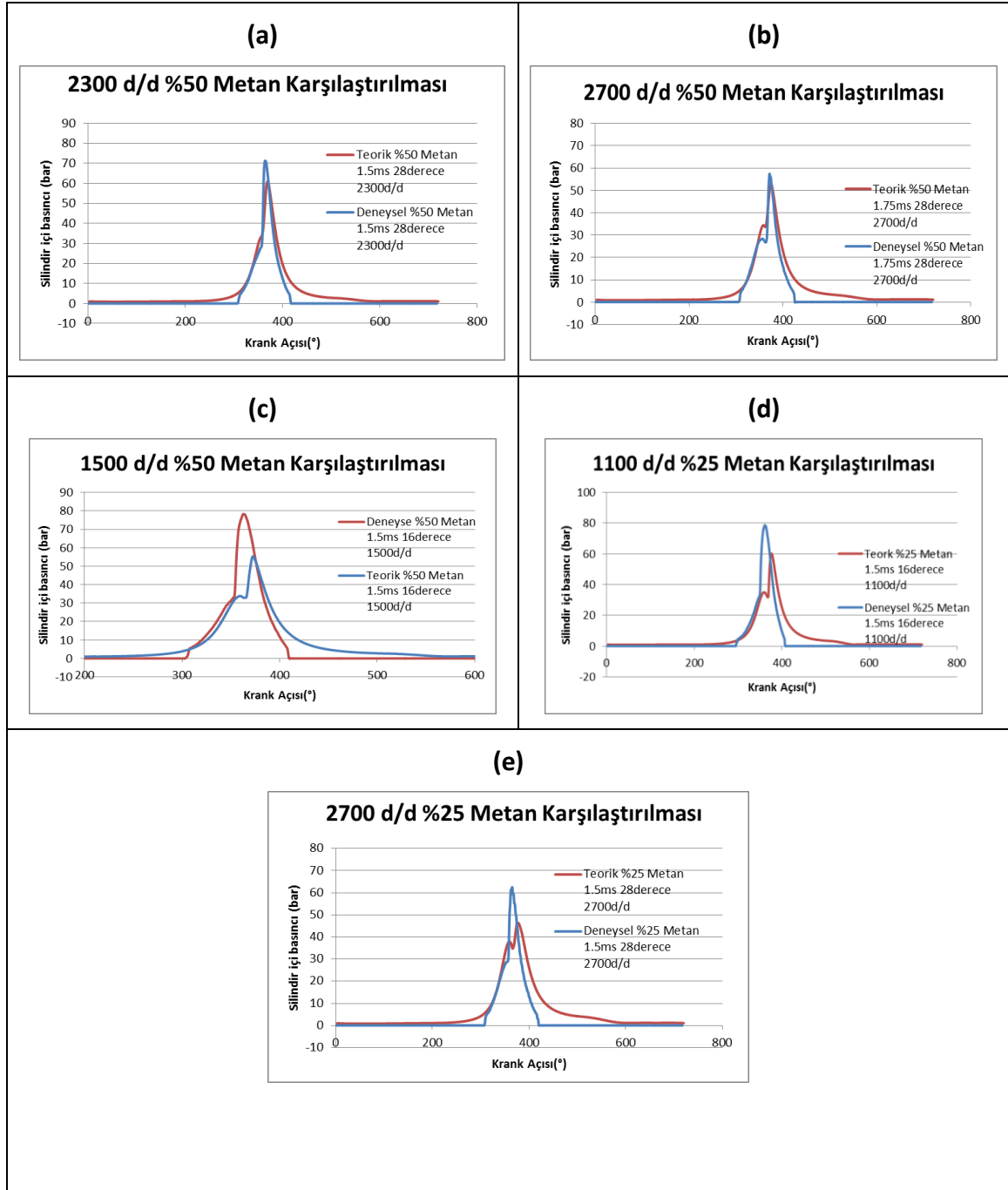


Şekil 2. 7 Deneysel ve boost programı ile elde edilen CO,NO_x, Is değerlerinin karşılaştırılması

2.2.2 Motorin ve Motorin + Metan Yakıtları ile Elde Edilen Teorik ve Deneysel Basınç Datalarının Karşılaştırılması

Boost programıyla elde edilen silindir içi gaz basıncı değerleri ile motor üzerinden basınç sensörü ile ölçüm gerçekleştirilerek, krank açısına bağlı olarak elde edilen silindir içi gaz basıncı sonuçları Şekil 2.8’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan grafiklerden de

görülebileceği üzere, çift yakıt modunda Boost programıyla elde edilen sonuçlarda, deneysel olarak elde edilen sonuçlara göre farkın daha fazla olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, yalnız motorin yakıtı için Boost programı ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneysel sonuçlar ile arasındaki farkın daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 2. 8 Deneysel olarak ve de Boost programı ile elde edilen teorik sonuçların karşılaştırılması

2.3 Boost Programının Teorik Verileri

Boost programı, gaz sabitlerine ve de gazın sıcaklık, basınç ve gaz kompozisyonlarına göre ısı kapasitelerini her bir iterasyon için, anlık gaz kompozisyonuna göre her bir zaman adımında hesaplamaktadır [76]. Boost programında gaz türleri için ya gaz özellikleri kullanıcı tarafından tanımlanır, yada tekil gaz türlerinden yola çıkılarak hesaplanır [76].

2.3.1 Tekil Gaz Özellikleri

İdeal gaz yaklaşımı ile sabit basınçta özgül ısılar [76, 77] NASA polinom uydurma yöntemi ile

$$\frac{c_{pk}}{R} = \sum_{m=1}^M a_{mk} T^{(m-1)} \quad (2.1)$$

Standart halde entalpi ise,

$$\frac{H_k}{RT} = \sum_{m=1}^M \frac{a_{mk} T^{(m-1)}}{m} + \frac{a_{M+1,k}}{T} \quad (2.2)$$

Standart halde entropi [76, 77] ise,

$$S_k = \int_0^T \frac{c_{pk}}{T} dT \quad (2.3)$$

yani,

$$\frac{S_k}{R} = a_{1k} \ln T + \sum_{m=2}^M \frac{a_{mk} T^{(m-1)}}{m-1} + a_{m+2,k} \quad (2.4)$$

denklemini ile hesaplanır.

2.3.2 Karışım Özellikleri

Gaz karışımlarının termodinamik özellikleri kütleli ağırlıklandırmalarına göre tekil gaz özelliklerinden yararlanılarak aşağıdaki denklemlerde de görüleceği üzere 7 adet katsayının belirlenmesiyle hesaplanır [76]:

$$\frac{c_{pk}}{R} = a_{1k} + a_{2k}T + a_{3k}T^2 + a_{4k}T^3 + a_{5k}T^4 \quad (2.5)$$

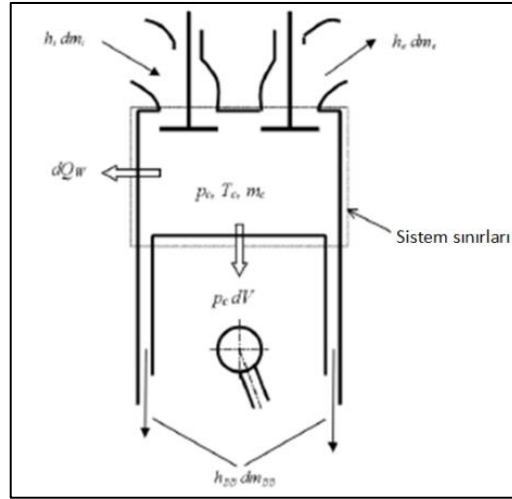
$$\frac{H_k}{RT} = a_{1k} + \frac{a_{2k}}{2}T + \frac{a_{3k}}{3}T^2 + \frac{a_{4k}}{4}T^3 + \frac{a_{5k}}{5}T^4 + \frac{a_{6k}}{T} \quad (2.6)$$

$$\frac{S_k}{R} = a_{1k} \ln T + a_{2k}T + \frac{a_{3k}}{2}T^2 + \frac{a_{4k}}{3}T^3 + \frac{a_{5k}}{4}T^4 + a_{7k} \quad (2.7)$$

Diğer tüm termodinamik birimler c_p , H ve S 'ten türetilmektedir [76].

Boost'un kendi kütüphanesinde O, O, OH, CO, CO₂, N, N₂, NO₂, NO₃, N₂O, NH₃, H, H₂, H₂O, SO, SO₂, SO₃, HCl, HCNO, benzin, hidrojen, metan, metanol, etanol, motorin, bütan, pentan, propan gibi yakıt ve gazlar tanımlıken, ayrıca kullanıcı ara yüzüne yakıt veya gaz tanımlamak da mümkündür [76].

2.3.3 Temel Korunum Denklemleri



Şekil 2. 9 Silindirdeki enerji dengesi [76]

Sistem sınırları denklemleri Şekil 2.9'da verilmiştir [76]. Termodinamiğin birinci kanununa göre termodinamik denklem;

Termodinamiğin birinci kanununa göre termodinamik denklem [76, 77];

$$\frac{d(m_c \cdot u)}{d\alpha} = -p_c \cdot \frac{dV}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} - h_{BB} \cdot \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} \cdot h - q_{ev} \cdot f \cdot \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (2.8)$$

Silindir içindeki kütleler giren ve çıkan kütlelerden hesaplanır [76, 77];

$$\frac{dm_c}{d\alpha} = \sum \frac{dm_i}{d\alpha} - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} - \frac{dm_{BB}}{d\alpha} + \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (2.9)$$

Termodinamiğin birinci kanununa göre silindir içerisindeki iç enerji değişimi piston işi, yakıt ısı girişi, cidar ısı kayıpları ve blow-by'dan kaynaklı entalpi akışının toplamına eşittir [76].

Gaz kompozisyonu yanma sebebiyle değişeceği için, iç ve dış karışımda farklı davranırlar [76].

İç karışım hazırlanmasında:

- silindir dolgusuna eklenen yakıtın aniden yandığı,
- yanma ürünlerinin aniden geri kalan silindir dolgusuyla karıştığı ve uniform karışım oluştuğu,
- sonuç olarak, hava/yakıt oranı yanmanın başlangıcında yüksek değerdeyken, sürekli azalarak yanmanın sonunda düşük bir değer aldığı kabul edilir [76].

Dış karışım hazırlanmasında:

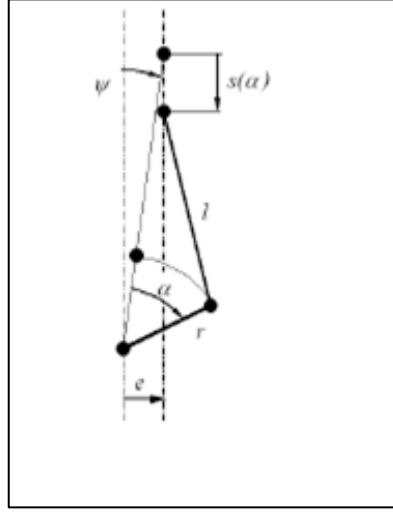
- yanmanın başlangıcında karışımın homojen olduğu,
- sonuç olarak hava/yakıt oranının yanma esnasında sabit olduğu,
- kompozisyonlar değişmesine rağmen, yanmış ve yanmamış dolguların aynı basınç ve sıcaklıkta olduğu kabul edilir [76].

Bu yüzden gaz denklemi [76, 77];

$$p_c = \frac{1}{V} \cdot m_c \cdot R_o \cdot T_c \quad (2.10)$$

olarak basınç, sıcaklık ve yoğunluk arasındaki ilişki Runge-Kutta yöntemi ile silindir içi sıcaklık hesaplanarak çözülür [76, 77]. Silindir sıcaklığı bilindiğinde, silindir içi gaz basıncı gaz denkleminde çıkarılabilir [76, 77].

2.3.3.1 Krank Açısı Hesabı



Şekil 2. 10 Standart krank açısı hesabı [76]

$$s = (r + l) \cdot \cos(\psi) - r \cdot \cos(\psi + \alpha) - l \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \cdot \sin(\psi + \alpha) - \frac{e}{l}\right)^2} \quad (2.11)$$

$$\psi = \arcsin\left(\frac{e}{r + l}\right) \quad (2.12)$$

bulunabilir [76, 77]

2.3.3.2 Silindir İçi Isı Transferi

Yanma odasının cidarlarına olan ısı transferi, örneğin silindir kafası, piston, kovan vs. aşağıdaki denklemle hesaplanır [76, 77].

$$Q_{wi} = A_i \cdot \alpha_w \cdot (T_c - T_{wi}) \quad (2.13)$$

Kovan cidar sıcaklığında ÜÖN ile AÖN arasındaki eksenel sıcaklık değişimi [76];

$$T_L = T_{L,TDC} \cdot \frac{1 - e^{-c \cdot x}}{x \cdot c} \quad (2.14)$$

$$c = \ln\left(\frac{T_{L,TDC}}{T_{L,BDC}}\right) \quad (2.15)$$

Isı transfer katsayısını hesaplamak için, Boost programında Woschni 1978, Woschni 1990, Hohenberg, Lorenz, AVL 2000 Model, Bargende modeller seçilebilmektedir [76].

2.3.3.3 Woschni Modeli

1978 yılında yayınlanan Woschni modeli yüksek basınçlı çevrimler için aşağıdaki gibidir [76, 77]:

$$\alpha_w = 130 \cdot D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \cdot \left[C_1 \cdot c_m + C_2 \cdot \frac{V_d \cdot T_{c,1}}{p_{c,1} \cdot V_{c,1}} \cdot (p_c - p_{c,o}) \right]^{0.8} \quad (2.16)$$

$$C_1 = 2.28 + 0.308 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (2.17)$$

Modifiye edilmiş Woschni ısı transferi denklemi 1990 yılında, özellikle kısmi yüklerde daha iyi bir tahmin elde edebilmek için yayınlanmıştır [76, 77]:

$$\alpha_w = 130 \cdot D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \cdot \left\{ c_1 \cdot c_m \cdot \left[1 + 2 \left(\frac{V_{TDC}}{V} \right)^2 \cdot IMEP^{-0.2} \right] \right\}^{0.8} \quad (2.18)$$

Aşağıdaki durumda;

$$C_2 \cdot \frac{V_d \cdot T_{c,1}}{p_{c,1} \cdot V} \cdot (p_c - p_{c,o}) \geq 2 \cdot C_1 \cdot c_m \cdot \left(\frac{V_{TDC}}{V} \right)^2 \cdot IMEP^{-0.2} \quad (2.19)$$

Isı transferi katsayısı 1978 yılındaki modele göre hesaplanır [76, 77].

Gaz değişimi prosesi için, her iki Woschni modelleri de aynı eşitliği kullanırken, ısı transfer katsayısı [76, 77];

$$\alpha_w = 130 \cdot D^{-0.2} \cdot p_c^{0.8} \cdot T_c^{-0.53} \cdot (C_3 \cdot c_m)^{0.8} \quad (2.20)$$

$$C_3 = 6.18 + 0.417 \cdot \frac{c_u}{c_m} \quad (2.21)$$

2.3.3.4 Blow By

Boost programı blow-by kayıplarını hesaplamak için, efektif blow-by boşluğunu ve de ortalama karter basıncını kullanır. Blow-by kütle akışı her bir zaman adımında orifis akış denkleminde göre hesaplanır [76, 77].

Silindir çapı ve efektif blow-by boşluğundan elde edilen efektif akış alanı [76, 77];

$$A_{eff} = D \cdot \pi \cdot \delta \quad (2.22)$$

Eğer silindir basıncı ortalama krank basıncını aşarsa, silindir basınç ve sıcaklığı sisteme giriş açısından durağan kabul edilir [76]. Ortalama krank basıncı sistem çıkışı statik basıncı simgeler [76]. Gaz özellikleri silindirden alınır [76].

Blow-by gazları, silindir içindeki ile aynı gaz özelliklerine sahiptir [76, 77].

2.3.3.5 Emme ve Egzoz Kanallarındaki Isı Transferi

Gaz alışveriş prosesi esnasında, emme ve egzoz kanalındaki ısı transferini de göz önünde bulundurmak hayati önem taşımaktadır [76, 77]. Isı transferi, valflerin bulunduğu bölgedeki yüksek ısı transfer katsayıları ve sıcaklıklar nedeniyle basit bir borudaki akışa göre daha yüksek olabilir [76, 77]. BOOST kodunda, modifiye edilmiş Zapf ısı transfer modeli kullanılmıştır [76, 77]:

$$T_d = (T_u - T_w) \cdot e^{\left(-A_w \frac{\alpha_p}{\dot{m} \cdot c_p}\right)} + T_w \quad (2.23)$$

α_p ısı transfer katsayısı akışın yönüne bağlıdır (silindirden içeri veya dışarı) [76]. Formül;

$$\alpha_p = [C_4 + C_5 \cdot T_u - C_6 \cdot T_u^2] \cdot T_u^{0.44} \cdot \dot{m}^{0.5} \cdot d_{vi}^{-1.5} \cdot \left[1 - 0.797 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (2.24)$$

dış akış için kullanılmaktadır ve formül;

$$\alpha_p = [C_7 + C_8 \cdot T_u - C_9 \cdot T_u^2] \cdot T^{0.33} \cdot \dot{m}^{0.68} \cdot d_{vi}^{-1.68} \cdot \left[1 - 0.765 \cdot \frac{h_v}{d_{vi}}\right] \quad (2.25)$$

iç akış için kullanılmaktadır [76].

2.4 Yanma Modelleri

2.4.1 Önceden Tanımlanmış Açığa Çıkan Isı

2.4.1.1 Vibe ve Tablo

Yanma prosesini modellemek için en basit yaklaşım açığa çıkan ısı oranının doğrudan tanımlanmasıdır. Belirli bir çalışma noktasında motorun açığa çıkan ısı oranı ölçülen silindir basınç geçmişinden belirlenmektedir [76]. Zıt yöne hareket eden yüksek basınç çevrim hesaplaması vasıtasıyla, örneğin $dT_c/d\alpha$ yerine $dQ_F/d\alpha$ eşitliğini çözerek krank açısına karşı açığa çıkan ısı elde edilebilir [76].

Bu yaklaşımı basitleştirmek için, krank açısı üzerinde sadece boyutsuz ısı giriş karakteristiği belirlenmelidir [76]. Hava/yakıt oranı ve silindir içerisindeki yakıt miktarından belirlenen çevrime sağlanan toplam ısıdan, BOOST mevcut ısı girişini derece krank açısı başına hesaplar [76].

Açığa çıkan ısı eğrisi oranının doğrudan girişi için, aşağıdaki seçenekler mevcuttur[76]:

2.4.1.2 Tablo

Krank açısına karşı referans noktaları belirlenerek açığa çıkan ısı eğrisine yaklaşılmaktadır [76]. Eğri altında bir alan elde etmek için y değerleri ölçeklendirilmektedir [76]. Belirlenen noktalar arasındaki değerler doğrusal enterpolasyonla elde edilmektedir [76].

2.4.1.3 Vibe Denklemi

Hareket fonksiyonu genellikle bir motorun mevcut açığa çıkan ısı karakteristiklerini yaklaştırmak için kullanılır [76, 77].

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m + 1) \cdot y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.26)$$

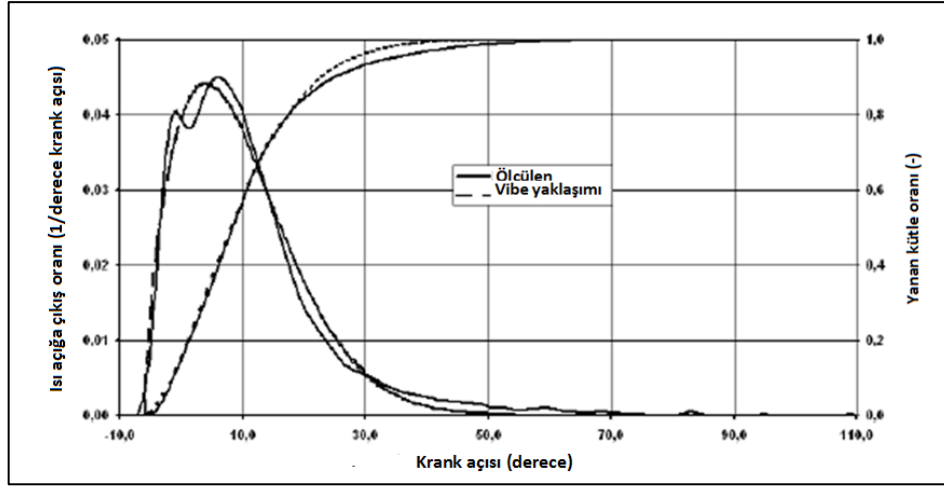
$$dx = \frac{dQ}{Q} \quad (2.2.36) \quad (2.27)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_0}{\Delta\alpha_c} \quad (2.2.37) \quad (2.28)$$

Hareket fonksiyonunun integrali yanmanın başından itibaren yanan yakıt kütlesinin oranını verir [76, 77].

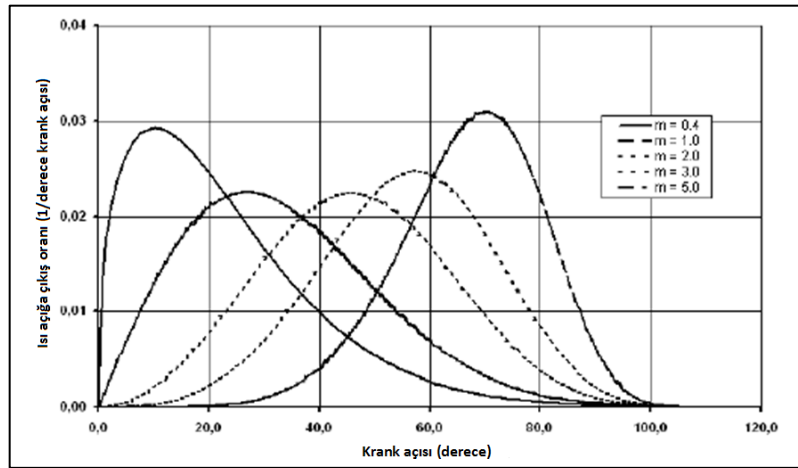
$$x = \int \frac{dx}{d\alpha} \cdot d\alpha = 1 - e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.29)$$

Şekil 2.11'de hareket fonksiyonuyla bir dizel motorun mevcut açığa çıkan ısı diyagramı yaklaşımını göstermektedir [76, 77]. Yanma başlangıcı, yanma süresi ve şekil parametresi ölçülen açığa çıkan ısı eğrisinin en küçük karesinden elde edilir [76].



Şekil 2. 11 Açığa çıkan ısı ölçümü yaklaşımı [76]

Şekil 2.12’de hareket şekil parametresi “m” nin hareket fonksiyonunun şekli üzerindeki etkisi gösterilmektedir [76].



Şekil 2. 12 Şekil parametresi “m” nin etkisi [76]

2.4.1.3 İki Bölge Denklemleri

Açığa çıkan ısı oranı ve buna bağlı olarak yanar kütle oranı yine bir hareket fonksiyonu tarafından belirlenmektedir [76]. Ancak, yanmış ve yanmamış dolguların aynı sıcaklığa sahip oldukları varsayımı düşünülmektedir. Yanmış ve yanmamış dolguya termodinamiğin birinci yasası uygulanmaktadır [76, 77].

$$\frac{dm_b u_b}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_b}{d\alpha} + \frac{dQ_F}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{Wb}}{d\alpha} + h_u \frac{dm_b}{d\alpha} - h_{BB,b} \frac{dm_{BB,b}}{d\alpha} \quad (2.30)$$

$$\frac{dm_u u_u}{d\alpha} = -p_c \frac{dV_u}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_{Wu}}{d\alpha} - h_u \frac{dm_B}{d\alpha} - h_{BB,bu} \frac{dm_{BB,u}}{d\alpha} \quad (2.31)$$

$hu \frac{dm_B}{d\alpha}$ ifadesi taze dolgunun yanma ürünlerine dönüşümüne bağlı olarak yanmamış alandan yanan alana entalpi akışını karşılamaktadır [76, 77]. İki alan arasındaki ısı akışı göz ardı edilmektedir [76].

Buna ek olarak, hacim değişimleri toplamı silindir hacmi değişimine eşit olmalıdır ve alanların hacimlerinin toplamı silindir hacmine eşit olmalıdır [76, 77].

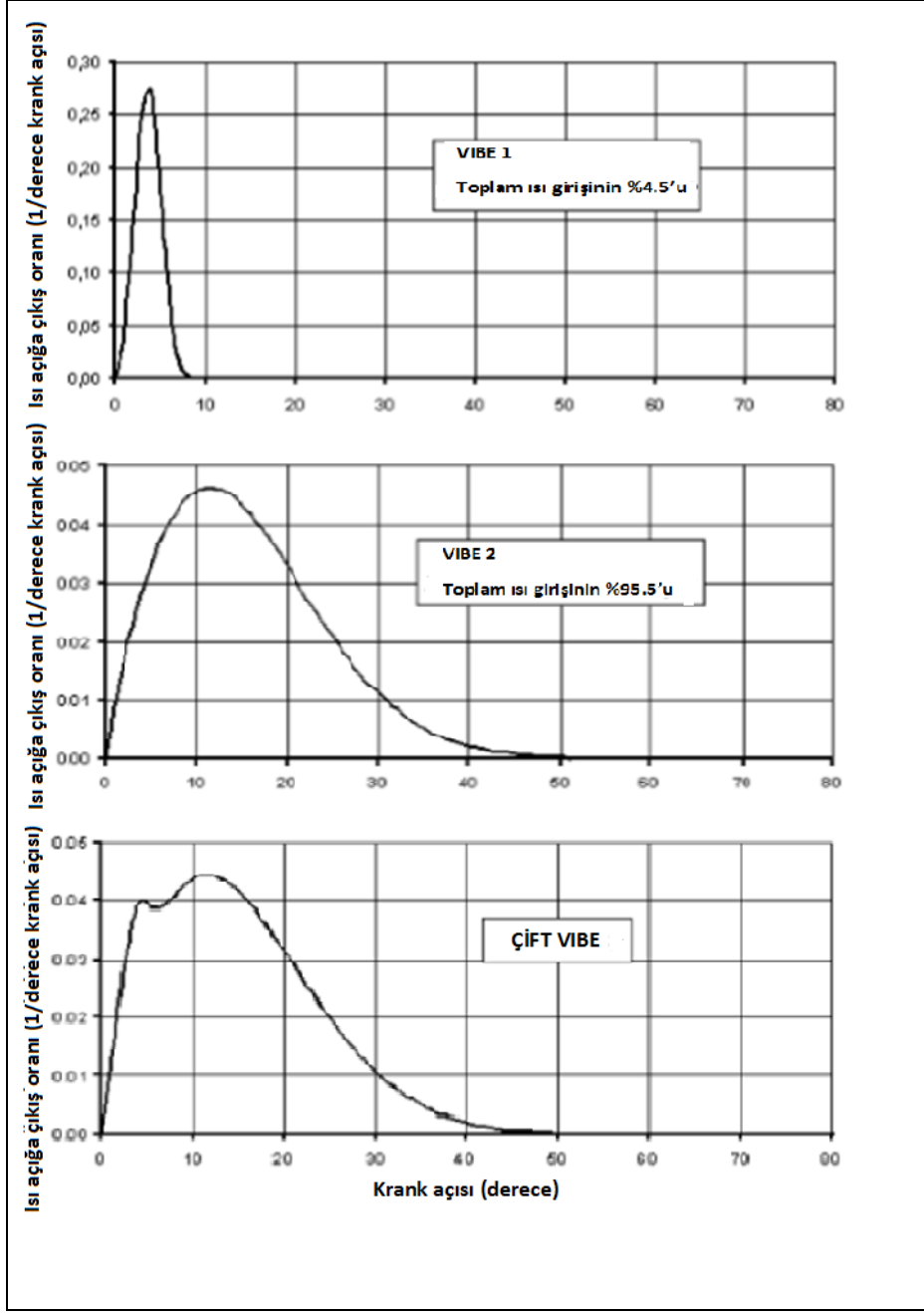
$$\frac{dV_b}{d\alpha} + \frac{dV_u}{d\alpha} = \frac{dV}{d\alpha} \quad (2.32)$$

$$V_b + V_u = V \quad (2.33)$$

Her aşamada yanan karışım miktarı kullanıcı tarafından tanımlanan hareket fonksiyonu ile elde edilmektedir [76]. Duvar ısı kayıpları gibi diğer tüm terimler için, iki alan üzerinde uygun bir dağılımla tek bölgeli modellere benzer modeller kullanılmaktadır [76].

2.4.1.4 Çift Vibe Fonksiyonu

İki hareket fonksiyonunun (çift hareket) süper pozisyonu dizel bir motorun ölçülen ısı karakteristiklerini yakınlaştırmak için kullanılır [76]. Bu durumda, iki hareket fonksiyonu tanımlanmaktadır, ilki ön karıştırılmalı yanmanın tepe noktasını modellemek, ikincisi ise difüzyon kontrollü yanmayı modellemek için kullanılır [76, 77]. Eğer her hareket fonksiyonunun yakıt dağılımı biliniyorsa, iki hareket fonksiyonundan elde edilen açığa çıkan ısı eklenebilir, böylece Şekil 41'deki gibi açığa çıkan ısı çift hareket elde edilir [76].



Şekil 2. 13 İki Hareket Fonksiyonunun Süper pozisyonu [76]

2.4.1.5 Tutuşma Gecikmesi

Tutuşma gecikmesi Arrhenius (radikal üretimi) ve Magnussen (türbülans etkisi) yaklaşımlarının birleştirilmesiyle modellenmektedir [76, 77]. Yanma aşağıdaki koşul gerçekleştikten sonra başlar [76, 77]:

$$A_{Id} \cdot \int_{IGN}^{SOC} \frac{1}{\frac{1}{r_{Ar}} + \frac{1}{r_{Mag}}} \cdot d\tau \geq 1 \quad (2.34)$$

$$r_{Ar} = A_{Ar} \cdot c_F^{-2.1} \cdot c_{O_2}^{1.7} \cdot \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{0.2} \cdot \exp\left(-\frac{3000}{T_c}\right) \quad (2.35)$$

$$r_{Mag} = A_{Mag} \cdot \frac{m_F \cdot \sqrt{k}}{\rho_0 \cdot V_c^{4/3}} \quad (2.36)$$

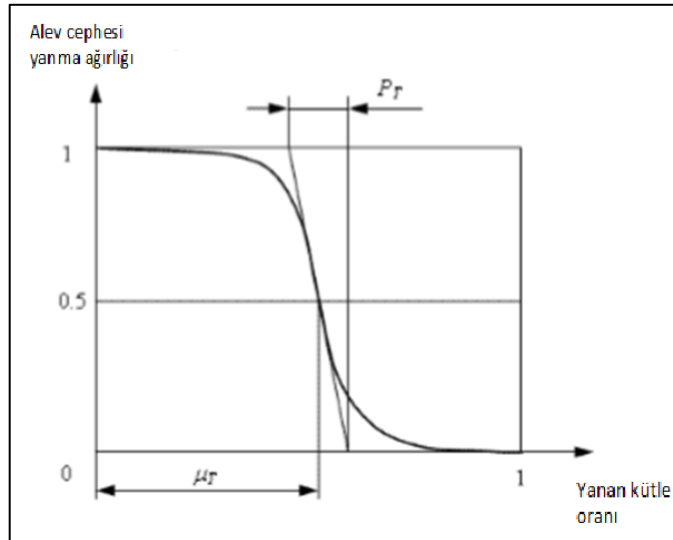
Laminar alev hızı v_{lam} Peters vd.'ne göre hesaplanmaktadır [76]. Saf metan için yakıt sabitleri aşağıdaki gibidir [76, 77]:

$$v_{lam} = 2.2 \cdot 10^{-2} \cdot \mu_F^{0.565175} \cdot \exp\left(-\frac{6.44427 \cdot 10^3}{T_f}\right) \cdot \frac{T_u}{T_f} \cdot \left(\frac{T_b - T_f}{T_b - T_u}\right)^{2.5158} \quad (2.37)$$

$$T_f = \frac{-23.873 \cdot 10^3}{\ln\left(\frac{p}{31.557 \cdot 10^{12}}\right)} \quad (2.38)$$

Şekil 2.14'te de görüleceği üzere, geç yanma fazında ortaya çıkan etkilerin göz önünde bulundurulması için, alev silindir duvarına ulaştığında uygun yakıt kütlesi için bir değişim uygulamaya konulmuştur [76, 77].

$$m_{F,av} = \gamma_{FC} \cdot m_{F,f} + (1 - \gamma_{FC}) \cdot m_{F,ub} \quad (2.39)$$



Şekil 2. 14 Alev ön yanma ağırlığı [76]

2.4.2 Dizel Motorlar için MCC 2 Bölge Yanma Modeli

BOOST doğrudan püskürtmeli dizel motorlarında yanma karakteristiklerinin tahmini için MCC modelini kullanmaktadır [76].

Model ön karışimli (PMC) ve difüzyon (MCC) kontrollü yanma proseslerinin etkilerini aşağıdaki formüle göre değerlendirir [76]:

$$\frac{dQ_{total}}{d\alpha} = \frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} + \frac{dQ_{PMC}}{d\alpha} \quad (2.40)$$

2.4.2.3 Karışım Kontrollü Yanma

Bu rejimde açığa çıkan ısı mevcut yakıt miktarının (f_1) ve türbülanslı kinetik enerji yoğunluğunun (f_2) bir fonksiyonudur [76]:

$$\frac{dQ_{MCC}}{d\alpha} = C_{comb} \cdot f_1(m_F, Q_{MCC}) \cdot f_2(k, V) \quad (2.41)$$

$$f_1(m_F, Q) = \left(m_F - \frac{Q_{MCC}}{LCV}\right) \cdot (w_{Oxygen,available})^{C_{EGR}} \quad (2.42)$$

$$f_2(k, V) = C_{Rate} \cdot \frac{\sqrt{k}}{\sqrt[3]{V}} \quad (2.43)$$

2.4.2.4 Tutuşma Gecikmesi Modeli

Tutuşma gecikmesi aşağıdaki diferansiyel denklem çözülerek Andree ve Pachernegg modelinin kullanılmasıyla hesaplanmaktadır [76, 77].

$$\frac{dI_{id}}{d\alpha} = \frac{T_{UB} - T_{ref}}{f_{id} \cdot Q_{ref}} \quad (2.44)$$

Tutuşma gecikmesi integrali I_{id} tutuşma gecikmesinde 1.0 değerine ($=\alpha_{id}$ 'de) ulaşır ulaşmaz $T_{id} = \alpha_{id} - \alpha_{SOI}$ formülüyle hesaplanmaktadır [76, 77].

2.4.3 Ön Karışimli Yanma Modeli

Ön karışimli yanmaya bağlı açığa çıkan mevcut ısıyı tarif etmek için bir hareket fonksiyonu kullanılmaktadır [76, 77].

$$\left(\frac{dQ_{PMC}}{Q_{PMC}}\right) = \frac{a}{\Delta\alpha_c} \cdot (m+1)y^m \cdot e^{-a \cdot y^{(m+1)}} \quad (2.45)$$

$$y = \frac{\alpha - \alpha_{id}}{\Delta\alpha_c} \quad (2.46)$$

Q_{PMC} ön karışimli yanma için toplam yakıt ısı girişi $= m_{fuel id} \cdot C_{PMC}$ [76].

2.4.3.3 Damlacık Kızışma ve Buharlaştırma Modeli

Sitkei'ye göre damlacık buharlaşması için denge sıcaklığı şu şekilde hesaplanabilir [76, 77]:

$$\lambda_c \cdot (T_c - T_d) = \frac{30.93 \cdot 10^4 \cdot \frac{T_d}{p_c}}{e^{\left(\frac{4150.0}{T_d}\right)} \cdot (20.0 + 0.26 \cdot (T_d - 273.15) + 0.3 \cdot (T_c - 273.15))} \quad (2.47)$$

Denge sıcaklığını kullanarak buharlaşma hızı şu şekilde bulunur [76, 77]:

$$v_e = 0.70353 \cdot \frac{T_d}{p_c \cdot e^{\left(\frac{4159.0}{T_d}\right)}} \quad (2.48)$$

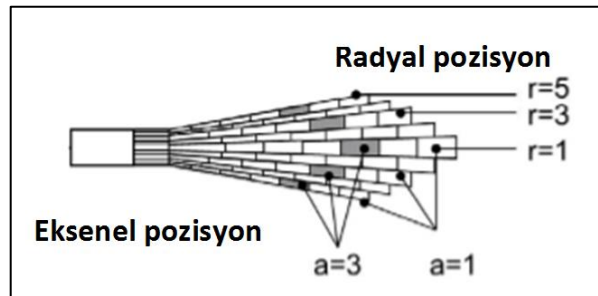
Kullanıcı verisine göre 0.70353 değeri değiştirilebilir [76]. Zaman içerisinde damlacık çapındaki değişiklik (ve buna bağlı olarak damlacık kütlesindeki) şu şekilde hesaplanır [76]:

$$d_d = \sqrt{d_{d,0}^2 - v_e \cdot t} \quad (2.49)$$

2.4.4 Dizel Motorlar için Çok Bölgeli Yanma Modeli

BOOST doğrudan püskürtmeli dizel motorlarında yanma karakteristiklerinin tahmini için çok bölgeli yanma modelini kullanır [76]. Model serpintiyi yüksek sayıda bölgeye ayırır [76]. Her bir bölgede dolgunun karışması, buharlaşma, tutuşma gecikmesi ve yanma mekanizmaları farklı alt modeller vasıtasıyla hesaplanmaktadır [76].

Şekil 2.15'ten de görüleceği üzere, püskürtme esnasında, bazı artış aralıklarında, yeni bölgeler paketi oluşmaktadır [76]. Her bir paket birkaç radyal bölüme ayrılmıştır [76]. Sonuç olarak, yanma işlemi sırasında üretilen toplam bölge sayısı, püskürtme süresine, hesaplama zaman adımına ve radyal yöndeki ayrıklığa bağlıdır [76].



Şekil 2. 15 Çok Bölgeli Yanma Modelinde Püskürtme Ayrıştırma [76]

2.5 Emisyon Modelleri

2.5.1 NOx Oluşum Modeli

BOOST'a uygulanan NOx oluşum modeli Pattas ve Häfner'i temel almaktadır [76]. Aşağıda Çizelge 2.19'da görüleceği üzere, 6 reaksiyon (iyi bilinen Zeldovich mekanizmasına dayanan) dikkate alınmıştır [76, 77]:

Çizelge 2. 1 Zeldovich mekanizması [76, 77]

	Stokiometri	Oran k_i $= k_{0,i} \cdot T^a \cdot e^{\left(\frac{-TA_i}{T}\right)}$	$k_0[cm^3, mol, s]$	a[-]	$T_A[K]$
R1	N2+O=NO+N	$r_1 = k_1 \cdot c_{N2} \cdot c_O$	4.93E13	0.0472	38048.01
R2	O2+N=NO+O	$r_2 = k_2 \cdot c_{O2} \cdot c_N$	1.48E08	1.5	2859.01
R3	N+OH=NO+H	$r_3 = k_3 \cdot c_{OH} \cdot c_N$	4.22E13	0.0	0.0
R4	N2O+O=NO+NO	$r_4 = k_4 \cdot c_{N2O} \cdot c_O$	4.58E13	0.0	12.130.6
R5	O2+N2=N2O+O	$r_5 = k_5 \cdot c_{O2} \cdot c_{N2}$	2.25E10	0.825	50569.7
R6	OH+N2=N2O+H	$r_6 = k_{21} \cdot c_{OH} \cdot c_{N2}$	9.14E07	1.148	36190.66

mol/cm3s cinsinden NO oluşumu / yıkımının son oranı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$r_{NO} = C_{PostProcMult} \cdot C_{Kineticmult} \cdot 2.0 \cdot (1 - \alpha^2) \cdot \left(\frac{r_1}{1 + \alpha \cdot AK_2} + \frac{r_4}{1 + AK_4} \right) \quad (2.50)$$

$$\alpha = \frac{C_{NO,act}}{C_{NO,equ}} \cdot \frac{1}{C_{Kinetic Mult}} \quad AK_2 = \frac{r_1}{r_2 + r_3} \quad AK_4 = \frac{r_4}{r_5 + r_6} \quad (2.51)$$

2.5.2 CO Oluşum Modeli

BOOST'a uygulanan CO oluşum modeli Onorati ve diğerlerini temel almaktadır. Aşağıdaki Çizelge 2.20'deki 2 reaksiyon dikkate alınmıştır [76, 77]:

Çizelge 2. 2 CO oluşum modeli [76, 77]

	Stokiometri	Oran
R1	CO+OH=CO2+H	$r_1 = 6.76 \cdot 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{T}{1102.0}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{OH}$
R2	CO+O2=CO2+O	$r_2 = 2.51 \cdot 10^{12} \cdot e^{\left(\frac{-24055.0}{T}\right)} \cdot c_{CO} \cdot c_{O2}$

mol/cm3s cinsinden CO oluşumu / yıkımının son oranı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [76, 77]:

$$r_{CO} = C_{Const} \cdot (r_1 + r_2) \cdot (1 - \alpha) \quad (2.52)$$

$$\alpha = \frac{C_{CO,act}}{C_{CO,equ}} \quad (2.53)$$

2.5.3 Is Oluşum Modelleri

BOOST'a uygulanan 2 farklı is oluşum modeli bulunmaktadır. İki bölgeyi hesaplama için Schubiger ve diğerlerinin modeli kullanılmaktadır [76]. Çok bölgeyi yanma modeli için kullanılan model Hiroyasu ve diğerlerine dayanmaktadır [76].

2.5.3.1 Schubiger ve Diğerleri

Model reaksiyon kinetik mekanizmaları tarafından yönetilen is oluşum mekanizması için iki reaksiyonu göz önünde bulundurur [76]. Is oluşum reaksiyonu $dm_{s,f}/dt$ difüzyon yanmasının yanma hızına dayanmaktadır [76]. Oksidasyon reaksiyonu silindir içerisindeki mevcut, net is kütlesine ve yanmış bölgedeki oksijen mevcudiyetine bağlıdır [76]. Karıştırma terimi T_{char} küresel ısı salınım oranıyla ilişkilidir [76].

$$\frac{dm_{s,f}}{dt} = A_{s,f} \cdot \frac{dm_{fb,diff}}{dt} \cdot \left(\frac{p}{p_{ref}} \right)^{n1} \cdot e^{\frac{E_{s,f}}{R_m \cdot T}} \quad (2.54)$$

$$\frac{dm_{s,o}}{dt} = A_{s,o} \cdot \frac{1}{\tau_{char}} \cdot (m_{soot})^{n2} \left(\frac{p_{O_2}}{P_{O_2,ref}} \right)^{n3} \cdot e^{\frac{E_{s,o}}{R_m \cdot T}} \quad (2.55)$$

2.5.3.2 Hiroyasu ve Diğerleri

Çok bölgeyi yanma modeli için kullanılan is modeli Hiroyasu ve diğerlerini temel almaktadır [76]. Modelde is oluşumu doğrudan yakıt buharının varlığına bağlanmaktadır [76, 77]. Oksidasyon reaksiyonu net is kütlesi ve reaksiyon bölgesindeki mevcut oksijen tarafından kontrol edilmektedir [76, 77]. Bu iki reaksiyon aynı anda gerçekleşir, mevcut is kütlesi is oluşumu ve oksidasyon oranı farkından kaynaklanmaktadır [76, 77].

$$\frac{dm_{s,f}}{dt} = C_{s,f} \cdot m_A \cdot p^{0.5} \cdot e^{-\frac{E_{sf}}{R_m \cdot T}} \quad (2.56)$$

$$\frac{dm_{s,o}}{dt} = C_{s,o} \cdot m_{soot} \cdot \frac{p_{O_2}}{p} p^{1.8} \cdot e^{-\frac{E_{sc}}{R_m \cdot T}} \quad (2.57)$$

2.5.4 HC Oluşum Modelleri

Benzinli bir motorda yanmamış hidrokarbonların farklı kaynakları bulunmaktadır [76]. Onların oluşum prosesinin tam bir tanımı henüz verilemez ve termodinamik bir yaklaşım içinde güvenilir tahmini bir modelin elde edilmesi, temel varsayımlar ve azaltılmış hesaplama sürelerinin gerekliliği nedeniyle engellenir [76]. Bununla birlikte, ana oluşum mekanizmalarını açıklayan ve HC trendlerini motor çalışma parametresinin fonksiyonu olarak yakalayabilen bir model önerilebilir [76]. Yanmamış hidrokarbonların ana kaynağı benzinli motorlarda aşağıdaki gibi tanımlanabilir (D'Errico ve diğerleri) [76].

1. Dolgunun bir bölümü krevis hacimlerine girer ve alev girişte söndüğü için yanma olmaz [76, 77].
2. Yakıt buharı, yağ katmanı tarafından emilir ve emme ve sıkıştırma esnasında silindir duvarı üzerinde birikir. Yüzeyden salma, genişleme stroku esnasında silindir basıncı düştüğünde ve tam yanma gerçekleşmediğinde olur [76, 77].
3. Yanma odası duvarında, alev duvarlara erişmeden önce sönerse kalan söndürme tabakaları [76, 77].
4. Yanma kalitesi düşük olduğunda ara sıra meydana gelen kısmi yanma veya oluşan ateşleme hatası [76, 77].
5. PFI motorlarında supap bindirmesi sırasında yakıt buharının egzoz sistemine doğrudan akışı [76, 77].

İlk iki mekanizma ve özellikle krevis oluşumu en önemlileri sayılır ve termodinamik bir modelde hesaba katılmaları gerekir [76, 77]. Söndürme tabakası ve kısmi yanma etkisi, yarı boyutsal bir yaklaşımla fiziksel olarak tarif edilemez, fakat ayarlanabilir yarı-deneysel korelasyonların benimsenmesiyle dâhil edilebilir [76].

Bütün kimyasal türler tüm elementler vasıtasıyla taşınırken, akış etkisi otomatik olarak dikkate alınır [76].

2.5.4.1 Krevis Mekanizması

Krevisler alevin duvarlara aktarılan ısı nedeniyle yayılamayacağı dar hacimlerdir [76, 77]. En önemli krevis hacimleri piston segmanı ve silindir gömleği arasında oluşanlardır [76, 77]. Bu krevis hacimleri hidrokarbon oluşumuna neden olur [76, 77]. Sıkıştırma

esnasında yanmamış karışım geniş bir yüzey/hacim oranına sahip krevis hacmine girmeye zorlanır ve duvarlarla ısı transferi alışverişini soğutur [76, 77]. Yanma esnasında, basınç artmaya devam eder ve diğer yanmamış karışımı krevis hacimlerine akmaya zorlar [76, 77]. Silindir basıncı düşmeye başladığı zaman, akış krevis girişindeki hareketini tersine çevirebilsin diye alev vardıgı zaman söner [76, 77].

Bu prosesi tanımlamak için, model silindir içerisindeki ve krevis bölgesindeki basıncın aynı ve krevis hacimlerindeki kütlenin sıcaklığının piston sıcaklığına eşit olduğunu varsayar [76, 77]. Herhangi bir andaki kütle şuna eşittir [76]:

$$m_{crevice} = \frac{p \cdot V_{crevice} \cdot M}{R \cdot T_{piston}} \quad (2.58)$$

Egzoza giren HC'lerin değerlendirilmesinde, BOOST yanma sonunda krevis hacminden salınan HC'leri biriktirmeye başlar [76].

2.5.4.2 Hidrokarbon Emilim/Salınım Mekanizması

İkinci bir önemli hidrokarbon kaynağı yakıtta veya yanma odası duvarlarında yağlama yağının varlığıdır [76, 77]. Aslında sıkıştırma esnasında, yakıt buharının basıncı artar, Henry kanununa göre yağ emme sırasında doymuş olsa bile emiş başlar [76]. Yanma sırasında, yanmış gazların içerisindeki yakıt buharı konsantrasyonu sıfıra gider, böylece emilmiş yakıt buharı sıvı yağdan yanmış gazlara doğru salınacaktır [76, 77]. Yakıt çözünürlüğü, moleküler ağırlığın olumlu bir fonksiyonudur; bu nedenle yağ katmanı, yağlayıcı yağı içindeki ayrık hidrokarbonların farklı çözünürlüğüne bağlı olarak HC emisyonlarına katkıda bulunur [76, 77]. Sonuç olarak, metan ve propan gibi olağan gazlı yakıtlar için, düşük moleküler ağırlıkları nedeniyle, yağ mekanizması önemli bir katkıda bulunmaz [76, 77].

HC emilim / salınımının gelişiminde yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir [76, 77]:

- Yağ filmi silindir duvarı ile aynı sıcaklıktadır,
- Yakıt, tek bir hidrokarbon türü tarafından oluşturulur, taze karışımda tamamen buharlaştırılır,
- Yağ, özellikleri SAE5W20 yağlayıcıya benzer olan skalan (C₃₀H₆₂) ile temsil edilir,
- Yağ filmi boyunca çapraz akış ihmal edilebilir,

- Yağ filmindeki yakıtın difüzyonu sınırlayıcı bir faktördür, çünkü sıvı fazdaki difüzyon sabiti gaz fazındaki ilgili değerden 104 kat daha küçüktür [76].

Bu hipotezler altında yakıt kütlesi oranının yağ filmindeki radyal dağılımı difüzyon denkleminin çözülmesi ile belirlenebilir [76]:

$$\frac{\partial w_F}{\partial t} - D \frac{\partial^2 w_F}{\partial r^2} = 0 \quad (2.59)$$

Denklem 2.59'u çözmek için yağ tabakası, duvarlara yapışan silindirik bir taç olarak düşünülebilir [76].

Ortaya çıkan hesap alanı, daha sonra silindirik tacı hem eksenel hem de radyal doğrultuda sabit sayıda elemana bölerek elde edilir [76].

Difüzyon katsayısı, aşağıdaki ilişkiyi uygulayarak hesaplanabilir [76]:

$$D = 7.4 \cdot 10^{-8} \cdot M^{0.5} \cdot T \cdot v_f^{-0.6} \cdot \mu^{-1} \quad (2.60)$$

(r=0) gömlek yüzeyinde denklem 2.60'a sıfır akış sınır koşulları uygulanır, $r = \delta f_{ilm}$ 'de gaz / yağ ara yüzündeki yakıt yoğunluğu sınır koşul olarak tayin edilir [76]. Burada, aşağıdaki dört farklı durum ortaya çıkabilir [76]:

- 1) Yağ tabakası taze dolgu ile temas halindedir,
- 2) Yağ tabakası yanmış gaz ile temas halindedir,
- 3) Yağ tabakası krank karter gazıyla temas halindedir,
- 4) Yağ tabakası piston katmanıyla temas halindedir [76].

BOOST, yanmamış karışıma salınan herhangi bir HC yayılan alev cephesi tarafından yakılacağı için, her adımında alev cephesinin konumunu değerlendirir ve sadece yanmış gazlara salınan HC'leri biriktirir [76].

2.5.4.3 Kısmi Yanma Etkileri

Söndürme tabakası ve kısmi yanma etkileri yarı boyutlu bir yaklaşımla fiziksel olarak tarif edilemez [76]. Olası yarı ampirik bir korelasyon Lavoie ve diğerleri tarafından öne sürülmüştür, burada F_{prob} silindirde kalan yanmamış dolgunun bir bölümü olup, F_{prob} 'u küresel yanma oranı parametreleriyle ilişkilendiren aşağıdaki denklem uygulanarak hesaplanır [76, 77]:

$$F_{\text{prob}} = P \cdot C_1 \cdot \exp \left\{ -\frac{(\vartheta_{\text{EVO}} - \vartheta_{90})}{[C_2 \cdot (\vartheta_{\text{EVO}} - \vartheta_{90})]} \right\} \quad (2.61)$$

$$C_1 = 0.0032 + \frac{(\Phi - 1)}{22} \quad \Phi < 1 \quad (2.62)$$

$$C_1 = 0.003 + ((\Phi - 1) \cdot 1.1)^4 \quad \Phi > 1 \quad (2.63)$$

$$C_2 = 0.35$$

2.5.4.4 HC Sonrası Oksidasyon

Son olarak, yanmış gazlara salınan tüm hidrokarbonlar yanma odasında var olan yüksek sıcaklığa bağlı olarak kompleks bir oksidasyon mekanizmasına maruz kalırlar [76]. Bu proses için basitleştirilmiş bir yaklaşım Lavoie ve Blumberg tarafından yavaş HC sonrası oksidasyonu hesaba katan bir Arrhenius denklemi kullanarak geliştirilmiştir [76, 77]:

$$\frac{dC_{HC}}{dt} = -F_{Ox} \cdot f \cdot A_{Ox} \cdot \exp \left(\frac{-T_{Ox}}{T} \right) \cdot C_{O_2} \cdot C_{HC} \quad (2.64)$$

2.5.4.5 Dinamik Silindir İçi Türbülans (Silindir Cidarına teğetsel akış)

BOOST kullanıcıya supap hareketine karşı emme kanalının türbülans (silindir cidarına teğetsel akış) oranını belirleme imkânı sağlar [76, 77]. Emme prosesi esnasında, silindire giren kütlenin momentum momenti anlık kütle debisinden ve anlık supap hareketiyle oluşan türbülans (silindir cidarına teğetsel akış) yola çıkılarak hesaplanmaktadır. Zaman adımının sonunda silindir içi türbülans (silindir cidarına teğetsel akış) aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [76, 77]:

$$n_{sw}(t + \Delta t) = \frac{1}{m_c(t + \Delta t)} \cdot (m_c(t) \cdot n_{sw}(t) + dm_i \cdot n_{swi}) \quad (2.65)$$

Silindir içerisine giren n_{swi} 'in karakteristik anlık türbülans değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [76, 77]:

$$n_{swi} = \frac{\dot{V}_i}{V_D} \cdot \frac{n_{swr}}{2 \cdot n} \quad (2.66)$$

2.5.4.6 Dinamik Silindir İçi Silindir Ekseni Doğrultusunda Akış

BOOST kullanıcıya supap hareketine karşı emme kanalının silindir ekseni doğrultusunda akış oranını belirleme imkânı sağlar [76, b]. Emme prosesi esnasında, silindire giren

kütlenin momentum momenti anlık kütle debisinden ve anlık supap hareketiyle oluşan silindir eksenini doğrultusunda akıştan yola çıkılarak hesaplanmaktadır [76, b]. Zaman adımının sonunda silindir içi silindir eksenini doğrultusundaki akış aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır [76, b]:

$$n_{tb}(t + \Delta t) = \frac{1}{m_c(t + \Delta t)} \cdot (m_c(t) \cdot n_{tb}(t) + dm_i \cdot n_{tbi}) \quad (2.67)$$

Silindir içerisine giren n_{tbi} 'in karakteristik anlık silindir eksenini doğrultusunda akış değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır [76]:

$$n_{tbi} = \frac{\dot{V}_i}{V_D} \cdot \frac{n_{tbr}}{2 \cdot n} \quad (2.68)$$

2.5.4.7 Plenum ve Değişken Plenum

Bir plenumdaki gaz koşullarının hesabı, Kısım 2.2.1'de açıklandığı gibi bir silindirin gaz değişim sürecinin simülasyonuna çok benzer [76, 77]:

$$\frac{d(m_{PI} \cdot u)}{d\alpha} = -p_{PI} \cdot \frac{dV}{d\alpha} - \sum \frac{dQ_w}{d\alpha} + \sum \frac{dm_i}{d\alpha} \cdot h_i - \sum \frac{dm_e}{d\alpha} \cdot h_e + \frac{dQ_{reac}}{d\alpha} \quad (2.69)$$

2.5.4.8 Akış Esnasındaki Lokal Kayıplar

Duvar sürtünme kuvveti, duvar sürtünme faktörü λ_f ile belirlenebilir [76, 77]:

$$\frac{F_R}{V} = \varphi \cdot \frac{\lambda_f}{2 \cdot d_{hyd}} \cdot \rho \cdot u \cdot |u| \quad (2.70)$$

φ faktörüne Fanning sürtünme faktörü denir ve yuvarlak kanal kesitlerinden sapmaları hesaba katar. Çizelge 2.21'de özetlendiği gibi değerleri vardır [76].

Çizelge 2. 3 Fanning sürtünme faktörü tablosu [76]

Kanal Kesiti	Φ
Yuvarlak	1.00
Kare	0.89
Eşkenar Üçgen	0.83
Sinoidal (kanal açık yüksekliğinin açık genişliğe oranı 0.425)	0.69

Sürtünme faktörü λ_f , Reynolds sayısının bir fonksiyonu ve akış rejimine (laminer veya türbülanslı) bağlı değişiklikler olarak tarif edilmektedir [76, 77]:

$$Re = \frac{d_{hyd} \cdot u}{\nu} \quad (2.71)$$

$$\begin{aligned} Re \leq Re_{lam} & \quad |\lambda_f = \lambda_{f,lam} \\ Re_{turb} \leq Re & \quad |\lambda_f = \lambda_{f,turb} \\ Re_{lam} \leq Re \leq Re_{turb} & \quad |\lambda_f \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$= \lambda_{f,lam} \left(1 - \frac{Re - Re_{lam}}{Re_{turb} - Re_{lam}} \right) + \lambda_{f,turb} \left(\frac{Re - Re_{lam}}{Re_{turb} - Re_{lam}} \right) \quad (2.73)$$

Geçiş bölgesinin laminlerden türbülansa doğru sınırları $Re_{lam} = 2300$ ve $Re_{turb} = 5000$ Reynolds sayıları ile belirlenir [76]. Türbülanslı bölgede, $\lambda_{f,turb}$ sabit girdi değeri olarak kabul edilir veya yüzey pürüzlülüğü için belirlenmiş bir değere dayalı olarak hesaplanabilir. Laminer bölgede $\lambda_{f,lam}$ aşağıdaki gibi verilmektedir [76]:

$$\lambda_{f,lam} = aRe^b \quad a = 64 \quad b = -1 \quad (2.74)$$

Gaz değişimi simülasyonu için $b = -1$, laminer tüp akışı için Hagen Poisseuille Yasasına göre ve kullanıcı tarafından değiştirilemez [76].

Gazın dinamik viskozitesi sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur [76, 77].

$$\nu = 17.1e - 6 * \left(\frac{T}{273.15} \right)^{1.5} * \frac{383.15}{(T + 110.4)} \quad (2.75)$$

2.6 Silindir İçi Gaz Basıncının Analizi

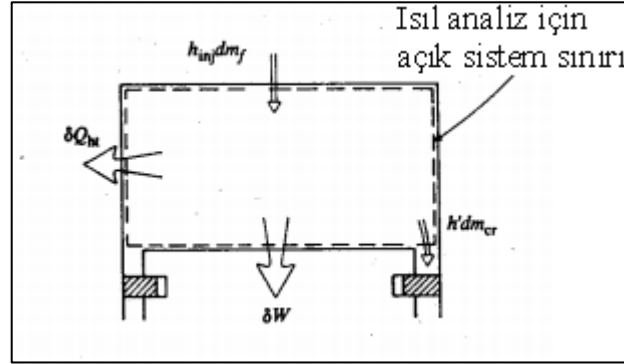
2.6.1 Deneyler Esnasında Silindir İçi Gaz Basıncının ve Isı Açığa Çıkış Oranının Elde Edilmesi

Deneylerde, piezoelektrik basınç sensörü ile elde edilen basınç verileri, krank miline yerleştirilen enkoder vasıtasıyla krank açısı verileri ile beraber işlenerek, krank açısına bağlı silindir içi basınç değerleri elde edilmiştir. Enkoderin A kanalı ve B kanalından veriler alındığı gibi, ÜÖN'ya ayarlı Z kanalı verisi ile de piston konumu belirlenmiştir. Ayrıca, motoring şartında elde edilen basınç datası verileri referans alınarak, silindir içi basınç datası verileri krank açısına bağlı olarak elde edilmiştir. Diğer taraftan, ısı açığa çıkış oranının elde edilmesi için Janaf Tablolarından yararlanılmıştır.

2.6.1.2 Silindir İçi Gaz Basıncı Hesabı

Yanmanın yorumlanmasında, krank açısına bağlı olarak silindir içi gaz basınç datalarından yararlanılır [78]. Yanma prosesi, ısı açığa çıkış oranı veya yakıt kütlesi yanma oranı ile analiz edilir [78]. Silindir içi basınç dataları quartz kristalli piezoelektrik basınç algılayıcısı ile ölçülür [78]. Quartz kristalin bir tarafı diyaframla basınca maruz kalır ve basınca bağlı olarak elektrik yükü açığa çıkar [78]. Bir yük yükseltici (charge amplifier) ile voltaj çıktısı alınır [78].

Isıl analiz termodinamiğin birinci yasasına dayanır [78]. Sistem açık bir sistem ve basınç ve sıcaklığın uniform dağıldığı kabulü ile modellenir [78]. Şekil 2.16'da sistem şematiği verilmiştir [78].



Şekil 2. 16 Isıl analiz için sistem ve kabuller [78]

dQ/dt sistem ve sınırlar arasındaki ısı transferi, $p(dV/dt)$ sınır hareketiyle açığa çıkan iş, $\dot{m}_i$ kütle akış, h_i sistemdeki akışın entalpisi, U ise iç enerjidir [78].

2.6.1.3 Yanma Verimi

Isı açığa çıkış oranı ve yakıt kütlesi yanma oranı ile yanma yorumlanabilir [78]. Ancak dizel motorlarda hava kullanımı siyah duman yani is partikülleri ile sınırlıdır [78]. Is ve yanmamış ürünler (HC ve CO) yanma verimsizliğini göstermesine rağmen, dizel motorlarda yanma verimi oldukça yüksektir [78]. Dizel motorlarda tam yük şartlarında is miktarı yakıtın %0.5'ini, HC emisyonları yakıtın %1'ini geçemez [78]. CO emisyonları ise yakıt enerjisinin %0.5'i civarındadır [78]. Dolayısıyla, dizel motorlarda yanma verimi %98'in üzerindedir. Bu sebeple ısı açığa çıkış oranından yola çıkarak, enerji dönüşümünün tam gerçekleştiğini kabul etmek mümkündür [78].

2.6.1.4 Direkt Püskürtmeli Motorlar

Silindirin tek bir açık sistem içerdiği motorlardır [78]. Yanma odası sistem sınırlarına kütle akışı ve alev sönme bölgelerinin olduğu dar kesit kütle akışı mevcuttur [78]. Alevin sönme bölgelerindeki akış ihmal edilir [78].

$$\frac{dQ}{dt} - p \frac{dV}{dt} + m_f h_f = \frac{dU}{dt} \quad (2.74)$$

Silindir içi gaz basınç datalarından yola çıkarak 2.74'teki genel denklem elde edilir [78]. Bu genel yaklaşımdan açığa çıkarak ısı açığa çıkış oranı ve yakıt kütlesi yanma oranı elde edilir [78].

2.6.1.5 Isı Açığa Çıkış Analizi

Denklem 2.74 düzenlenirse, U ve h_f iç enerji ve yanma odasına gönderilen yakıtın entalpisi ($U=U_s=U(T)-U(298K)$ ve $h_f=h_{sf}=h_f(T)-h_f(298K)$) ve dQ/dt yakıtın kimyasal enerjisi ile sistem enerjisi arasındaki fark olmak üzere, $h_{s,f}$ 0 kabulüyle [78];

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{dQ_{ch}}{dt} - \frac{dQ_{ht}}{dt} = p \frac{dV}{dt} + \frac{dU_s}{dt} \quad (2.75)$$

olur.

Net ısı açığa çıkış oranı dQ_n/dt , toplam ısı açığa çıkış oranı dQ_{ch}/dt ile silindir cidarlarından meydana gelen ısı transferi Q_{ht}/dt arasındaki farka eşittir [78]. Net ısı açığa çıkış miktarı, sistemde gerçekleştirilen işle, sistemdeki iç enerji değişiminin toplamına eşittir [78].

Sistemdeki gazın ideal gaz kabulü ile denklem 2.75 [78];

$$\frac{dQ_n}{dt} = p \frac{dV}{dt} + m c_v \frac{dT}{dt} \quad (2.76)$$

İdeal gaz yasasında, R sabit kabulü ile [78];

$$\frac{dT}{dt} = \frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} \quad (2.77)$$

Denklem 2.76, denklem 2.77 ' de yerine konulursa [78];

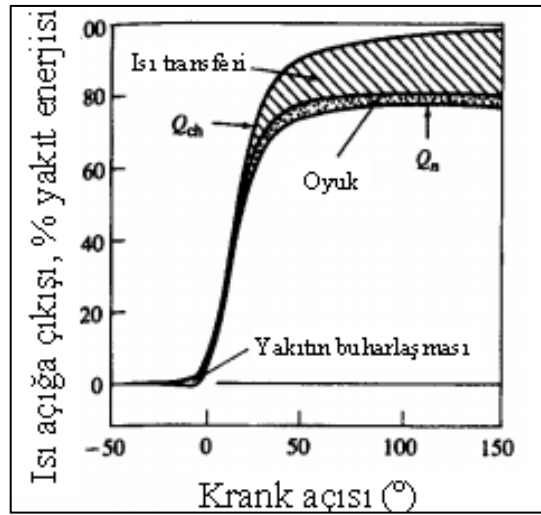
$$\begin{aligned} \frac{dQ_n}{dt} &= \left(1 + \frac{c_v}{R}\right) p \frac{dV}{dt} + \frac{c_v}{R} V \frac{dp}{dt} \\ \frac{dQ_n}{dt} &= \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt} \end{aligned} \quad (2.78)$$

Bu denklemde, γ özgül ısı oranı yani c_p/c_v ' dir. γ dizel motorlarda ısı açığa çıkış analizinde 1.3 ila 1.35 arasında değişir ve genelde bu aralıkta sabit değer olarak kullanılır [78]. Daha özel olarak, γ dizel motorlarda ısı açığa çıkış oranı hesabında, sıkıştırma stroku sonuna kadar 1.35, yanma esnasında 1.2 ile 1.3 arasında alınabilir [78].

Isı açığa çıkış analizinde denklem 3.2'den yararlanılabilir [78]. Daha karmaşık modellerde, gazların yanma öncesi, yanma ve sonrası değişim özellikleri, ısı transferi ve alev sönme bölgeleri de hesaba katılır [78]. Dahası, karışımın uniform olmaması, ısı transferi modelinin doğruluğu ve de alev sönme bölgelerinin etkisi hesaba katılabilir [78]. Böylece modelin doğruluğu artmış olacaktır. Ancak, genel olarak dizel motorlarda analizlerde denklem 2.79 yeterlidir [78].

Ayrıca, modelde ihmal edilen ısı transferi dQ_{ht}/dt etkisi de hesaba katılarak, net ısı açığa çıkışı elde edilebilir [78]. Yanma odasına gönderilen yakıt kütlesi ile alt ısı değerinin çarpımı, toplam ısı açığa çıkışının integraline %1 ila %2 oranında farkla eşittir [78].

$$Q_{ch} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} \frac{dQ}{dt} dt = m_f Q_{LHV} \quad (2.79)$$



Şekil 2. 17 Toplam ve net ısı açığa çıkışı ve ısı transferinin, alevin sönme bölgeleri ve yakıt buharlaşmasına etkisi [78]

Daha sonradan denklemlerde zaman değişkeni yerine θ krank açısı kullanılmalıdır [78]. Şekil 2.17'den de görüleceği üzere, net ısı açığa çıkış oranı, toplam ısı açığa çıkışından, ısı transferi, alevin sönme bölgeleri ve yakıtın buharlaşması değerlerinin çıkarılması ile

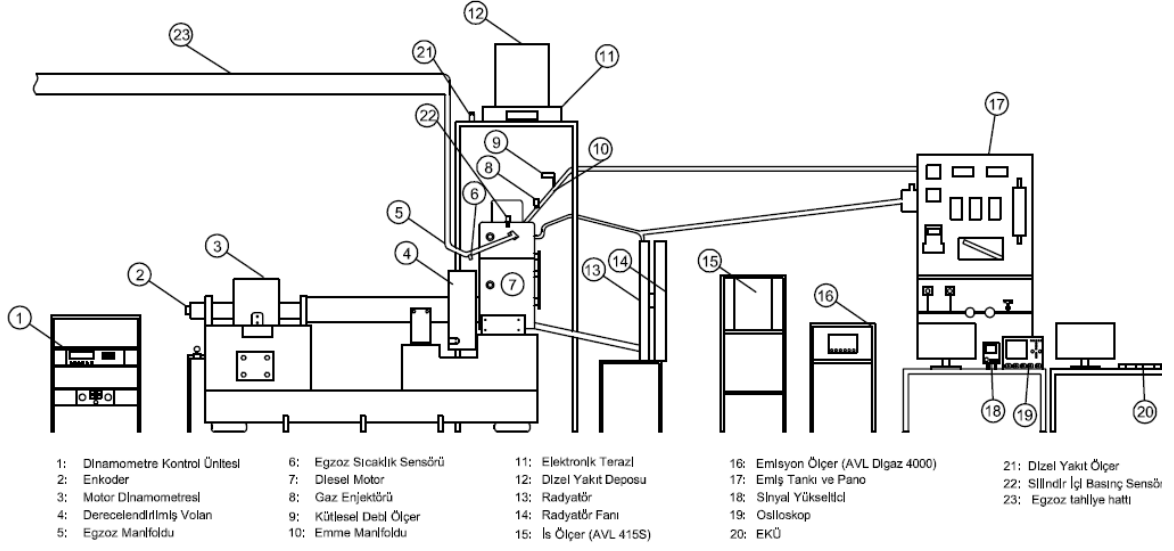
elde edilir [78]. Buharlaşan yakıtın entalpisi, toplam ısı değerin %1' inden küçüktür [78]. Yanma süresince olan ısı transferi, toplam ısı açığa çıkışının %10' u ila 25' i arasındadır [78].

DENEY DÜZENEĞİ VE ÖZELLİKLERİ

Deneylerde, daha önceden bahsedildiği gibi tek silindirli ve orijinali mekanik yakıt sistemli bir dizel motor kullanılmıştır ve böylece silindirler arasında oluşabilecek çevrimsel farklar ve ölçüm belirsizlikleri ortadan kalkmıştır. Daha sonradan söz konusu mekanik yakıt sistemli motor, common-rail yakıt sistemine dönüştürülmüştür. Ayrıca, gaz yakıtlarla da çalışabilecek hale getirilmiştir.

Eksik olan test cihazları, sensörler ve ekipmanlar tamamlanarak, deney seti oluşturulmuştur. Deney setinin şematik gösterimi ve deney setinin resmi aşağıda Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Daha önceden SANTEZ projesi kapsamında alınan Eddy-current tipi elektronik motor dinamometresi ve Şahin Metal Tic. ve Ltd. Şti. (Erin Motor) tarafından üretilen tek silindirli dizel motor, deney setine yerleştirilmiştir. Deney seti ve dinamometrenin bağlı olduğu motor yatağının (şasinin) altına titreşimleri sönmölemek için kauçuk ayaklar yerleştirilmiştir. Debimetreler, göstergeler, motor hava emiş tankı vs. yapılarak, ekipmanlar söz konusu panonun üzerine yerleştirilmiştir.

(a)



(b)



Şekil 3. 1 Deney setinin şematik gösterimi ve fotoğrafı

2.2 Deney Motorunun Özellikleri

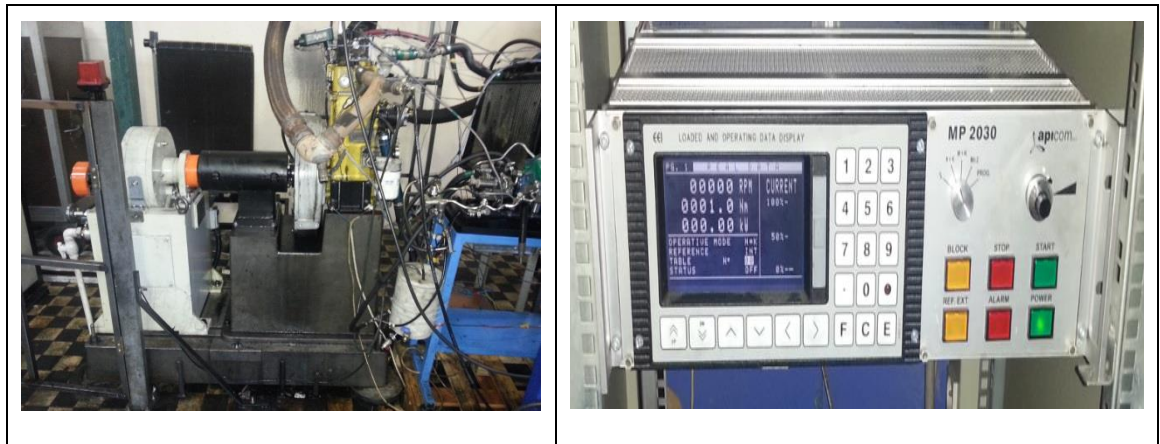
Testler esnasında kullanılan tek silindirli, direkt püskürtmeli, doğal emişli, dört stroklu dizel motorun özellikleri aşağıdaki Çizelge 3.1' de belirtilmiştir.

Çizelge 3. 1 Deney motorunun teknik özellikleri

Silindir Sayısı	Tek silindirli
Silindir Yerleşimi	Düşey
Silindir Hacmi	1.16 m ³
Silindir Başına Supap Sayısı	4
Piston Çapı	108 mm
Strok	127 mm
Sıkıştırma Oranı	14.6:1
Maksimum Motor Gücü	18 kW @ 2400 rpm
Maksimum Motor Torku	80 Nm @ 1800 rpm
Soğutma Sistemi	Su soğutmalı
Rölanti Hızı	600 d/d

2.3 Motor Dinamometresinin Özellikleri

Deney motoru, ApiCom firmasına ait MP 2030 model Eddy Current tipi motor dinamometresi ile Şekil 3. 2’de görüldüğü gibi yüklenmiştir. Kullanılan Eddy Current dinamometrenin teknik özellikleri Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir. Ayrıca dinamometrenin motor frenleme gücü ve motor frenleme torku performans karakteristik eğrisi Şekil 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3. 2 ApiCom Eddy Current dinamometre ve kontrol ünitesi

Çizelge 3. 2 ApiCom Eddy Current dinamometrenin teknik özellikleri

Üretici Firma	ApiCom
Çalışma Prensibi	Eddy Current
Tipi	FR 50
Maksimum Frenleme Gücü	40 kW
Maksimum Frenleme Torku	150 Nm
Maksimum Akım Kapasitesi	7 A
Maksimum Devir Sayısı	15000 rpm

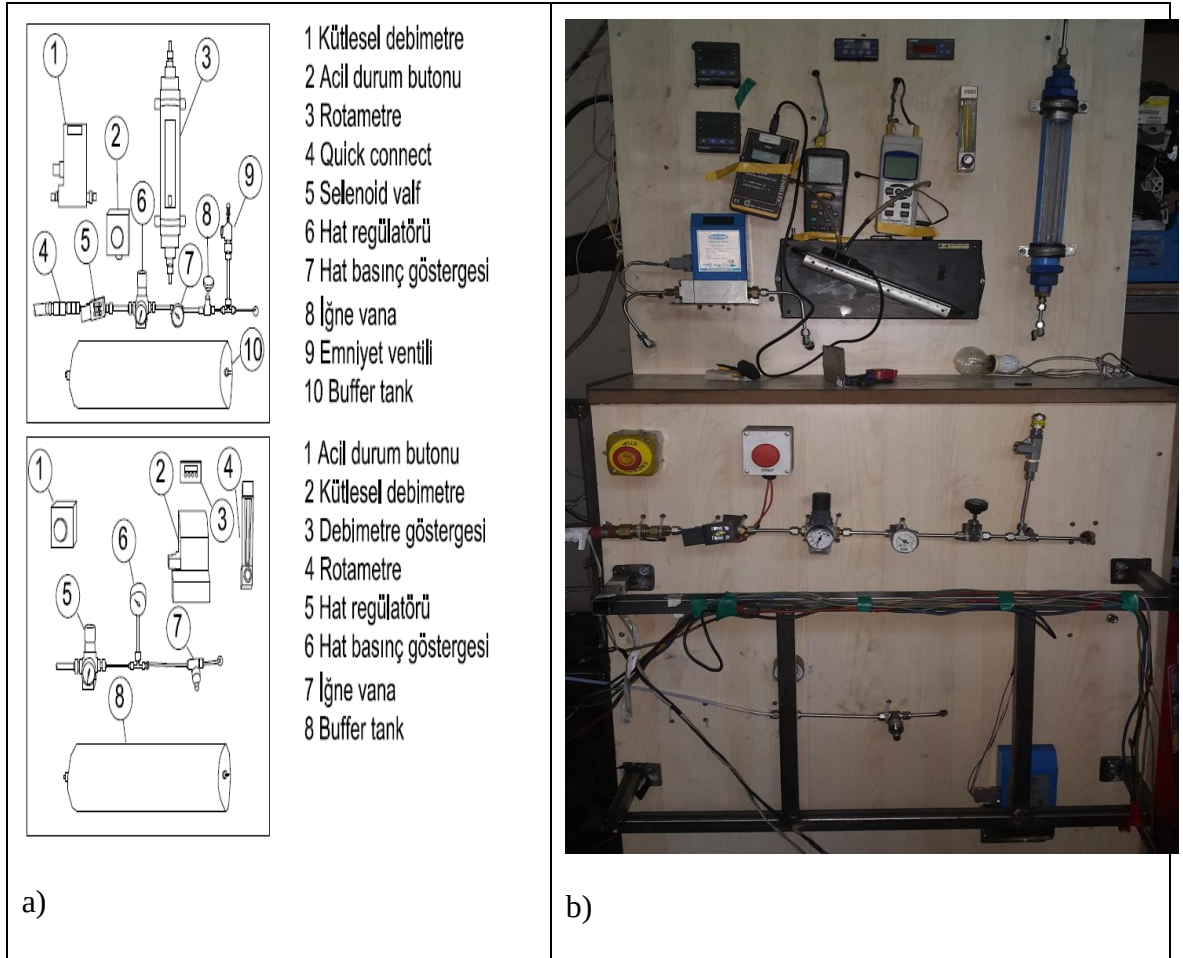
2.4 Gaz Yakıt Sistemi ve Teknik Özellikleri

Gaz yakıt sistemi, test motorunun dizel yakıt hattından ayrı olarak çekilmiştir. Kullanılan yüksek basınçlı gaz tüpleri, laboratuvarın dışında açık havada sabitlenerek konumlandırılmış ve motorun bulunduğu deney düzeneğine kadar ayrıca gaz hattı çekilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde, Ham-Let firmasına ait yüksek basınçlı gaz bağlantı ekipmanları kullanılmıştır.

Deneyler esnasında kullanılan gaz hattı ve ekipmanlar aşağıda Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Deneyler için 2 ayrı gaz hattı oluşturulmuştur. Yukarı tarafta gösterilen gaz hattı, doğalgaz ve metan gazlarının geçmesi için tasarlanmıştır. Birisi metan için kalibre edilmiş kütleli gaz debimetresi, diğeri ise rotametre olmak üzere iki ayrı gaz debimetresi kullanılmıştır. Ayrıca, gaz debimetrelerinde daha stabil olarak ölçüm yapabilmek için, motor ile debimetreler arasına bir adet buffer tank yerleştirilmiştir. Ayrıca, hat üzerine hat basınç göstergesi, emniyet ventili, hat regülatörü, iğne vana gibi ekipmanlar kullanılmıştır. Emniyet ventilinin tahliye hattı laboratuvarın dışına çekilmiştir. Ayrıca, yine yüksek basınç doğalgaz ve metan tüpleri ve regülatörleri laboratuvarın dışında bulundurulmuştur. Ayrıca, emniyet açısından hatta normalde açık konumda olan ve 12 V enerji verildiğinde kapanan bir adet selenoid valf ve acil durum butonu konulmuştur. Ayrıca, hat üzerine yerleştirilen quick-connect bağlantı ekipmanı sayesinde, hem kolayca yüksek basıncıdaki hortum takılıp çıkarılabildiği gibi,

aynı zamanda quick-connect bağlantı ekipmanı, gaz enjektörlerinden önce metan veya doğalgaz için çek valf görevi görmektedir.

Altındaki gaz hattında ise, CO₂ veya azot (N₂) motora gönderileceği zaman kullanılmak üzere oluşturulmuştur. Yine yukarıda anlatılan ekipmanlara benzer ekipmanlar bulunmak üzere, motorda biyogaz deneneceği zaman CO₂ gazı göndermek veya EGR deneneceği zaman N₂ göndermek için ikinci bir gaz hattına ihtiyaç duyulmuştur. Gönderilen gazlar, inert gazlar oldukları için, herhangi bir enjektör kullanılmadan, doğrudan emme manifolduna gönderilmişlerdir.

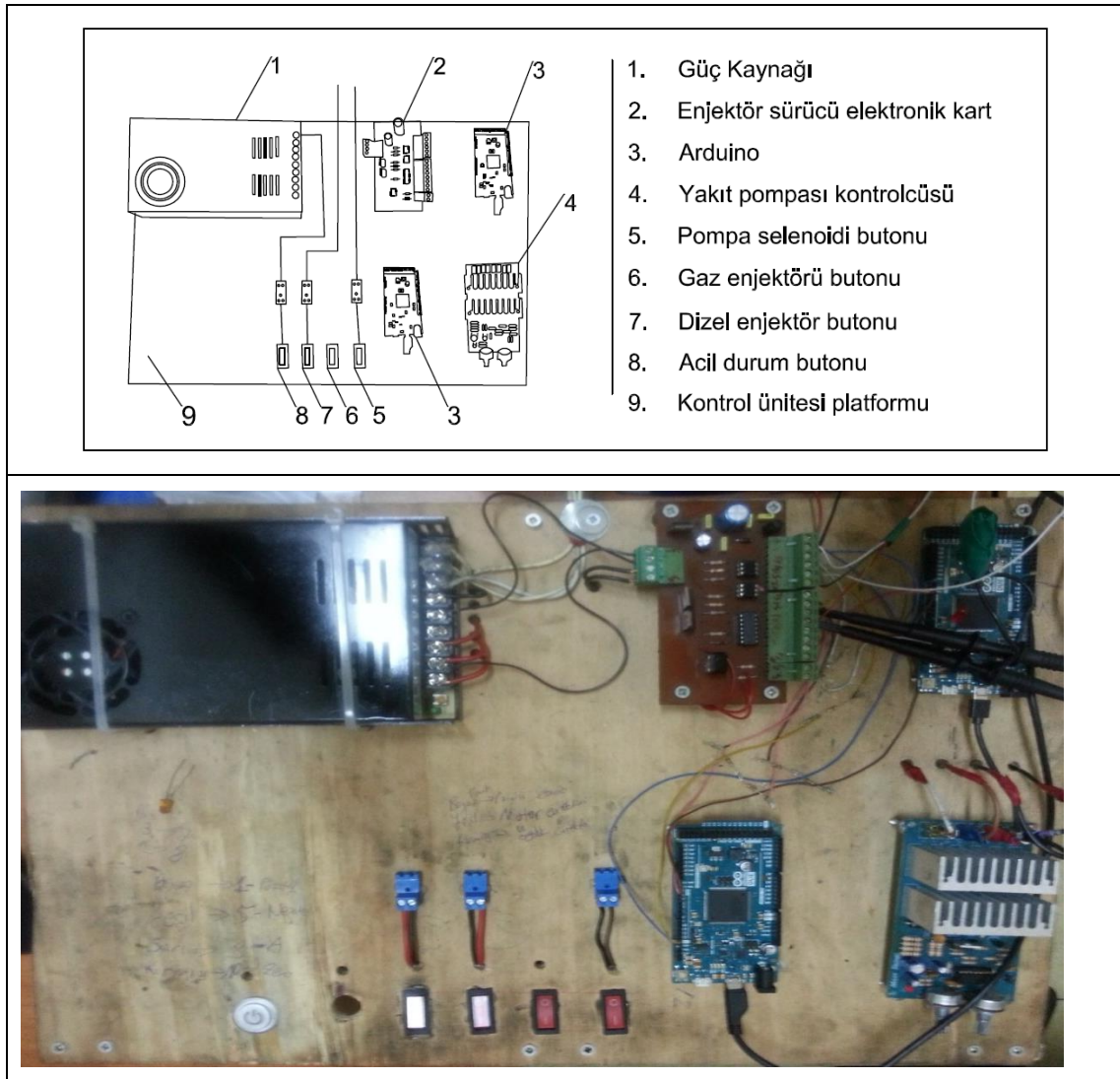


Şekil 3. 3 Gaz hattı ekipmanlarının şematik gösterimi ve fotoğrafı

2.5 Elektronik Kontrol Ünitesi

Aşağıdaki Şekil 3.4'te de görüldüğü gibi, dizel enjektörünü, gaz enjektörünü ve elektronik pompa selenoidini kontrol edebilmek için, kontrol kartlarının üzerinde bulunduğu bir kontrol panosu geliştirilmiştir. Kontrol panosu temel olarak bir adet 12 V

gerilim ve 27 l akım üretebilen bir güç kaynağı, bir adet PWM kontrolü yapabilen bir kart, 1 adet enjektörleri sürmek için Pic işlemci ile çalışan ve tarafımızdan yapılmış enjektör sürücüsü ve 2 adet Arduino Due kartından oluşmaktadır. Elektronik enjektör sürücü kartı, 2 adet enjektör sürebilecek şekilde (hem gaz enjektörü, hem de dizel enjektör) geliştirilmiştir. Arduino kartlar yardımıyla, enkoderden gelen sinyallere bağlı olarak, hızlı bir şekilde dizel enjektörün püskürtme süresi ve püskürtme avansı ve diğer arduino kart ile gaz enjektörünün püskürtme zamanı ve püskürtme avansı değiştirilerek, enjektör sürücü elektronik kart ile hızlı bir şekilde enjektörlerin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Yakıt pompası kontrolcüsü ile PWM kontrol yapılarak yakıt pompası üzerindeki bypass için kullanılan selenoid kontrol edilerek, basınç sabit seviyede tutulmuştur.



Şekil 3. 4 Elektronik kontrol sistemi şematik gösterimi ve fotoğrafı

2.6 Common-rail Kontrol Sistemi

Elektromanyetik dizel enjektörünün kontrolü elektronik enjektör sürücü kartı ile gerçekleştirilirken, Arduino kart yardımıyla, enkoderden gelen sinyale bağlı olarak istenilen püskürtme avansının ve püskürtme süresinin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Püskürtme miktarı, enjektörün açık kalma süresine ve hat basıncına bağlı olduğu için, hat yakıt basıncı sabit tutulmuştur. Ayrıca, yakıt pompası PWM kontrolcü ile yakıt pompası üzerindeki bypass selenoidi kontrol edilerek basınç sabitlenmiştir.

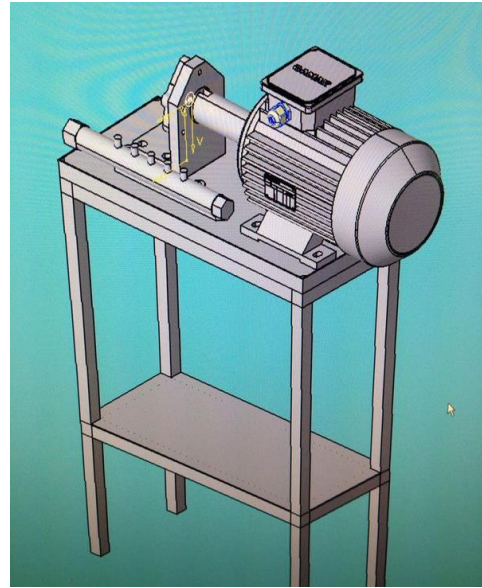
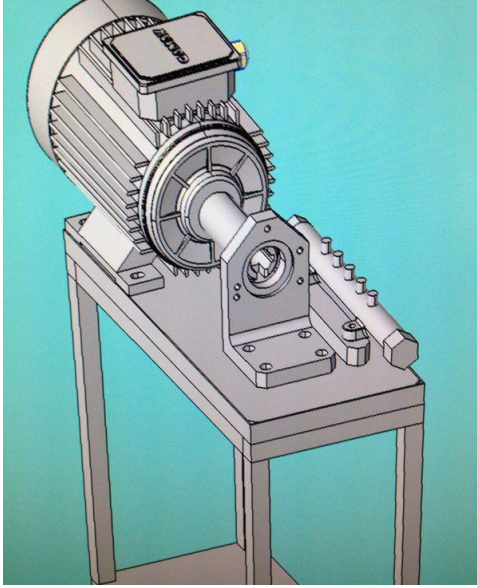
2.7 Gaz Püskürtme Kontrol Ünitesi

Kullanılan Keihin gaz enjektörü, encoderden gelen üst ölü sinyaline bağlı olarak hedeflenen avansta ve sürede püskürtme yapacak şekilde kontrol edilmiştir. Deneyler esnasında, gaz hattının basıncı regülatörlerle sabit tutulmuş ve enkoderden gelen sinyale bağlı olarak elektromanyetik gaz enjektörü elektronik enjektör sürücü kartla kontrol edilmiştir. Böylece aynı EKÜ'yle hem dizel enjektörü, hem de gaz enjektörü kontrol edilmiştir.

2.8 Dizel Yakıt Sisteminin Common-Rail Yakıt Sistemine Dönüştürülmesi

Test için kullanılan dizel motor, normal şartlarda mekanik pompa ve enjektör sistemine sahip bir motor olmakla beraber, yapılan testler esnasında daha önceden bahsedilen yakıt simülatörü ile elde edilen kazanımlar doğrultusunda, motor için seçilen elektromanyetik dizel enjektörü, motor elektronik kontrol ünitesi yardımıyla, Şekil 3.5'te verilen yakıt sistemi yardımıyla da, elektronik kontrollü common-rail yakıt ünitesine dönüştürülmüştür. Motorin yakıtının basınçlandırılarak rail hattına ve de oradan enjektörlere gönderilebilmesi için, common-rail yakıt sistemi oluşturulmuştur. Geliştirilen sistem, elektromanyetik dizel enjektörler, yüksek basınç dizel pompası, rail hattı, yüksek basınca dayanıklı motorlar, yakıt pompasını tahrik etmek için elektrik motoru ve basınç göstergesinden oluşmaktadır(Şekil 3.5).

a)



b)



Şekil 3. 5 Dizel yakıt sistemi çizimi ve fotoğrafı

2.9 Gaz Yakıt Sistemi

Gaz yakıtı püskürtebilmek için, motorun emme kanalına yakın olacak şekilde emme manifolduna Keihin marka gaz enjektörü yerleştirilmiştir. Farklı debilere sahip mavi veya sarı renkli Keihin enjektörler, gönderilecek gaz debisine bağlı olarak kullanılmıştır(Şekil 3.6).

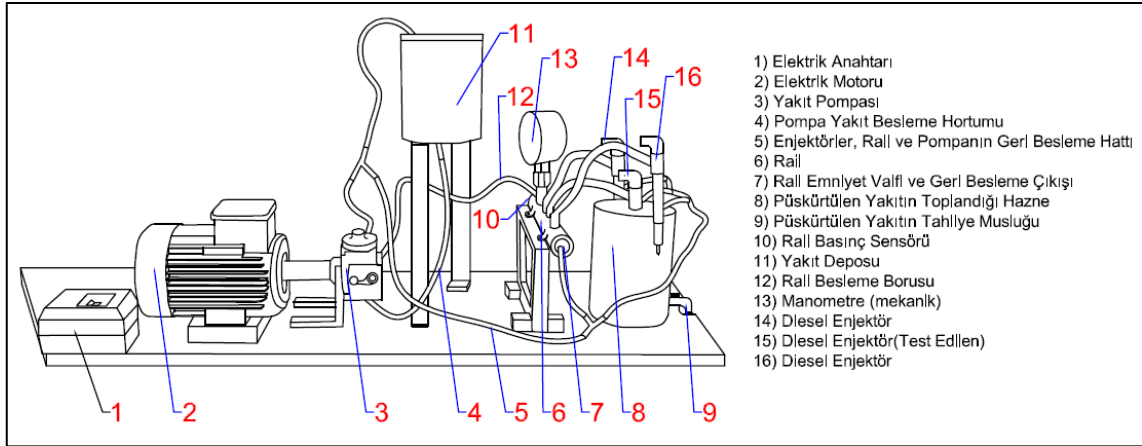


Şekil 3. 6 Mavi gaz enjektörü

2.10 Dizel Yakıt Sistemi Simülatörü

Test motoru üzerinde deneylere başlamadan önce, bir dizel yakıt sistemi simülatörü geliştirilerek, üzerinde testlere ve kalibrasyonlara başlanmıştır(Şekil 3.7). Bu sebeple, öncelikle dizel bir motora ait common-rail yakıt sistemi motor üzerinden alınarak, bir elektrik motoru yardımıyla yakıt pompası tahrik edilmiştir. Bu sebepten dolayı, yakıt pompası ve elektrik motoru yalıtkan bir kavrama yardımıyla alın alına birleştirilmiştir. Ayrıca, rail hattına mekanik bir manometre de yerleştirilmiştir. Yakıt rail'i üzerinde, diğer dizel enjektörlerden sadece bir tanesi kontrol edilmiş ve kontrol edilen dizel enjektörü daha ileriki bölümlerde açıklanacak olan, motora uygun bir elektromanyetik dizel enjektörü seçilerek simülatör üzerine monte edilmiştir. Yakıt pompası üzerindeki selenoid valf PWM olarak kontrol edilerek ve gerektiğinde rail üzerindeki selenoid valf kontrol edilerek, rail basıncının istenilen düzeyde sabit kalması sağlanmıştır. Elektromanyetik dizel enjektörünün açık kalma süresine ve de rail hat basıncına bağlı olarak enjektörün püskürtme karakteristiği elde edilmiştir. Elektrik motoru yardımıyla yüksek basınç pompası tahrik edilmek suretiyle, pompa üzerindeki selenoid PWM kontrolü yapılarak hat basıncı sabit tutulmuş ve enjektör sürücüsü ile enjektörün açık kalma süresi kontrol edilerek, enjektörün püskürtme miktarı elde edilmiştir. Yapılan testlerde, farklı basınç ve enjektör açık kalma sürelerinde kapalı bir kaba yakıt

püskürtmek suretiyle hassas terazide püskürtülen yakıt miktarı ölçülmüştür. Böylece, hem elektronik kontrol ünitesi fiziksel olarak test edilebilmiş, hem de dizel enjektörünün püskürtme karakteristiği elde edilmiştir.



Şekil 3. 7 Dizel yakıt sistemi similatörü şematığı ve fotoğrafı

2.11 Motor Soğutma Sistemi

Motoru soğutulabilmesi için, dört silindirli bir taşıta ait olan radyatör ve elektronik soğutma fanı yardımıyla ve motor üzerindeki termostat yardımıyla motor soğutma

suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları kontrol altında tutulmuştur. Ayrıca, Şekil 3.8'den de görüldüğü gibi, motor soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ısıçift yardımıyla ölçülmüştür. Ayrıca, motor üzerinde bulunan sıcaklık algılayıcı da kontrol edilmiştir.



Şekil 3. 8 Motorun soğutma sisteminin fotoğrafı

2.12 Emme Manifoldu

Test motorunun emme manifolduna, 1 adet LPG-CNG gaz enjektörü, 1 adet termal kütleli hava debisi ölçer, bir adet emme manifoldundan gaz gönderilebilmesini sağlayan ve gaz yakıt hattını bağlayan iğne vana yerleştirilmiştir(Şekil 3.9). Elektromanyetik gaz enjektörü ile motorun emme manifolduna gaz yakıt (doğalgaz, metan veya biyogaz) gönderilmesi sağlanırken, iğne vana yardımıyla emme manifolduna bağlanan ikinci gaz hattı ile EGR uygulamaları için azot (N_2) ve biyogaz gönderilebilmesi için CO_2 gazının motorun emme manifolduna gönderilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, motorun emme manifolduna, kauçuk hava için hortumlar bağlanarak, emilen havanın bir hava tankından geçerek doğrudan motorun emme manifolduna ve oradan da yanma odasına gitmesi sağlanmıştır.



Şekil 3. 9 Motorun emme manifoldunun fotoğrafı

2.13 Egzoz Manifoldu

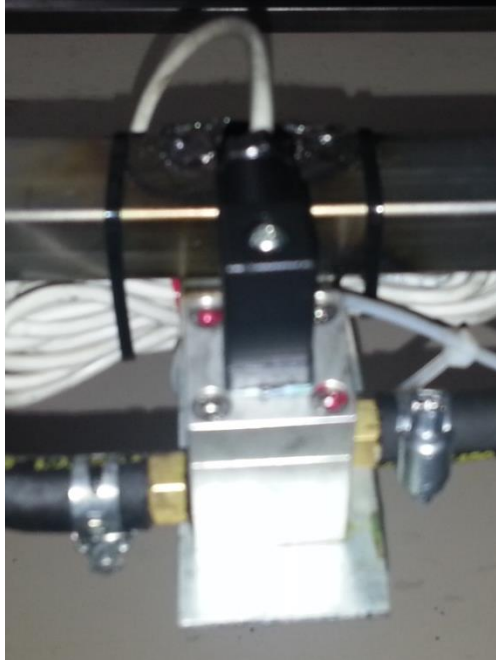
Şekil 3.10’da, test motorunun egzoz manifolduna bağlanan esnek egzoz boruları ile egzoz gazları doğrudan egzoz tahliye hattına verilmiştir. Ayrıca, egzoz manifoldu üzerine bir adet K tipi ısılçift takılarak egzoz gaz sıcaklıkları ölçülmüştür.



Şekil 3. 10 Motorun egzoz manifoldunun fotoğrafı

2.14 Motorin Debisinin Ölçümü

Motorun motorin tüketimi, iki farklı yöntemle ölçülmüştür. İlk olarak gravimetrik yöntem kullanılmış ve 1 gr hassasiyetindeki terazi yardımıyla, motorun yakıt tüketimi süre tutularak ölçülmüştür. İkinci yöntem olarak ise, motorin tüketimini ölçmek için, Şekil 3. 11’de görülen minyatür oval dişli tipi debimetre kullanılmış ve tüketilen motorin miktarı panodaki gösterge ile okunmuştur.



Şekil 3. 11 Motorin yakıt ölçüm sisteminin fotoğrafı

2.15 Gaz Yakıt Debisinin Ölçülmesi

Tüketilen doğalgaz veya metan miktarını ölçmek için, Şekil 3. 12’den de görüleceği üzere, metan gazına göre kalibre edilen New-Flow marka, TMF serisi kütleli debimetre kullanılmıştır. Debimetre, hot-wire (kızgın tel) teknolojisi ile tüketilen gaz yakıt miktarını göstermektedir.

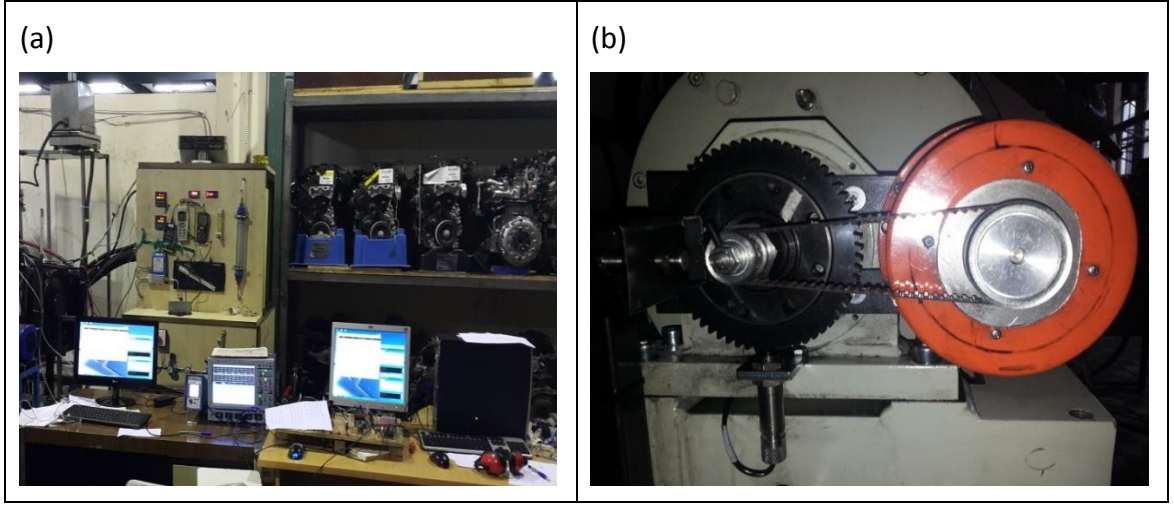


Şekil 3. 12 Motorin yakıt ölçüm sisteminin fotoğrafı

2.16 Silindir-içi Gaz Basınçlarının Ölçülmesi

Şekil 3.13’ten de görüleceği üzere, silindir-içi gaz basınçları, Kistler marka 6502C model 5x0.5mm basınç sensörü ile ölçülmüş ve yine Kistler amplifier yardımıyla elde edilen veriler Lecroy marka bir osiloskop yardımıyla kaydedilmiştir. Aşağıdaki Şekil 3.11’de gösterilen osiloskop yardımıyla, kayıt altına alınan silindir içi basınç verileri, Matlab programında çalışacak uzantıya dönüştürülebilmekte ve böylece elde edilen silindir içi gaz basınç verileri enkoderdan elde edilen sinyaller ile eşleştirilebilmektedir. Enkoder, Şekil 3.11’de de görüldüğü gibi, ½ krank açısı hızı ile döndürülmüş ve artımsal kodlayıcı (incremental encoder) konum sinyali sıkıştırma sırasında üst ölü noktaya ayarlanmış ve 360 pulse’lık bir enkoder kullanılmıştır. Enkoderin hem zero sinyali, hem de A kanalından çıkan 360 pulse’lık sinyali, basınç sensöründen elde edilen datalarla beraber kayıt edilmiştir. Ayrıca, motor yükleme düzeneği (dinamometre) üzerine ikinci

bir proximetre sensörü takılarak, motor devri aynı zamanda gösterge panosunda okunmuştur.



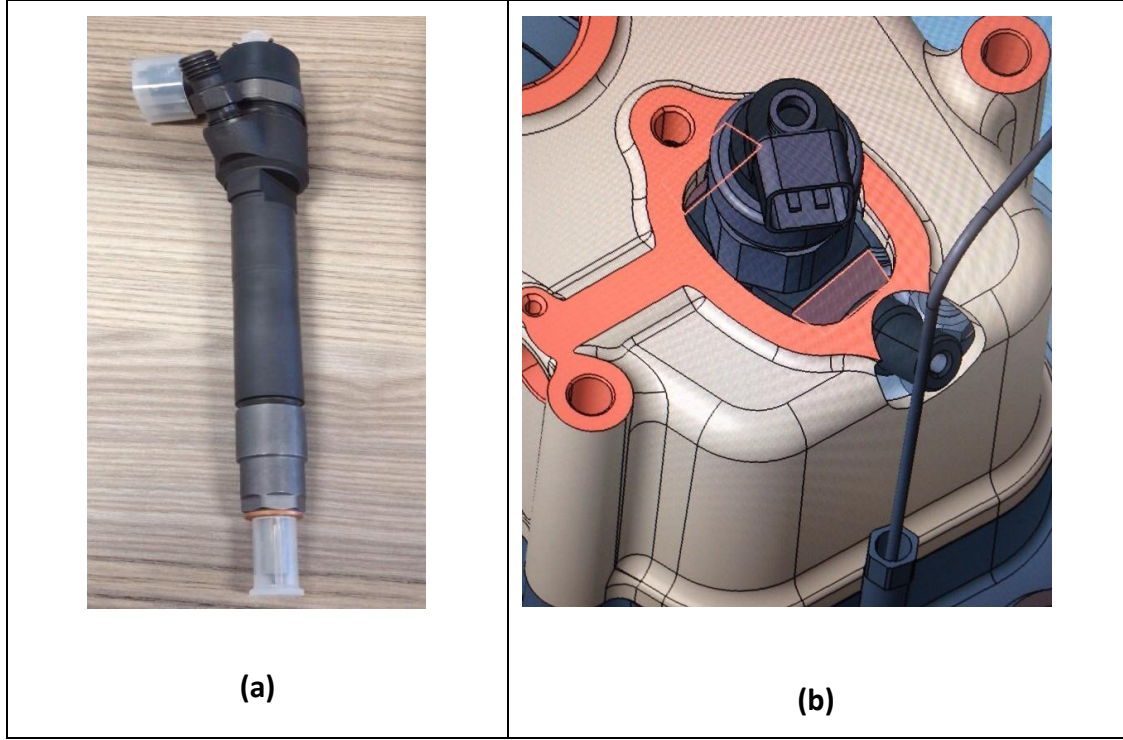
Şekil 3. 13 Silindir içi gaz basıncı ölçüm sistemi

2.17 Gösterge Panosu

Aşağıdaki Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, motor üzerine yerleştirilen sensör ve ekipmanların gösterge panelleri tek pano üzerine toplanmıştır. Kütlesel hava debisi, , yakıt debisi, motor hızı, egzoz sıcaklığı, motor giriş ve çıkış sıcaklıkları, metan debimetresi, Azot ve CO₂ gaz debileri, rotametreler ve fark basınç değerleri bu panodan gözlemlenmiştir.



Şekil 3. 14 Motor gösterge panosu



Şekil 3. 16 Elektromanyetik dizel enjektör fotoğrafı ve şematığı

2.20 Beş Gaz Emisyon Ölçüm Cihazı

Aşağıdaki Şekil 3.17’den görüldüğü gibi, CO, CO₂, HC, O₂ ve NO_x egzoz emisyonları, AVL Digas 4000 egzoz emisyon cihazı ile ölçülmüştür. Cihaz, O₂ ve NO_x emisyonlarını elektrokimyasal metot ile ölçerken, CO, CO₂ ve HC emisyonlarını infrared (kızılötesi) metotla ölçmektedir. AVL Digas 4000, CO emisyonunu % 0.01 (hacim), CO₂ emisyonunu % 0.1 (hacim), HC emisyonunu 1 ppm, NO_x emisyonunu 1 ppm, O₂ emisyonunu % 0.01 (hacim), lamdayı 0.001 ve motor hızını 10 d/d hassasiyette ölçebilmektedir.



Şekil 3. 17 AVL Digas 4000 Egzoz Emisyonu Ölçer

2.21 İs Emisyonu Ölçümü

Aşağıda görüldüğü gibi, AVL marka 415S model is ölçer kullanılmıştır. Egzoz hattı üzerinden, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, bir is emisyonu probu Şekil 3.18’de de görüldüğü gibi 90 derece açıyla egzoz tahliye hattına yerleştirilmiştir. Cihaz çalışma prensibi olarak, filtre kâğıdının siyahlaşmasından bir fotoelektrik sensör yardımıyla FSN veya mg/m³ olarak is emisyonu miktarını vermektedir. AVL 415S İs ölçüm cihazı; 0 ila 10 FSN ölçüm is ölçüm aralığında, 0.001 FSN hassasiyet değerinde is ölçümü yapabilmektedir. Cihaz, egzoz gazından aldığı belli hacimdeki egzoz örneğini bir kâğıt filtre üzerinden geçirir ve filtrenin opaklığını optik reflektometre ile algılar.



Şekil 3. 18 AVL 415S İs Emisyonu Ölçer

2.22 Sıcaklık Ölçümü

Motor soğutma suyu giriş ve motor soğutma suyu çıkış sıcaklıkları Şekil 19’da görüleceği üzere T tipi ısıçift kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3. 19 Soğutma suyu termokupl bağlantıları

Şekil 3.20’den de görüleceği üzere, egzoz manifolduna, egzoz gaz sıcaklığını ölçebilmek için 1200°C sıcaklığa kadar çalışabilen K tipi ısıçift kullanılmıştır.



Şekil 3. 20Egzoz hattı termokupl bağlantısı

Motor emme havası giriş sıcaklığı da T tipi ısıçift kullanılarak ölçülmüştür.

2.23 Veri Toplama Sistemi

Gerçekleştirilen deneylerde, motor hızı, yük hücresi, egzoz ve soğutma suyu sıcaklıkları ve emisyon değerleri Labview 2010 programı ile geliştirilen arayüzle okunmuş ve de kayıt altına alınmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalarda Şekil 3.21’ den de görüleceği üzere, National Instruments marka USB-6215 model elektronik kart ile deneyler esnasında toplanan verileri

bilgisayarın işlem gerçekleştirebileceği veriler haline çevirmeyi sağlayan Labview yazılımlı bir veri toplama kartıdır.



Şekil 3. 21 National Instruments marka USB-6215 tipi veri toplama kartı

Ayrıca, Şekil 3.22’de görülen, National Instruments marka cDAQ model ve 8 kanal bulunan kompakt şasi kullanılmıştır. Söz konusu kanallara yerleştirilen uygun modüllerle veri toplanabilmektedir. Modüle bağlanan ısılıçiftler ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 22 National Instruments cDAQ modül şasisi

Ayrıca, AVL Digas 4000 gaz analiz cihazı ve AVL 415 S filtre tipi is ölçüm cihazlarıyla elde edilen ölçümler Labwiev 2010 programı üzerinden kayıt edilmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1 Deneysel Çalışmalar

Normalde mekanik yakıt sistemine sahip olan dizel test motoru, elektromanyetik dizel enjektörleri ve common-rail yakıt sistemi yerleştirilerek, kendi imkânlarımızla geliştirilen enjektör sürücü ve elektronik kontrol ünitesi ile elektronik olarak kontrol edilebilen common-rail yakıt sistemine dönüştürülmüştür.

Deneylerin ilk aşaması, farklı motor hızlarında, yalnız motorinin yakıt olarak kullanılmasıyla, enerji içeriği olarak toplam yakıtın %25' i kadar ve %50' si kadar doğalgaz, metan ve farklı içeriklerde biyogazın motorinle beraber çift yakıt olarak kullanılması ile yapılan motor performans deneylerinden oluşmaktadır. Deneylerin bir sonraki aşamasında ise, 1300 d/d motor hızında, 1400 d/d motor hızında ve 1500 d/d motor hızında, doğalgazın yüzdesel olarak toplam yakıtın enerji içeriğine oranı ve yine aynı hızlarda kısmi yüklerde (maksimum güç değerinin belli oranlarında) enerji içeriği olarak belli bir enerji içeriği oranında doğalgaz gönderilmiştir.

Gönderilen motorin yakıtında ve motorin-doğalgaz çift yakıtında, birim çevrimde gönderilen enerji içeriği sabit tutulmuştur. Yani, yakıtın enerji içeriği hesaplanarak, gönderilen dizel yerine, yine aynı ısı değeri verecek kadar doğalgaz silindir içerisine gönderilmiştir. Çalışmalardan önce çalışma sıcaklığına (rejim sıcaklığına) ulaşana dek ısıtılmıştır ve ardından testler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen her test, 3 farklı zamandaki tekrarlanmış olup, her bir çalışmada, her bir çalışma noktası için onlarca veri alınmış ve ortalama değerler çalışmalarda kullanılmıştır. 1300 d/d, 1400 d/d ve 1500

d/d motor hızları, Avrupa Stasyonere Motor Çevrimi (ESC) tarafından belirlenen devirlerde seçilmiştir.

ESC, 13 mod kararlı şartta çalışma çevrimidir ve ağır hizmet görevlerinde çalışan dizel motorların testinde kullanılır. Rölanti şartı da dahil olmak üzere, motor için hesaplanan üç farklı motor hızında, %25, %50, %75 ve %100 motor yükünde testler gerçekleşir. Daha sonra, ağırlık faktörüne göre elde edilen emisyon değerlerinden, motorun hangi Euro emisyonu sınıfına girdiği belirlenir.

1300, 1400 ve 1500 d/d motor hızı çalışma şartlarında, motor torku değeri aynı tutularak, emisyon ve termik verimin daha açık şekilde yorumlanabilmesi sağlanmıştır. Yanma karakteristiği için tüm deneylerde, ısı açığa çıkış oranı ve silindir içi basınç datalarından yararlanarak, yanmanın evreleri (tutuşma gecikmesi, kontrolsüz yanma, kontrollü yanma ve art yanma) incelenmiştir.

Gerçekleştirilen performans testlerinde, mekanik yakıt sistemli motor testi ile elde edilen sonuçlar ve dizel ve gaz enjektörlerinin püskürtme karakteristikleri ile elde edilen verilerden de yararlanılarak; motor common-rail test düzeneğine çevrildikten sonra, yalnız motorin (%0 doğalgaz), enerji içeriği olarak %25 doğalgaz ve %50 doğalgaz olmak üzere 3 ayrı koşulda ve 16°, 20°, 24° ve 28° olmak üzere 4 farklı püskürtme avansında ve 1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d, 1700 d/d, 1900 d/d, 2100 d/d, 2300 d/d, 2500 d/d ve 2700 d/d motor hızları olmak üzere, 9 farklı motor hızında ve de 1.5ms, 1.75ms ve 2ms elektromanyetik dizel enjektörü püskürtme miktarlarında performans testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, motor gücü, motor torku, özgül yakıt tüketimi, termik verim, emisyonlar (CO, CO₂, THC, NO_x ve İ_s), basınç dataları ve ısı açığa çıkış oranı açısından karşılaştırılmıştır.

4.1.1 Performans Deneyi

Farklı motor hızlarında (1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d, 1700 d/d, 1900 d/d, 2100 d/d, 2300 d/d, 2500 d/d ve 2700 d/d motor hızı), yalnız motorin yakıtının ve motorin+doğalgaz (metan) karışım yakıtının dizel test motorunda kullanılmasıyla elde edilen motor frenleme gücü, motor frenleme torku, özgül yakıt tüketimi, termik verim, CO, CO₂, THC, NO_x, is değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarında, %0 CH₄ (veya

doğalgaz) yalnız motorinin yakıt olarak kullanılması durumunu, %25 CH₄ ise, silindir içerisine gönderilen toplam yakıtın enerji değerinin %25'ini CH₄'ün oluşturması durumunu, %50 CH₄ ise, içerisine gönderilen toplam yakıtın enerji değerinin %50'sinin CH₄'ü oluşturması durumunu göstermektedir. Gönderilen CH₄ miktarı, vuruntu, alev tepmesi, erken ateşleme yaratan durumlar görülmemesi için %50 enerji içeriği ile sınırlı tutulmuştur. Gönderilen CH₄ miktarı, enerji içeriği olarak aşağıdaki denklemle bulunmuştur [79]:

$$Gönderilen \%CH_4 = \frac{E_{CH_4}}{E_{CH_4} + E_M} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Burada E_{CH_4} metan enerjisinin akışını (J/d), E_M ise gönderilen motorin enerjisinin akışını (J/d) göstermektedir [79].

Yakıtın alt ısı değeri, aşağıdaki Mendeleev formülasyonuna [80], gönderilen CH₄' ün de 1kg karışım yakıtının içerisinde yer aldığı kabul edilerek hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar yakıtın kütleli oranlarından ve alt ısı değerlerinden hesaplanarak elde edilen sonuçlarla çok yakın olduğu bulunmuştur.

$$H_u = 33.91C + 125.60H - 10.89(O - S) - 2.51(9H + w) \quad (4.2)$$

Egzoz emisyonu test cihazı (AVL DiGas 4000) üzerinden okunan lamda değeri, petrol yakıtlar için genel bir değer vermekle beraber, özellikle CH₄'ün (veya doğalgazın) gönderildiği durumlarda hata oranının artacağı göz önünde bulundurularak, cihaz üzerindeki lamda değeri kullanılmamıştır. Lamda değeri, aşağıdaki denklem ile teorik olarak hesaplanmıştır ve gaz yakıt ilavesi ile elde edilen lamda değerinde düşüş meydana gelmesine rağmen, yalnız motorin ile çalışma şartlarındakine mümkün olduğunca yakın tutulmaya çalışılmıştır [81].

$$\lambda_{teorik} = \frac{V_{hava}\rho_{hava}}{V_{CH_4}\rho_{CH_4}AF_{CH_4} + V_{motorin}\rho_{motorin}AF_{motorin}} \quad (4.3)$$

Deney sonuçlarında, AVL DiGas 4000 emisyon cihazı, CO, CO₂ ve O₂ sonuçlarını % hacim verirken, NO_x ve HC sonuçlarını ise ppm olarak vermektedir. İS emisyonları ise, AVL 415 S cihazı ile FSN ve mg/m³ olarak elde edilmiştir.

Gerçekleştirilen tüm testlerde, 1.5ms püskürtme süresinde 75.2mg/çevrim, 1.75ms püskürtme süresinde 96.8mg/çevrim ve 2ms püskürtme süresinde 117 mg/çevrim yakıt gönderilmektedir. 1.5ms, 1.75ms ve 2ms püskürtme sürelerinde, farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde, silindir içerisine gönderilen motorin yakıtı miktarı aşağıdaki Çizelge 4.1’de verilmiştir. 1.5ms, 1.75ms ve 2ms püskürtme sürelerinde, sırasıyla 3196 J/çevrim, 4114 J/çevrim ve 4972.5 J/çevrim enerji silindirlere gönderilmektedir.

Çizelge 4. 1 Birim çevrimde motora gönderilen motorin yakıtı miktarı

Püskürtme Süresi (ms)	Yalnız motorin için gönderilen yakıt miktarı (mg/çevrim)	Enerji İçeri Olarak %25 Gaz Yakıt Şartında Motora Gönderilen Motorin Miktarı (mg/çevrim)	Enerji İçeri Olarak %50 Gaz Yakıt Şartında Motora Gönderilen Motorin Miktarı (mg/çevrim)
1.5	75.2	56.4	37.6
1.75	96.8	72.6	48.4
2	117	87.75	58.5

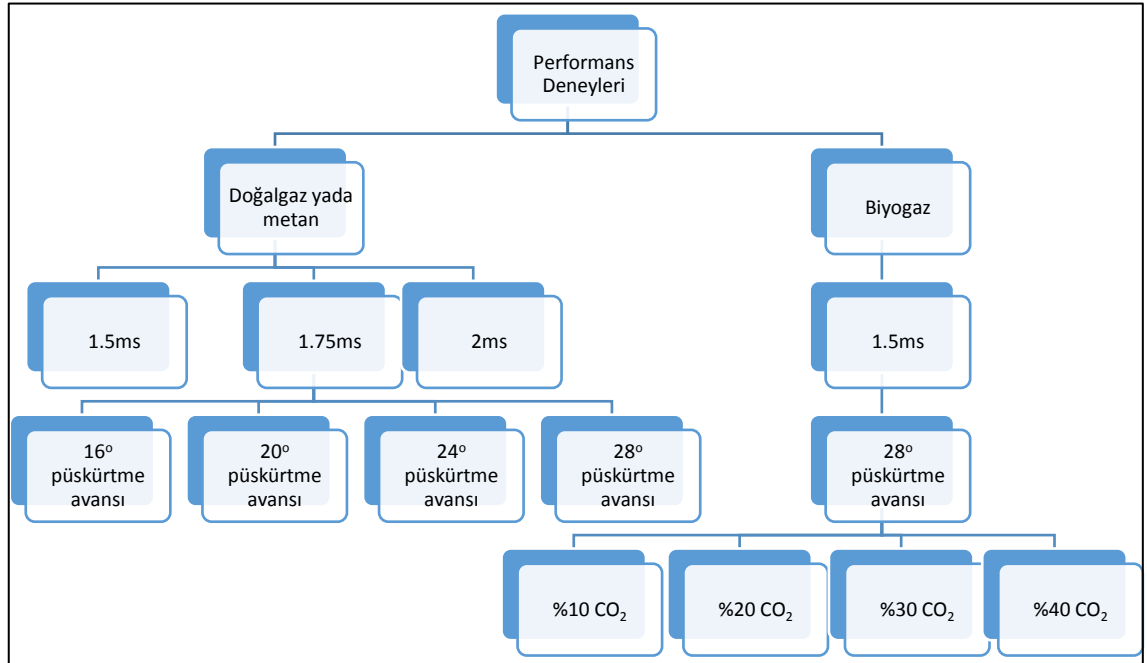
1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d, 1700 d/d, 1900 d/d, 2100 d/d, 2300 d/d, 2500 d/d ve 2700 d/d motor hızı değerlerindeki soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları aşağıda Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4. 2 Soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları

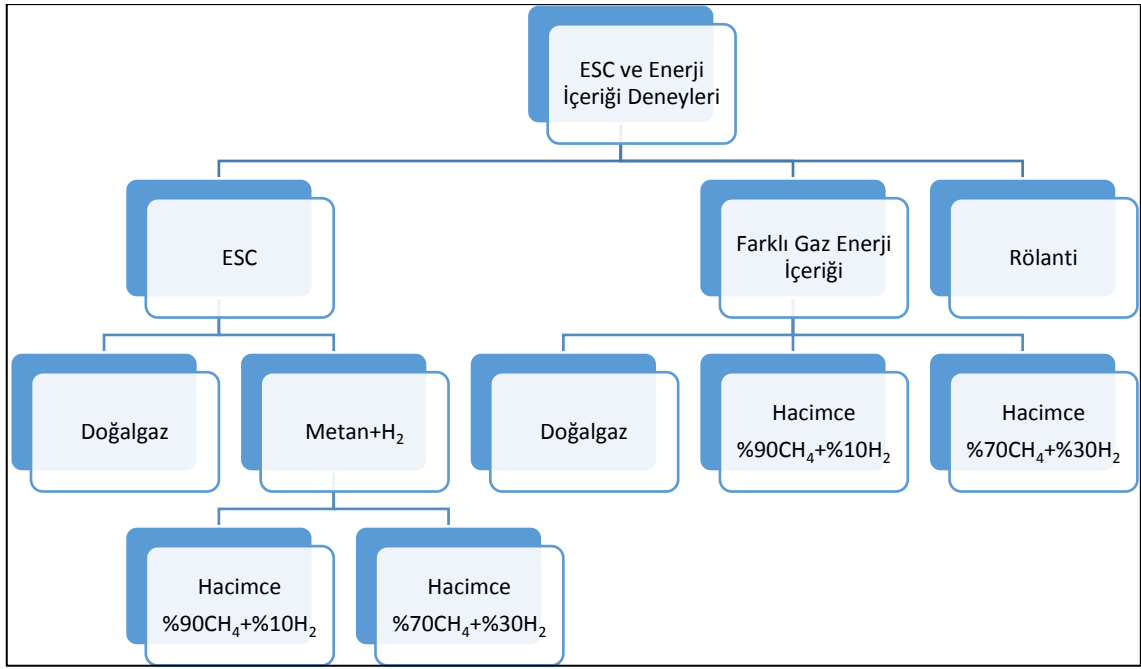
Soğutma suyu giriş sıcaklığı (°C)									
	1100 d/d	1300 d/d	1500 d/d	1700 d/d	1900 d/d	2100 d/d	2300 d/d	2500 d/d	2700 d/d
%0 Gaz yakıt (yalnız motorin)	64	68	65	67	68	69	69	70	69
%25 Gaz yakıt	66	68	68	66	67	70	70	69	70
%50 Gaz yakıt	65	68	67	68	68	70	71	68	71
Soğutma suyu çıkış sıcaklığı (°C)									

%0 Gaz yakıt (yalnız motorin)	81	82	79	81	83	84	84	86	87
%25 Gaz yakıt	82	81	80	82	81	85	85	87	87
%50 Gaz yakıt	80	81	79	82	81	85	86	87	86

Deney şartları, farklı motor hızlarındaki (1100d/d ila 2700d/d motor hızı arasında) motor performans deneyleri (1.5ms, 1.75m ve 2ms püskürtme süreleri için ayrı ayrı), ESC çevrimi deney sonuçları, enerji içeriği deneyleri, farklı gaz yakıt enerji oranları, rölanti olmak üzere oluşmaktadır. Gerçekleştirilen deneylerde, gaz yakıt olarak doğalgaz, metan, biyogaz ve hidrojen+metan karışım gaz yakıt kullanılmıştır. Deney şartları için, performans deneylerinin şematığı aşağıda Şekil 1’de, ESC ve enerji içeriği deneylerinin şematığı ise Şekil 4. 2’de verilmiştir.



Şekil 4. 1 Performans deneylerinin çalışma şartları

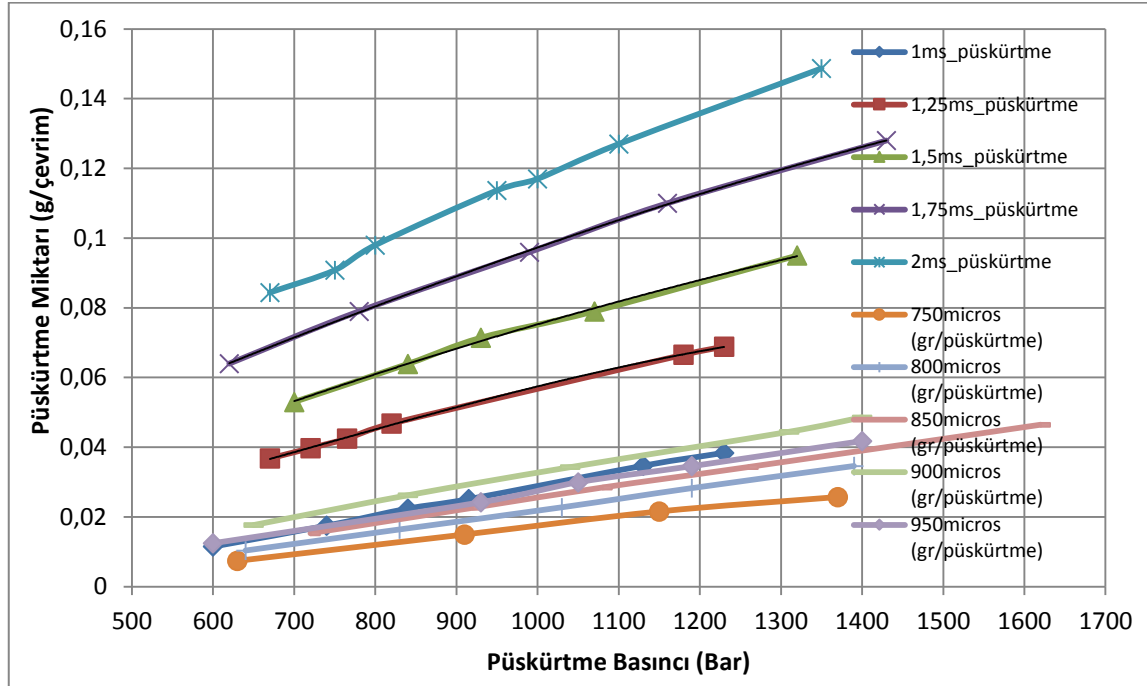


Şekil 4. 2 ESC ve enerji içeriği deneyleri

4.1.2 Dizel Enjektör Kalibrasyonu

Yapılan deneysel çalışmalarda, ilk olarak geliştirilen dizel yakıt simülatörü farklı basınçlarda ve farklı püskürtme sürelerinde çalıştırılarak, bir çevrimde yani bir sefer püskürtmede ne kadar yakıt silindir içerisine püskürtüldüğü deneysel olarak hesaplanmıştır. Yapılan çalışmada, elektrik motoru 1500 d/d sabit motor hızında çalıştırılırken, dizel enjektörü açık kalma süreleri ve rail basınçları değiştirilerek her bir çevrimde püskürtülen yakıt miktarı hesaplanmıştır. Deneylerde, süre tutularak püskürtülen dizel yakıt miktarı bir kap içerisinde biriktirilmiş ve o süre boyunca yapılan püskürtme sayısından yola çıkılarak, bir hassas terazi yardımıyla (1/10000 gr hassasiyetinde) birim çevrimde enjektörlerden püskürtülen yakıt miktarı bulunmuştur. Elde edilen grafikler, 750 ms ile 1.5ms arasındaki enjektör açık kalma süreleri için ve 600 ila 1600 bar arasındaki püskürtme basınçları için test edilmiştir. 1 ms altındaki enjektör açık kalma sürelerinde, enjektörün kararsız çalıştığı görülmüştür. Yapılan deneysel çalışmalarda, enjektörlerin açık kalma süreleri, Arduino Due kartı vasıtasıyla Pic işlemci ile kendi el emeğimiz ile yapılan kartların kontrol edilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Bu sayede hızlı bir şekilde ve motor deneylerinde de motor stop edilmeden deneyler gerçekleştirilebilmiştir. Diğer taraftan, aşağıdaki Şekil 4.3'te

verilen enjektör püskürtme miktarlarının yapılan ön testlerde bilinmesiyle, gönderilecek olan yakıt miktarı belirlenebilmiştir. Ayrıca, motorin yakıtının alt ısı değerinden de yararlanılarak, testler esnasında gönderilecek motorin yakıt miktarının enerji değeri belirlenebilmiştir.

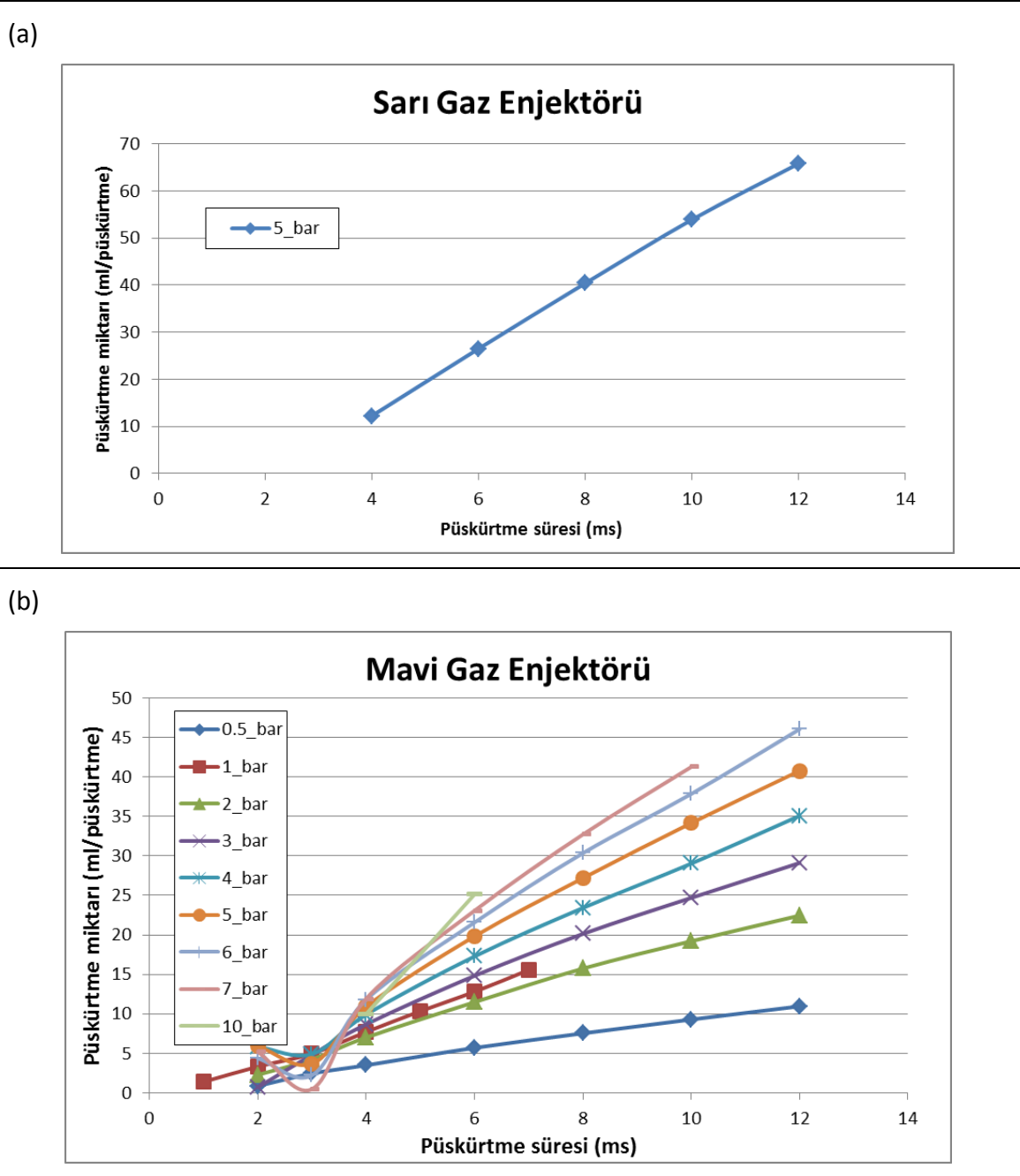


Şekil 4. 3 Dizel enjektörü püskürtme karakteristiği eğrileri

4.1.3 Gaz Enjektörü Kalibrasyonu

Gaz enjektörü olarak Keihin marka LPG-CNG enjektörleri ilk olarak test edilmiştir. Yapılan testlerde, motor 2400 d/d motor hızında dönüyormuş gibi Arduino Due elektronik kart yardımıyla sinyal gönderilerek, Pic işlemci ile ve kendi el emeğimizle yapılan enjektör sürücü kartla enjektörlerin açık kalma sürelerine bağlı olarak püskürtme miktarları bulunmuştur. Yapılan testlerde, gaz enjektörlerinin 4ms altındaki püskürtme sürelerinde stabil çalışmadığı gözlemlenmiştir. Deneylerde daha çok mavi renkli enjektör seçildiği için, mavi renkli Keihin gaz enjektörünün farklı basınç ve püskürtme sürelerindeki bir çevrimdeki (bir püskürtme) püskürtme miktarı ml olarak aşağıdaki Şekil 4.2'de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Ayrıca, daha yüksek debiye sahip olan sarı renkli Keihin gaz enjektörü, yalnız 5 bar sabit basınç değerinde aşağıda görüldüğü gibi test edilmiştir. Böylece, gaz hattı basıncına ve enjektörün açık kalma süresine bağlı olarak püskürtülen gaz yakıt miktarının debisi önceden bilinebilmektedir.

Diğer taraftan, gaz yakıtın alt ısı değerinden de yararlanılarak, testler esnasında gönderilecek gaz yakıt miktarının enerji değeri belirlenebilmiştir.



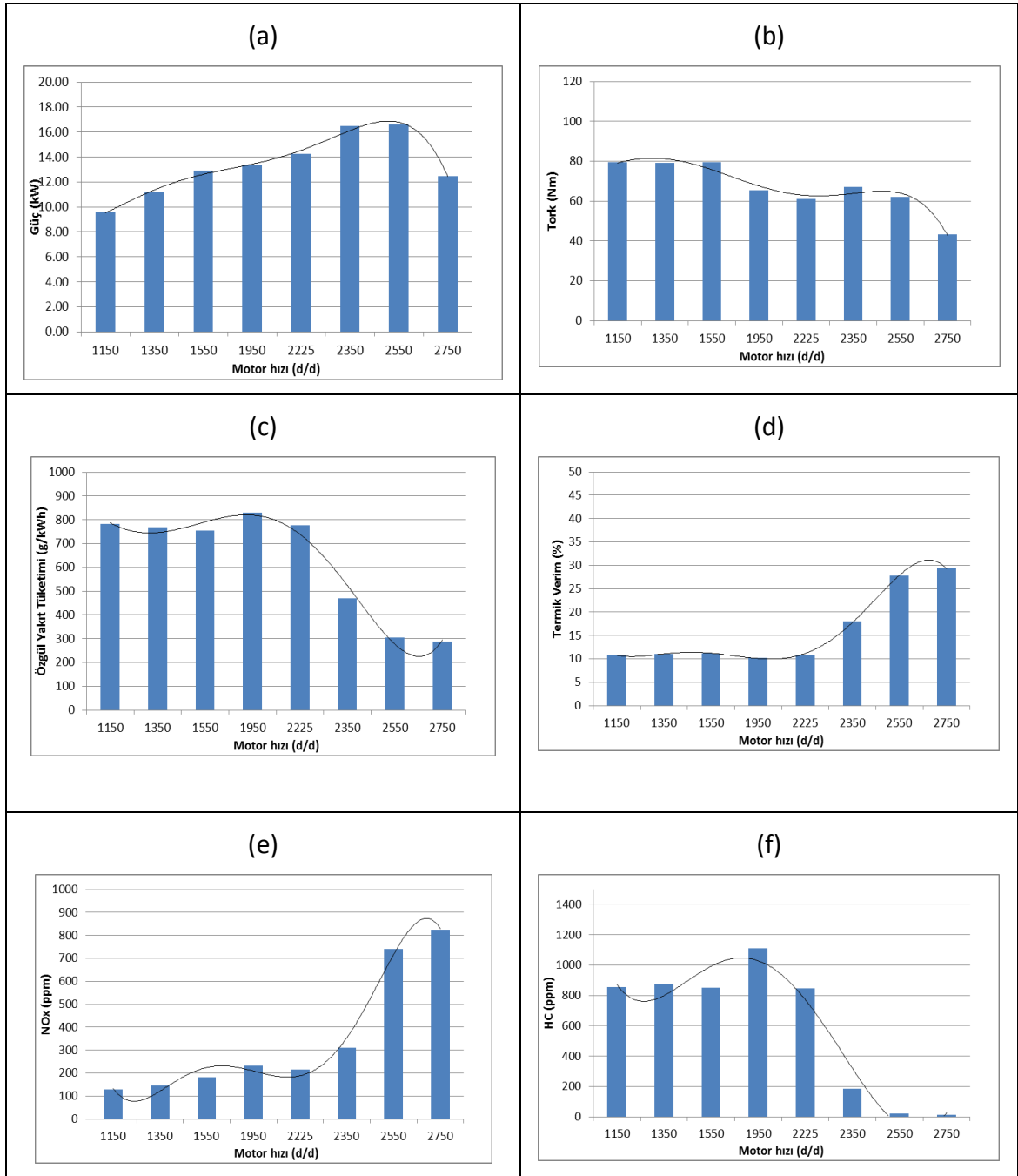
Şekil 4. 4 Gaz enjektörü püskürtme karakteristiği

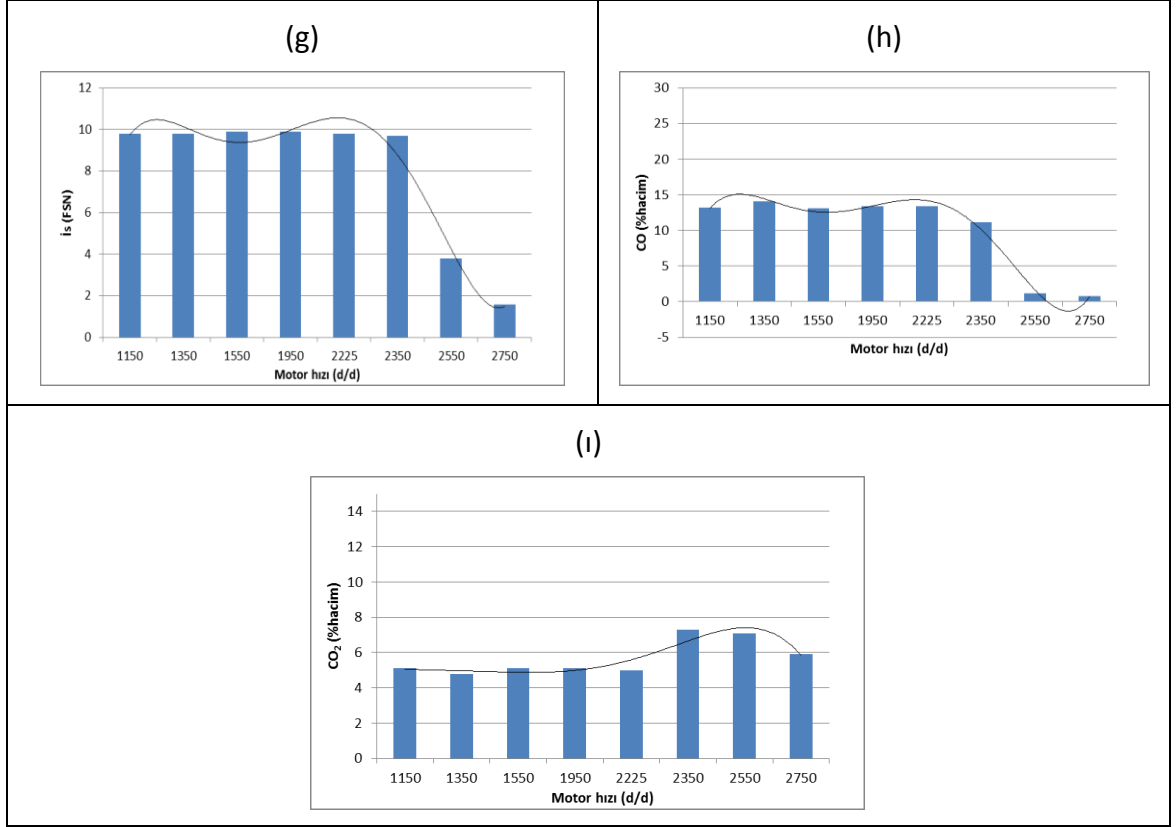
(a) Sarı renkli gaz enjektörünün püskürtme karakteristiği eğrisi

(b) Mavi renkli gaz enjektörünün püskürtme karakteristiği eğrileri

4.1.4 Mekanik Yakıt Sistemli Motorun Test Sonuçları

İlk aşamda, motorun üzerindeki mekanik yakıt pompası ve mekanik enjektör ile devre bağlı olarak elde edilen güç, tork ve özgül yakıt tüketimi eğrileri yardımıyla, yakıtların (doğalgaz ve motorin) alt ısı değerinden hesapla, elektronik enjektör ile silindir içerisine ne kadar yakıt püskürtüleceği öngörülebilmiştir. Mekanik yakıt pompası ve mekanik enjektör ile elde edilen motor gücü, motor torku ve özgül yakıt tüketimi değerleri, yalnızca motorin yakıtı için aşağıdaki Şekil 4.3'te gösterilmiştir.





Şekil 4. 5 Mekanik dizel yakıt sistemli motorun performans ve emisyon grafikleri

- (a) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (c) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (e) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (f) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (g) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (h) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (i) Mekanik dizel yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi

4.1.5 Common-rail Yakıt Sistemine Çevrilmiş Motorun Doğalgaz-Motorin Çift Yakıtlı Performans Deney Sonuçları

4.1.5.1 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları

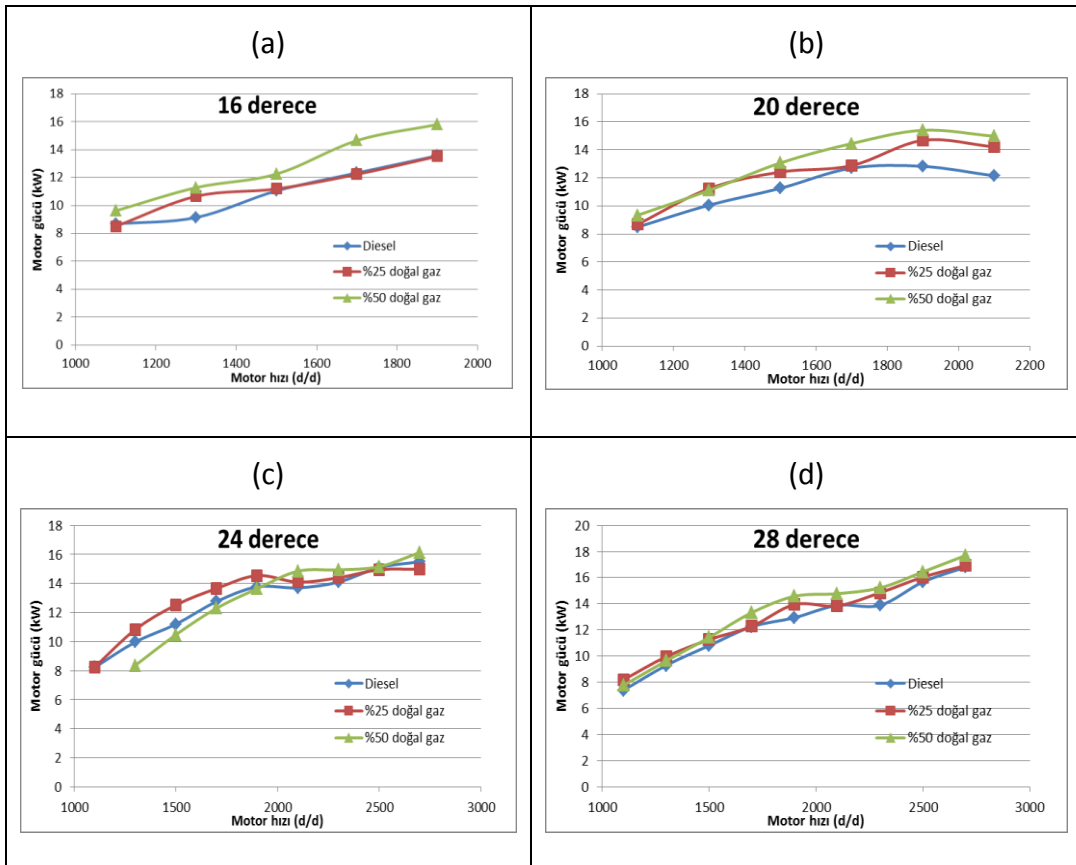
Yukarıda belirtildiği gibi, mekanik yakıt sistemli bir motordan elde edilen sonuçlar ve dizel ve gaz enjektörlerinin kalibrasyonları ile elde edilen veriler yardımıyla; motor common-rail test düzeneğine çevrildikten sonra, yalnız motorin (%0 metan), %25 metan ve %50 metan olmak üzere 3 ayrı koşulda ve 16°, 20°, 24° ve 28° olmak üzere 4 farklı püskürtme avansında; 1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d, 1700 d/d, 1900 d/d, 2100 d/d, 2300 d/d, 2500 d/d ve 2700 d/d motor hızı olmak üzere, 9 farklı motor hızında test

edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, motor gücü, motor torku ve termik verim açısından karşılaştırılmıştır. Şekil 4. 6'te görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile motor gücünde tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde herhangi bir düşüş meydana gelmediği gibi, bazı çalışma noktalarında motor gücünde artış meydana gelmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %16.6 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %23.4 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18.9 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9.8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %11.7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10.8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %12.7 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4. 7'te ise motor torku verilmiştir. Yine elde edilen sonuçlardan, motor torkunda doğalgaz ilavesi ile bir düşüş meydana gelmediği gibi, yer yer çalışma noktalarında motor torku değerinin arttığı da görülmektedir. Maksimum tork artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %12 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %20 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,7 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,5 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9.4 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,8 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %11,2 artış meydana geldiği bulunmuştur.

Şekil 4. 8’da ise termik verim değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde genellikle termik verimde düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle düşük püskürtme avanslarında, doğalgaz ilavesi ile motor gücünde bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum verim düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %24 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %27,7 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,1 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %22,2 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,1 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %27 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %32,7 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %38,1 düşüş meydana geldiği bulunmuştur.

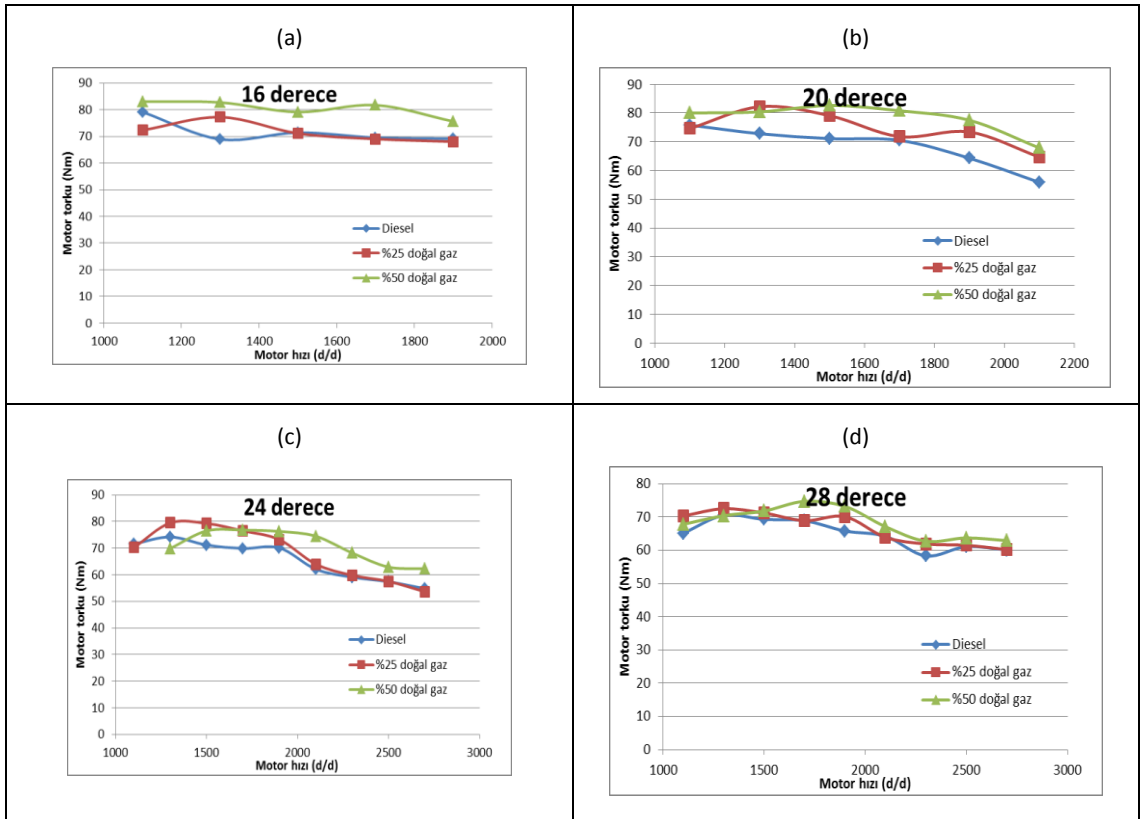
Şekil 4.9’de ise özgül yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Maksimum özgül yakıt tüketimi artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %31,6 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %40,3 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,7 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %40 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %39 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %44,4 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48,5 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %61,5 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre aynı motor hızlarında özgül yakıt tüketiminin doğalgaz ilaveli şartlarda,

dizel yakıtına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, motor devri yükseldikçe özgül yakıt tüketimlerinde azalma gözlemlenmiştir. Gaz yakıtın yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığıyla, gaz konsantrasyonu yüksek olsa dahi alev ilerlemesini ve kendi kendine tutuşmayı kötüleştirmektedir. [63] Diğer taraftan, pilot püskürtmeyle gönderilen dizel yakıtının düşmesi özellikle düşük yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur. [74] Shan vd. [66] yapmış olduğu çalışmada, EGR oranı arttıkça termik verimin azaldığı görülmektedir.



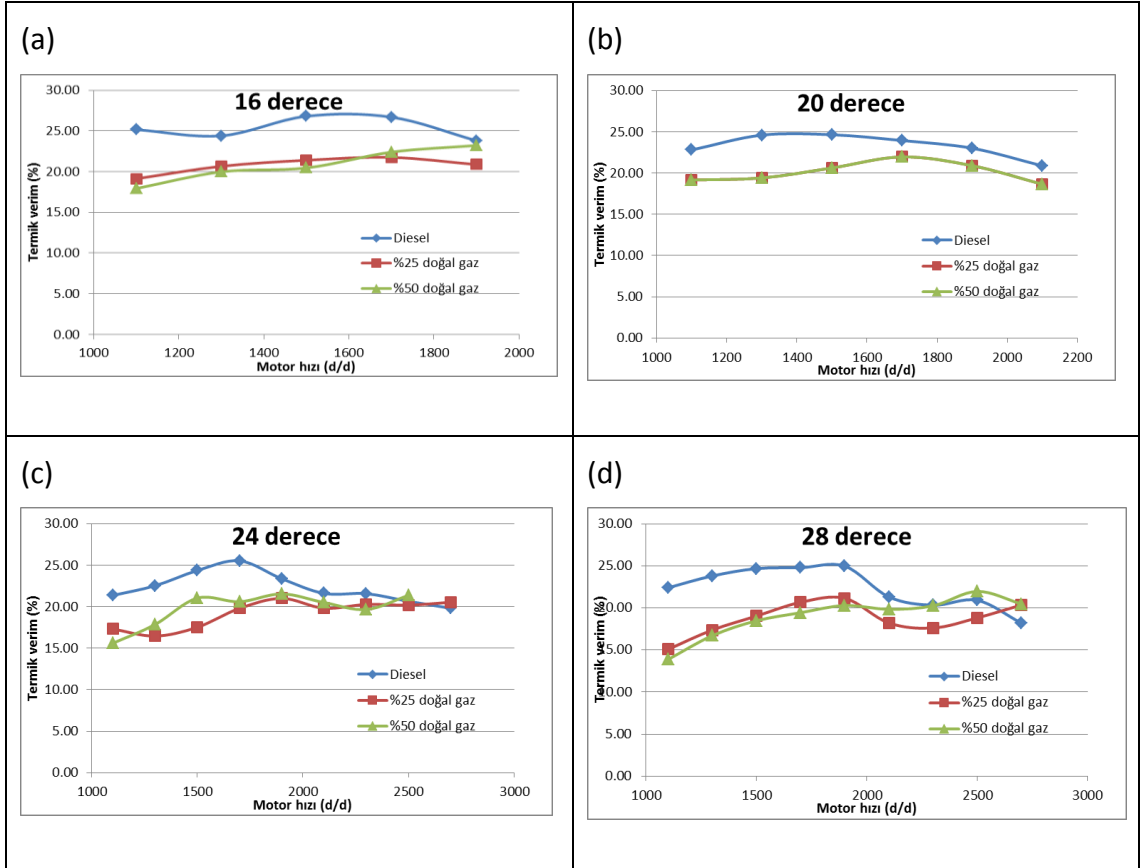
Şekil 4. 6 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



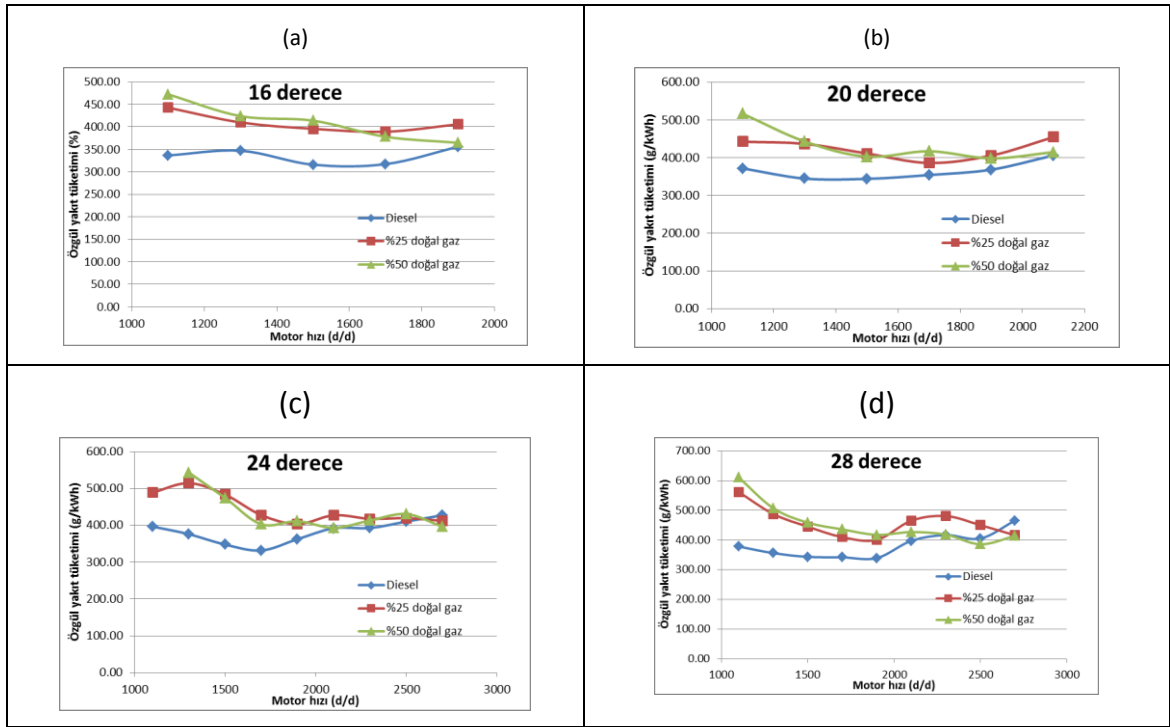
Şekil 4. 7 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 8 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Sekil 4. 9 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.10’de görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile karbon monoksit miktarlarında tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde artış meydana geldiği görülmüştür. Maksimum CO emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %600 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %800 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %1450 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %1050 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %618,2 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %344,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %385,7 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %335,8 artış meydana geldiği bulunmuştur.

Gaz yakıt ilavesiyle, volümetrik verimin düşmesiyle gerekli olan oksijenin azalmasından dolayı CO'nun CO₂'ye oksidasyonu daha az gerçekleşmekte, dolayısıyla CO emisyonlarında artış görülmektedir. Motor hızı arttıkça kimyasal reaksiyon süresi kısaltmakta ve eksik yanma meydana gelerek CO emisyonları artmaktadır. [72] Hernandez vd. [63] yapmış olduğu çalışmada, CH₄ miktarı arttıkça, CO emisyonunda artış gözlemlendiğini bulmuşlardır.

Şekil 4.11'de ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karbondioksit miktarında doğalgaz ilavesi ile dizel yakıtı arasında kayda değer bir fark olmadığı görülmektedir. Ancak, genellikle doğalgaz ilavesiyle motor gücünün de arttığı göz önünde bulundurulduğunda, özgül karbondioksit emisyonlarında düşüş meydana geleceği öngörülmektedir.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70]. Diğer taraftan, gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

Şekil 4.12'de ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, doğalgaz ilavesi ile hidrokarbon oranında artış görülürken; hem doğalgaz-motorin çift yakıtı şartlarında, hem de yalnız motorin yakıtı şartlarında, artan motor devirlerinde genellikle hidrokarbon miktarı seviyelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Doğalgaz + motorin yakıtı kullanımında, yalnız motorin yakıtı kullanımına göre daha fazla CO emisyonu oluşuyor, nedeni alev hızının çift yakıt kullanımında daha düşük olması, bu nedenle yalnız motorin yanmasına göre daha verimsiz yanmanın gerçekleşmesidir. HC emisyonları için de karakteristik CO ile aynıdır. Doğalgaz miktarı arttıkça, HC emisyonunda ciddi artış meydana gelmektedir. Metanın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından ve süpap bindirmesi esnasında bir kısmının dışarı kaçmasından tam yanma gerçekleşemeyip, emisyon miktarı artmaktadır. Diğer taraftan, motor yükü arttıkça HC emisyonları düşmektedir, çünkü silindir içi sıcaklıklar artmaktadır. Ayrıca, doğalgaz hava karışımı tam yanma için özellikle düşük yüklerde çok fakir karışım olduğu için, silindir içi sıcaklıklar düşerek HC emisyonları daha da artmaktadır. Küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle, yanması

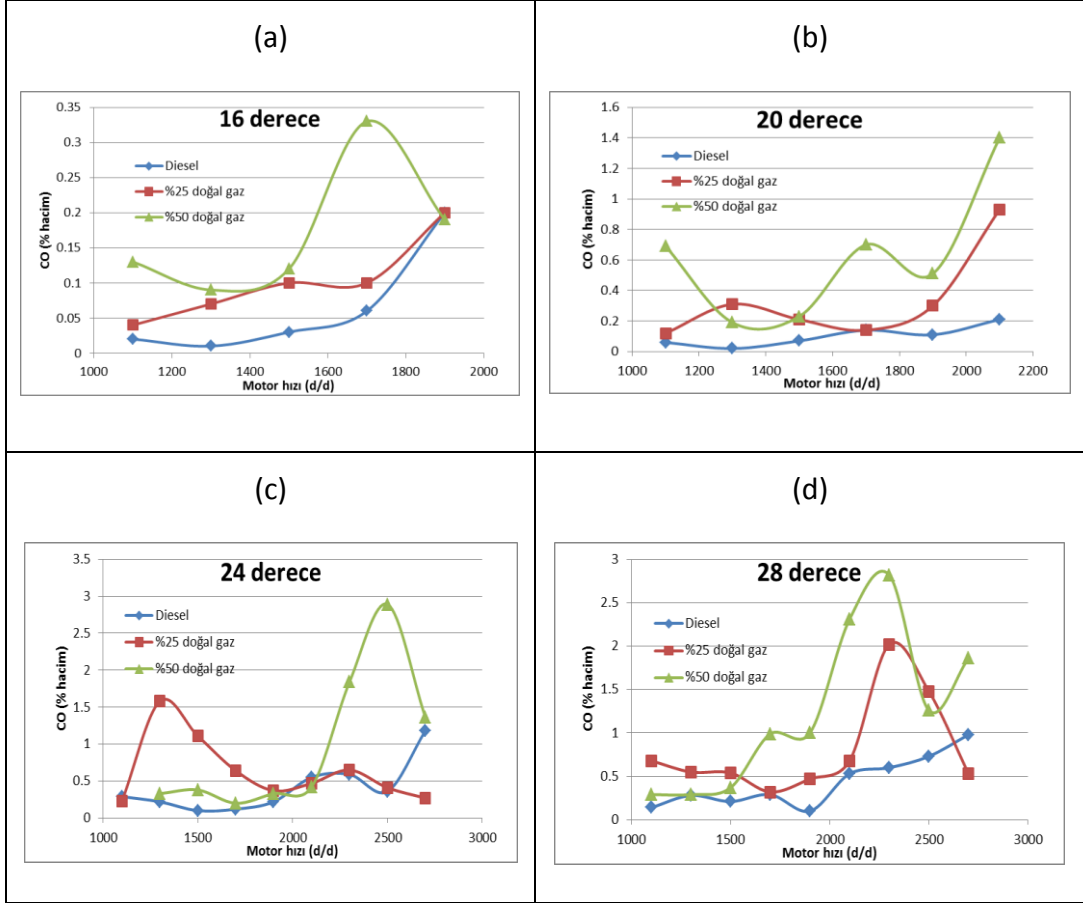
zorlaştığı için HC emisyonu miktarı artmaktadır. Diğer neden, fakir karışımda alev sönme bölgeleri arttığı için özellikle silindir cidarlarına temas eden bölgelerde eksik yanma meydana gelmektedir. (13)

Şekil 4.13’de ise NO_x emisyonları verilmiştir. Maksimum NO_x emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,4 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %46,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %30,4 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %55,9 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %47,5 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %109,7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %40,3 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %60 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre doğalgaz-motorin çift yakıt kullanımı ile dizel yakıt kullanımı arasında benzer eğri karakteristikleri elde edilirken, yüksek motor devirlerinde NO_x miktarlarında düşüşler gözlemlenmiştir. %25 doğalgaz ilavesi ile NO_x emisyonlarında düşük devirlerde yalnız motorin yakıtına göre bir miktar düşüş gözlemlenirken, %50 doğalgaz şartında ise tüm motor hızı şartlarında yalnız motorin şartına göre artış gözlemlenmiştir. NO_x oluşumu, temel olarak maksimum yanma sıcaklığına, oksijen konsantrasyonuna ve reaksiyon süresine bağlıdır. Gaz yakıt hava karışımının motorin püskürtülmesiyle gerçekleşen yanmada iki parametre önemlidir: 1- dizel difüzyon yanmasının sıcaklığı, 2- ön karışimli dolgunun lokal olarak zengin ve yüksek sıcaklık bölgeleridir. Özellikle, lokal olarak aşırı zengin karışım bölgeleri silindir içinde NO_x formasyonuna sebep olmaktadır. Bu yüzden tutuşma ve silindir içindeki sıcaklık, uygun püskürtme avansı ile kontrol altına alınabilmektedir. (8)

Şekil 4.14’de ise is emisyon değerleri verilmiştir. Maksimum is emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %69,2 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100

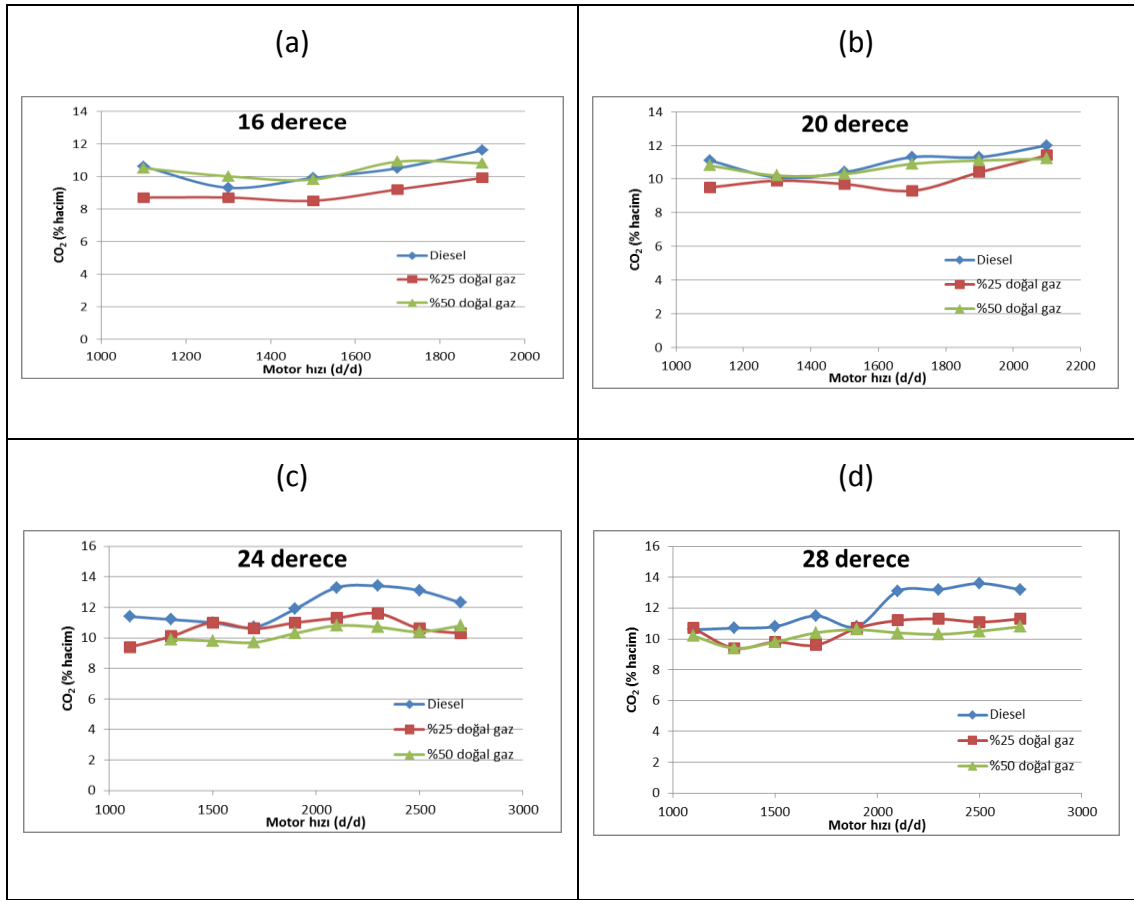
d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %486,5 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %68,4 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %64 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %120 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %91,8 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %85,7 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %92,5 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, doğalgaz ilavesi ile is miktarında düşüş gözlemlenirken; hem yalnız motorin, hem de motorin + doğalgaz çalışma şartında, motor hızı artışıyla is emisyonlarında da artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. En yüksek metan oranında en düşük değere sahiptir. Gaz yakıt miktarı arttıkça, silindir içerisine gönderilen motorin yakıtı miktarı azaldığı için, is emisyonları azalmaktadır. Çünkü, artan gaz yakıt miktarı ile dizel yerine gaz yakıtı gönderildiği için is miktarı azaltılmaktadır. Ayrıca, doğalgazın temel komponenti olan metanın parafin ailesinin en düşük is emisyonu oluşturmaya eğilimli üyesi olmasıdır.(1)

Şekil 4.15'te görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile egzoz çıkış sıcaklığında düşük devirlerde ve özellikle yüksek püskürtme avanslarında doğalgaz kullanımı ile yalnız motorin şartına göre kayda değer bir fark meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Yüksek devirlerde ve yüksek püskürtme avanslarında, artan doğalgaz oranı ile egzoz gazı sıcaklarında düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, beklendiği üzere, motor devri arttıkça egzoz gaz sıcaklıklarının tüm çalışma şartlarında (hem doğalgaz-motorin çift yakıtında, hem de yalnız motorin) artış gözlemlenmiştir.



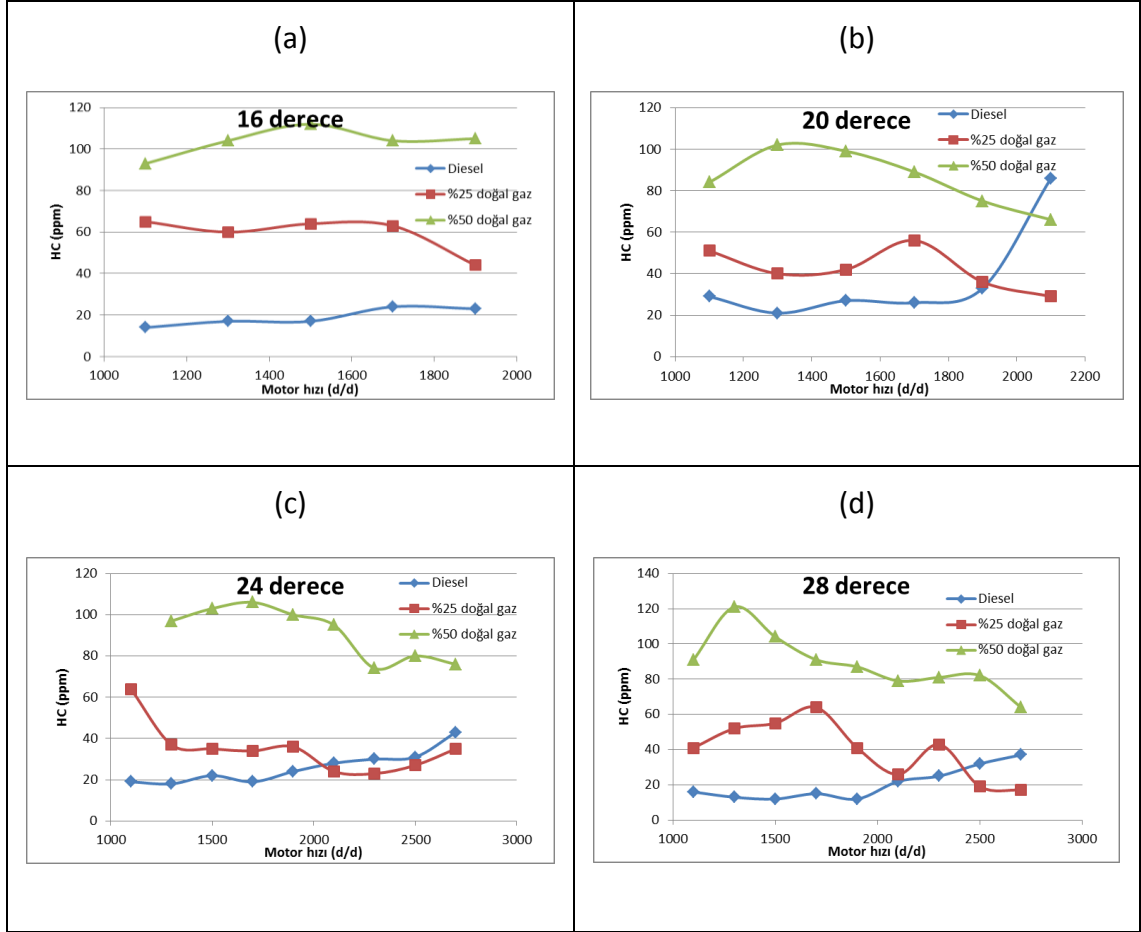
Şekil 4. 10 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



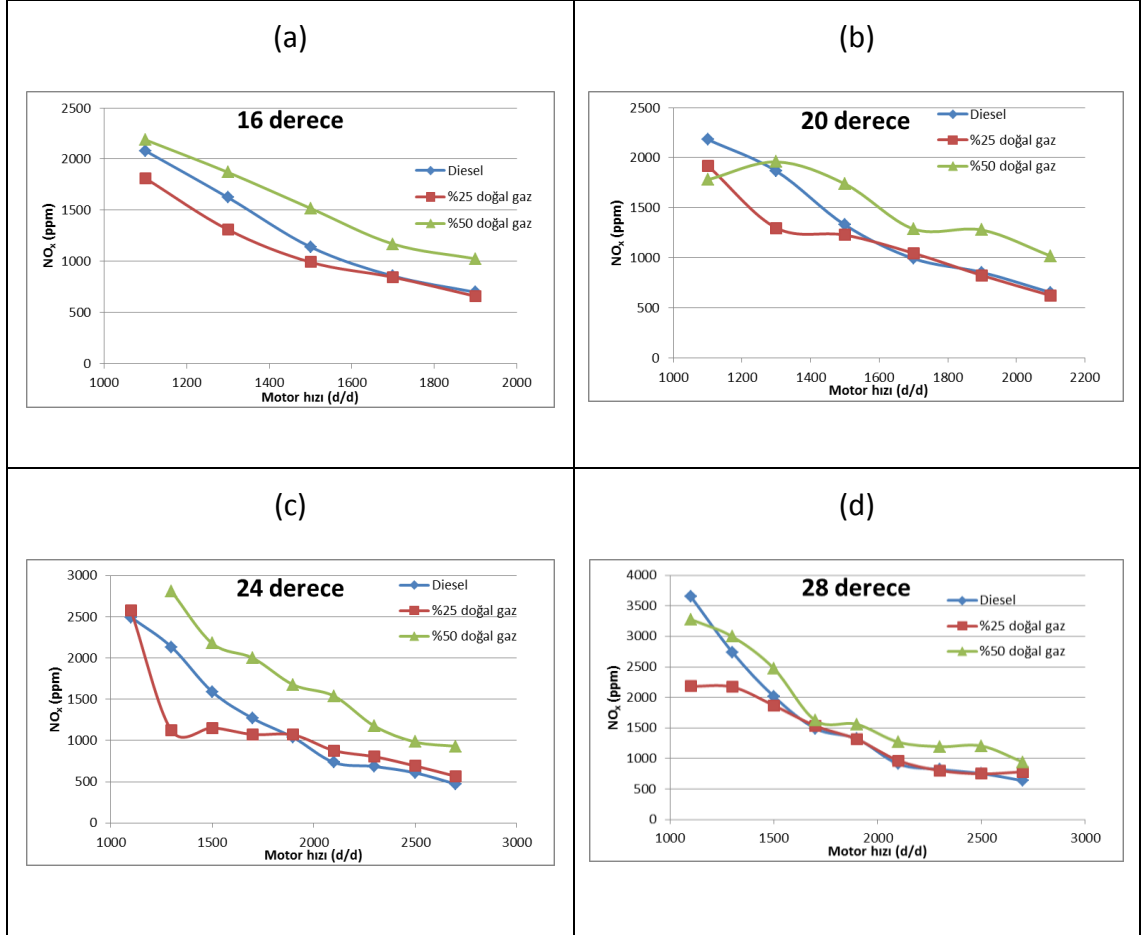
Şekil 4. 11 Farklı püskürtme avanslarında CO₂ emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi



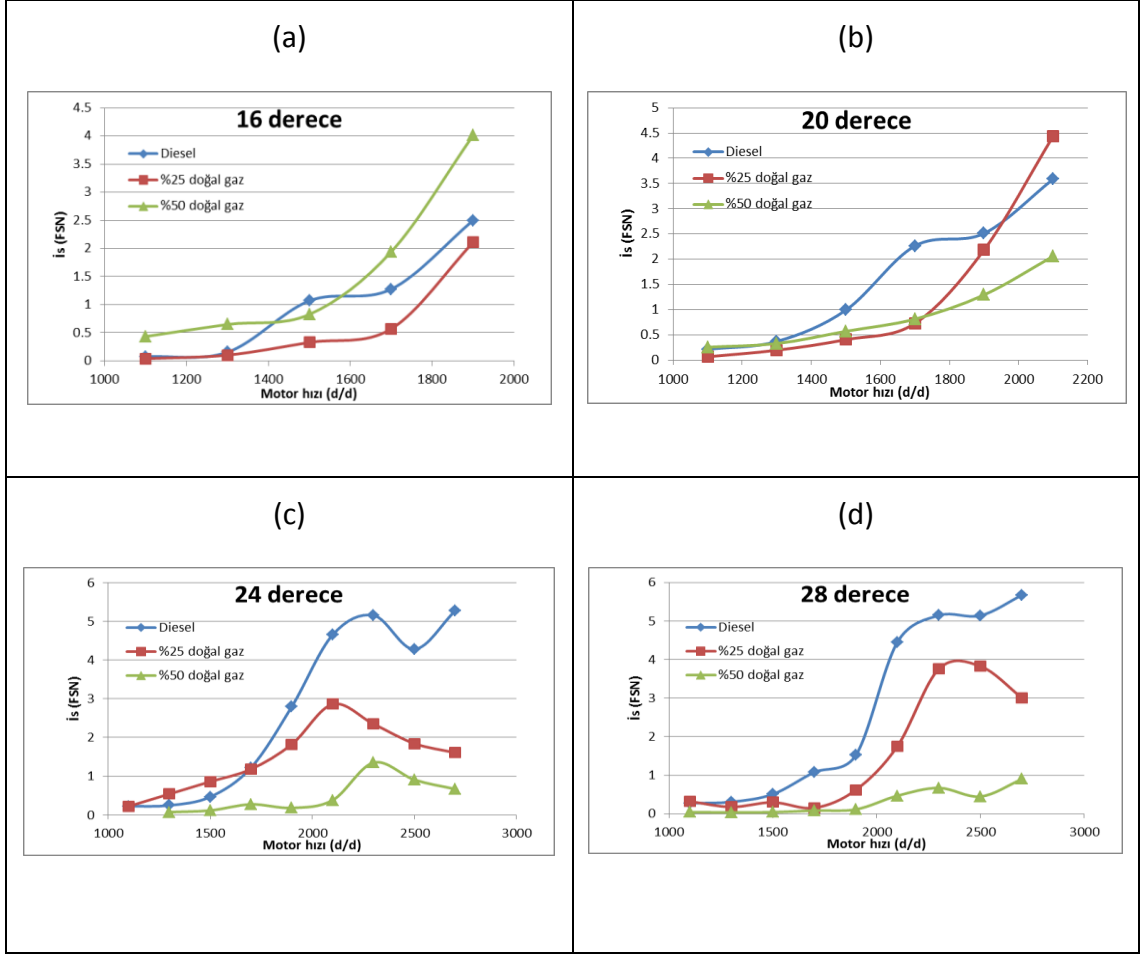
Sekil 4. 12 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi



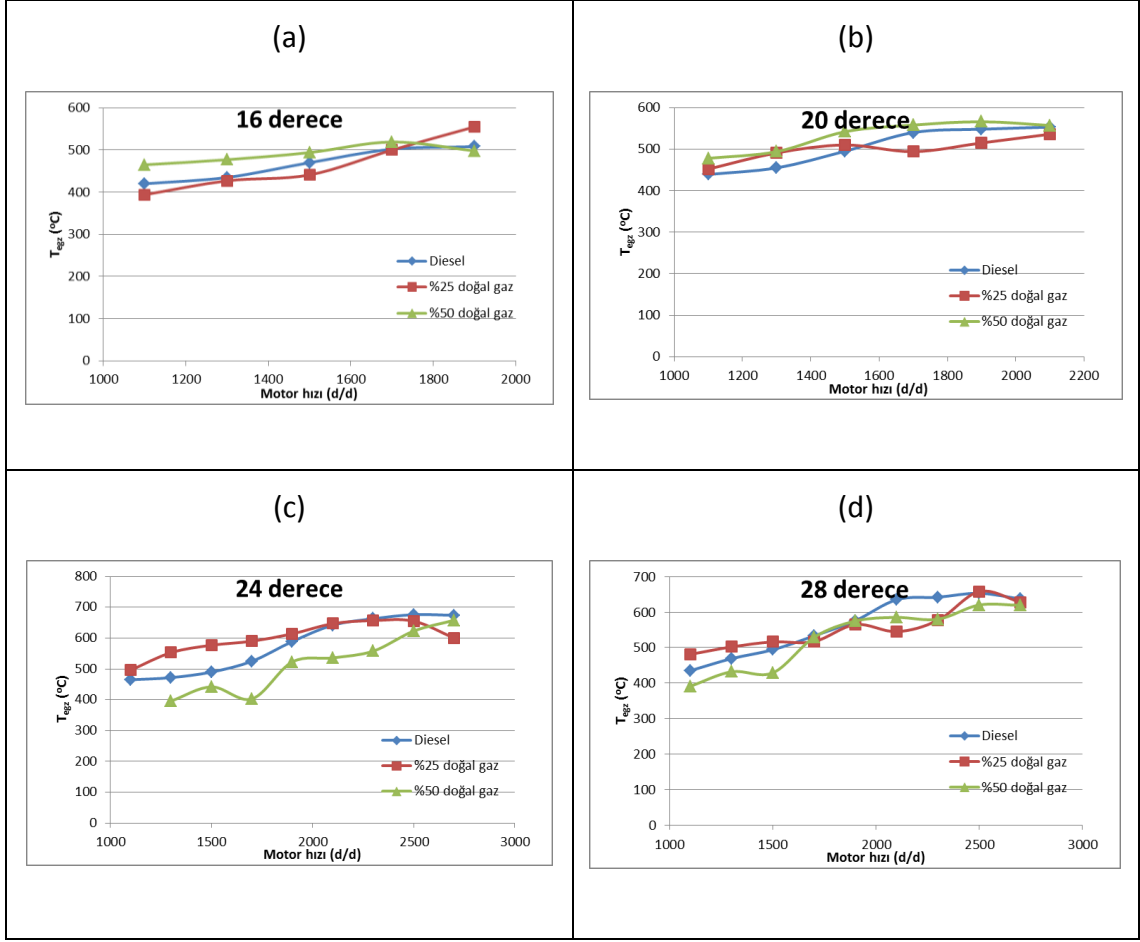
Şekil 4. 13 Farklı püskürtme avanslarında NO_x emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi



Şekil 4. 14 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi

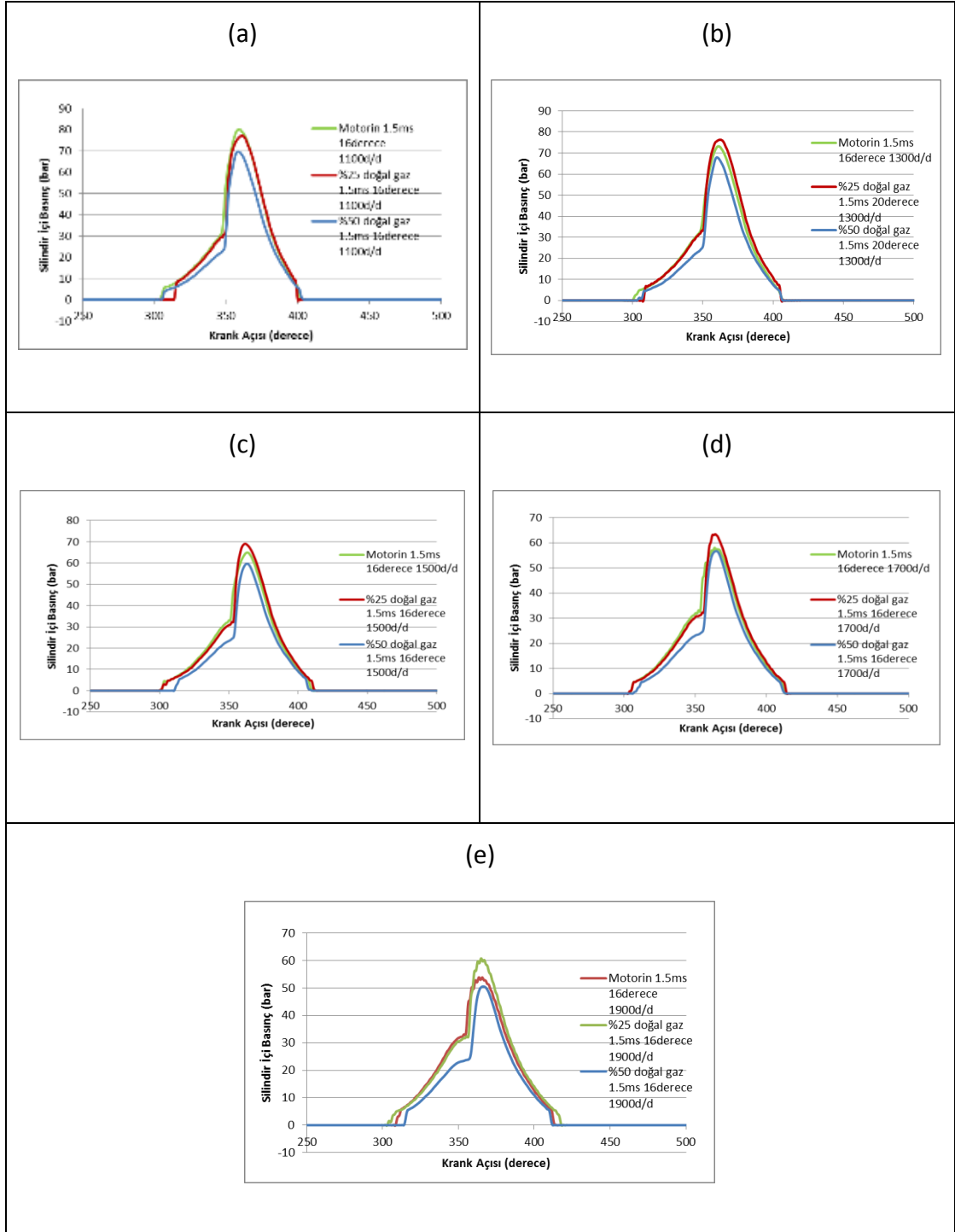


Sekil 4. 15 Farklı püskürtme avanslarında egzoz sıcaklığı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi

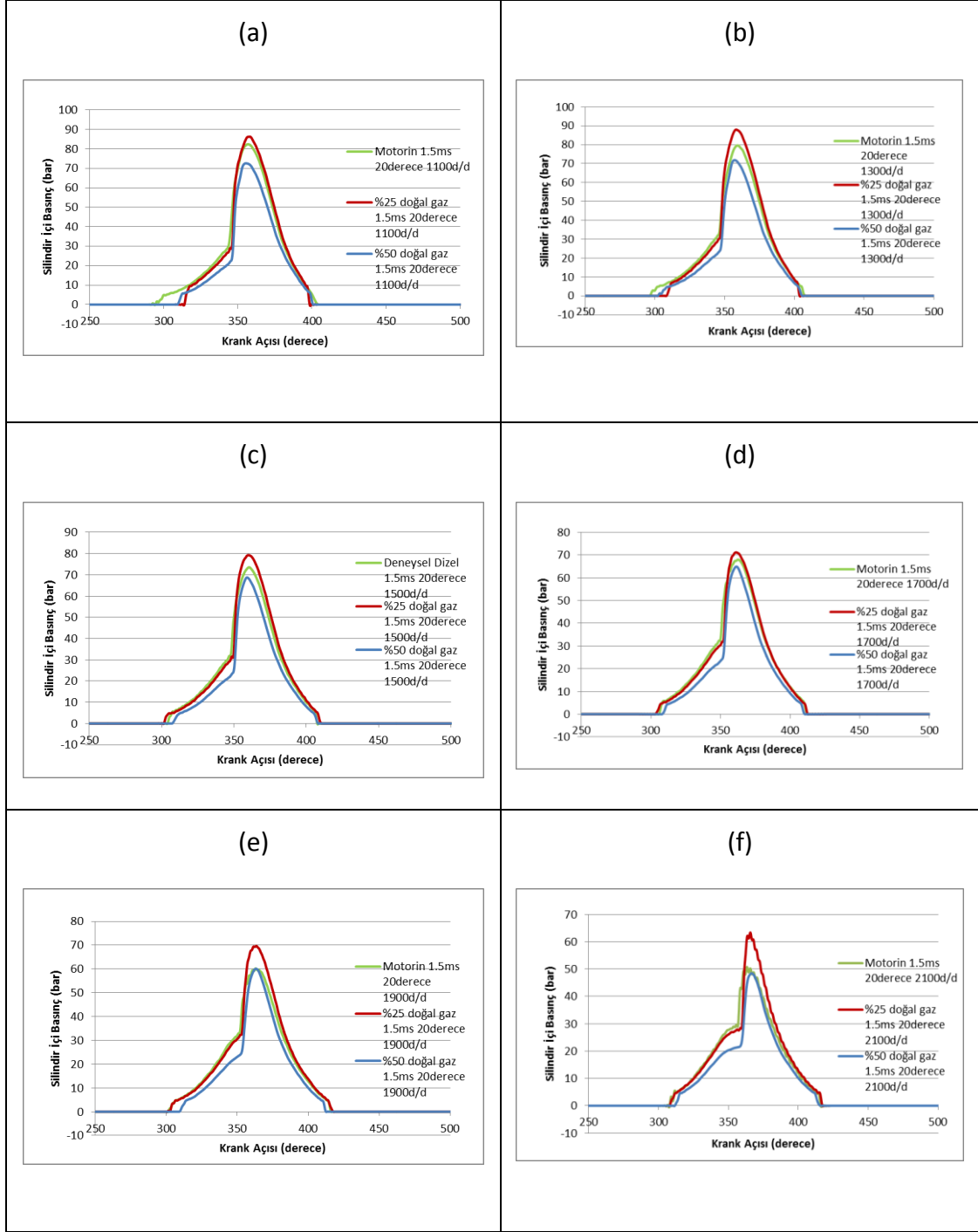
Şekil 4.14 ila 17 arasında görüleceği üzere, 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, %25 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartlarında, maksimum silindir içi gaz basıncı değerinin hem yalnız motorin, hem de %50 doğalgaz ilaveli çift yakıt değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Gaz yakıt kullanılan durumlarda, pilot püskürtmeyle yanma odasına gönderilen motorin miktarının düşük olması, yanma süresinin uzamasına, yanma yoğunluğunun azalmasına ve dolayısıyla silindir içi basınçların düşmesine sebep olmaktadır [69]. Diğer taraftan, motor yükü arttıkça silindir içi pik basınç artmaktadır. Homojen dolgulu gaz hava karışımı olduğu için, kontrolüz yanma fazında daha fazla yakıt bir anda yanmakta böylece yanma üst ölü noktaya daha çok yaklaşmaktadır. Aynı zamanda sabit hacimde yanma prosesinde ideale yakın yanma gerçekleşmektedir [67].



Şekil 4. 16 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

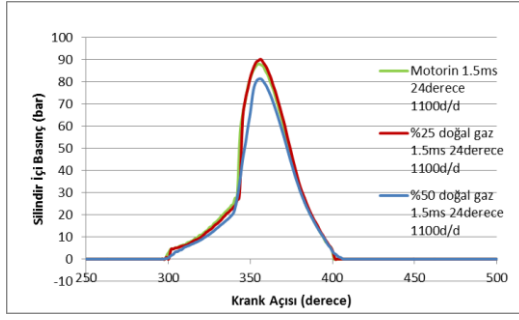
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



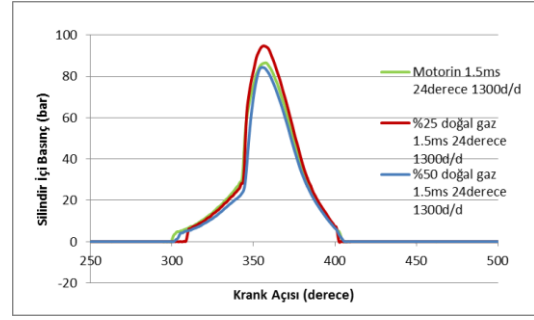
Şekil 4. 17 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

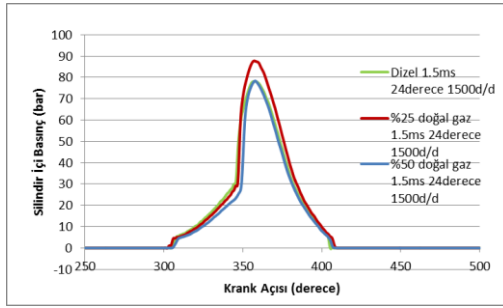
(a)



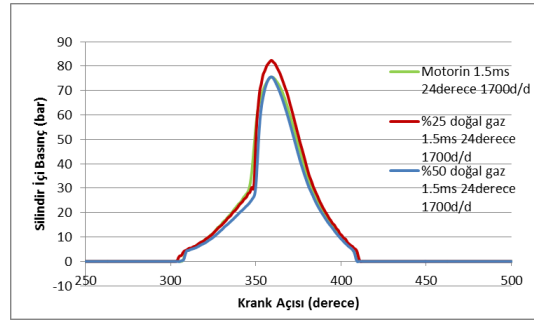
(b)



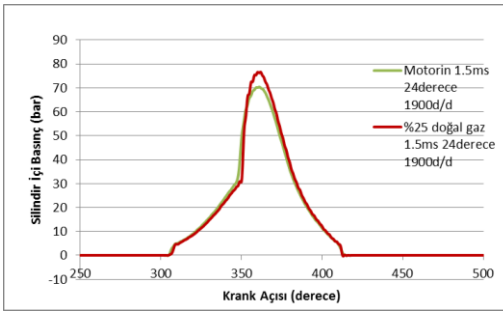
(c)



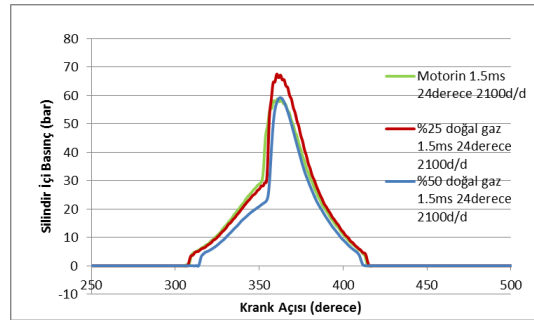
(d)

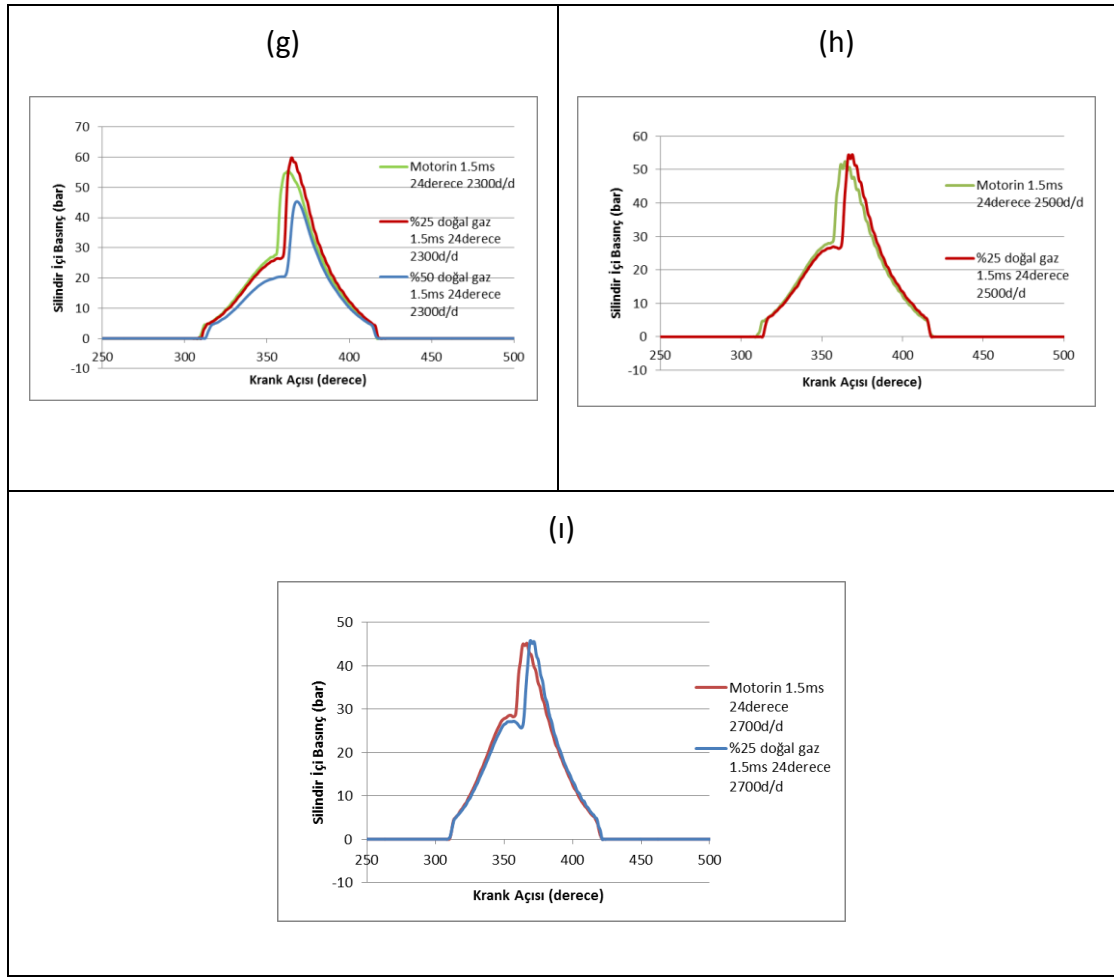


(e)



(f)

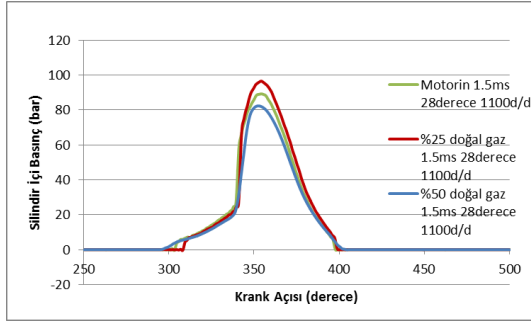




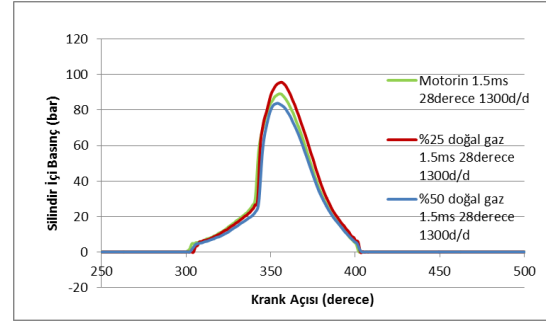
Sekil 4. 18 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (i) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

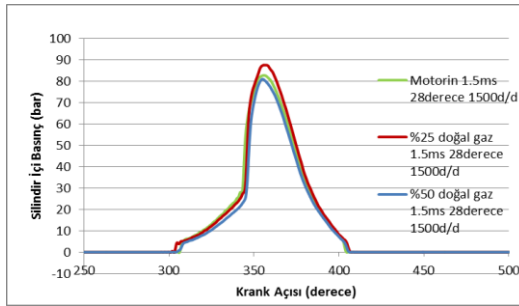
(a)



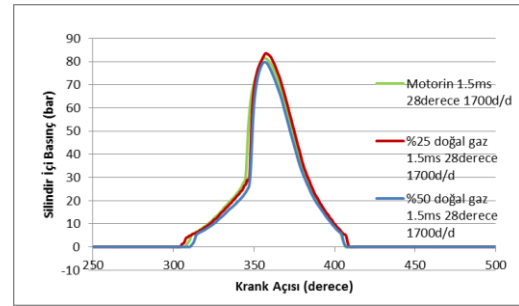
(b)



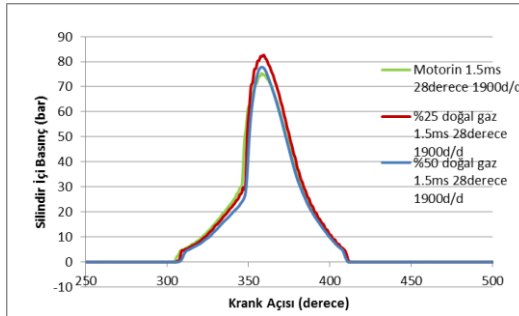
(c)



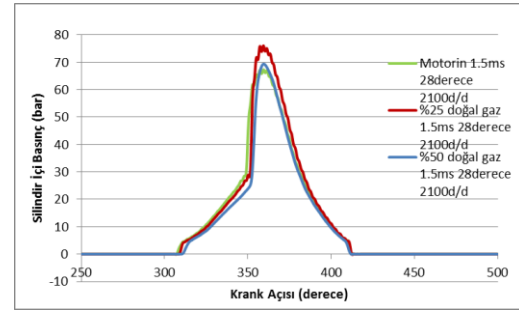
(d)

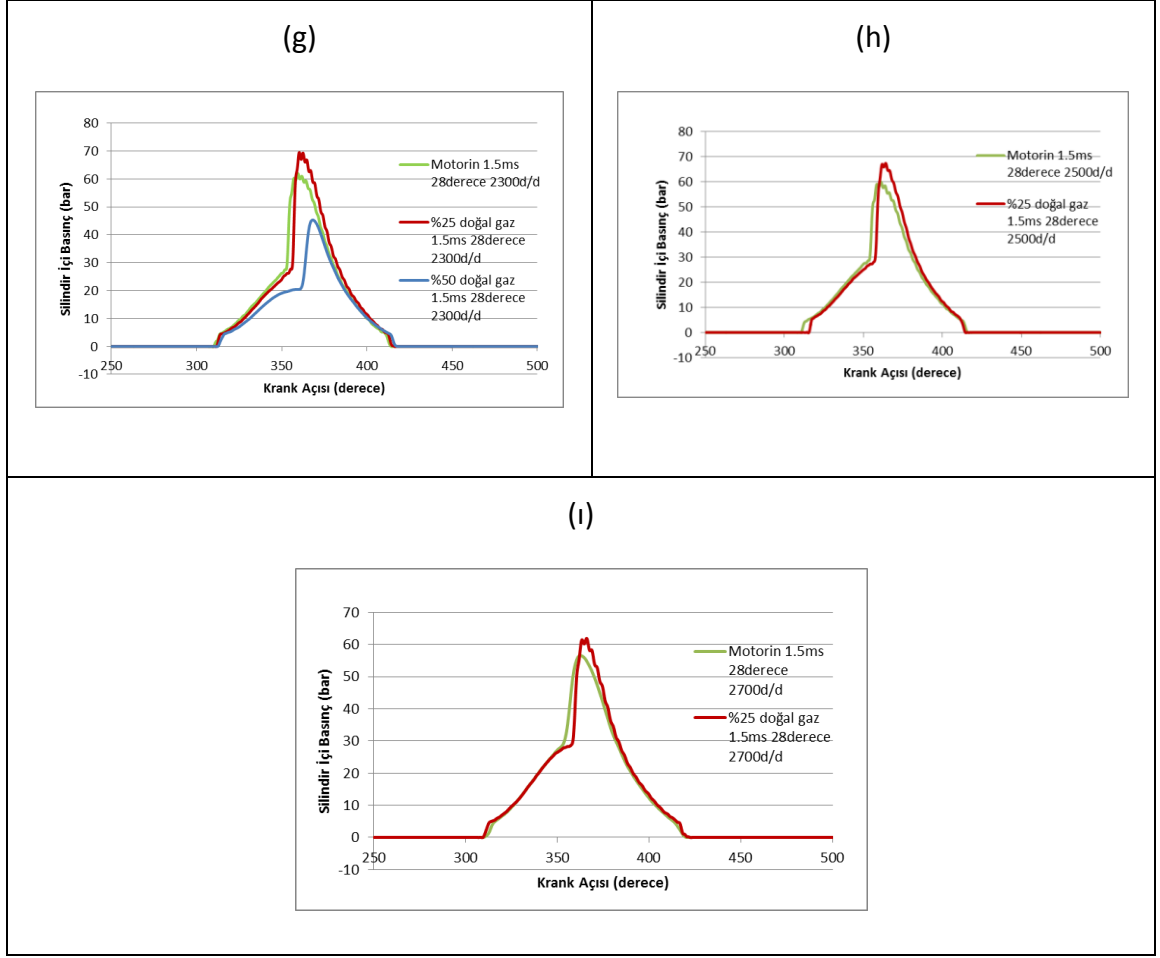


(e)



(f)





Şekil 4. 19 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

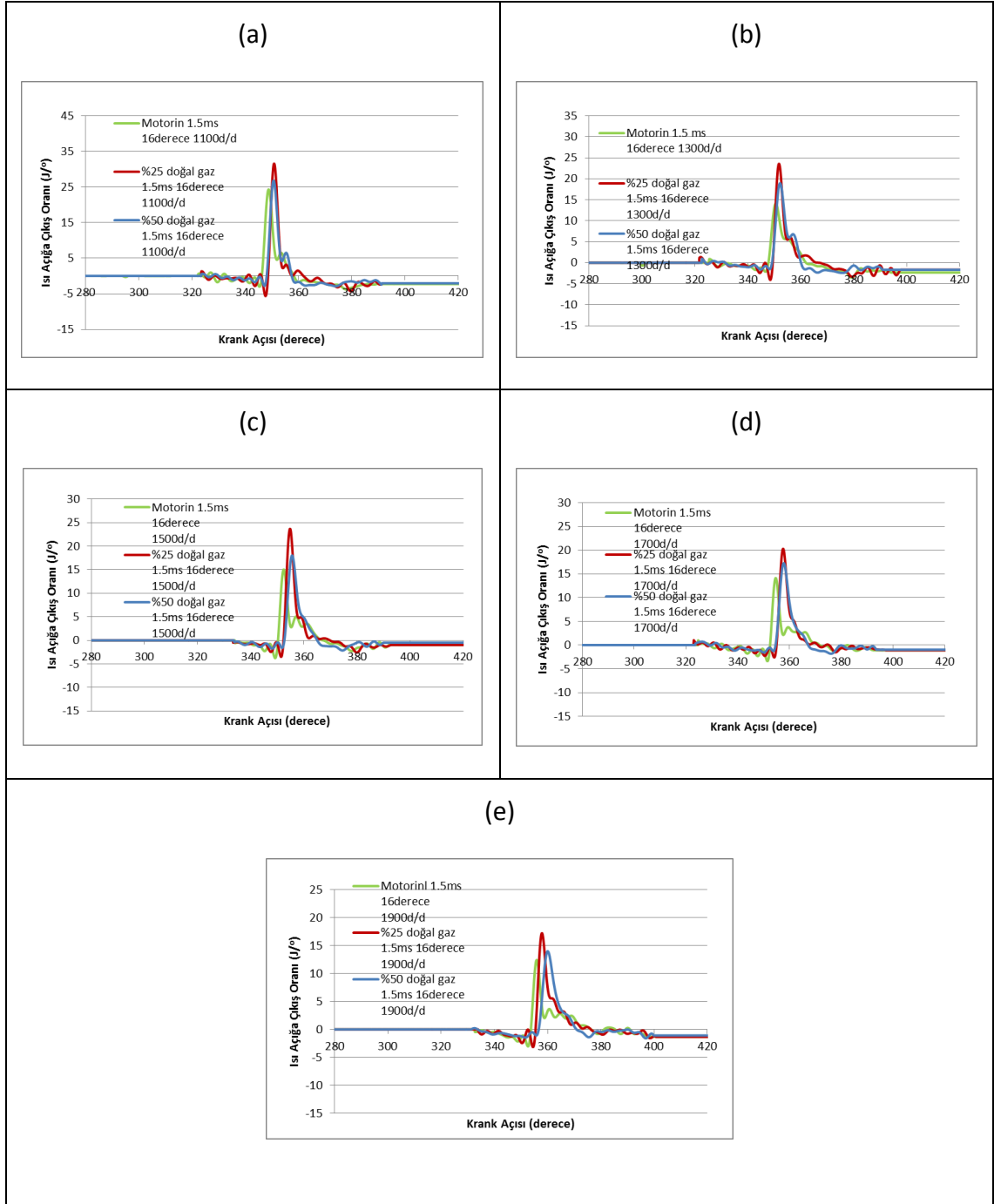
- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (i) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

Şekil 4.20-23 arasında görüleceği üzere 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, %25 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartında maksimum ısı açığa çıkış oranının, hem yalnız motorin, hem de %50 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, Şekil 4.35 ve 36'da da görüleceği üzere 16 ve 20 derece

motorin püskürtme avansında, %50 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartında ısı açığa çıkış oranı, yalnız motorin yakıtından yüksektir. 24 ve 28 derece püskürtme avansında, düşük motor devirleri çalışma şartlarında ise yalnızca motorin yakıtı %50 ilaveli doğalgaz- motorin çift yakıtına göre ısı açığa çıkış oranı daha yüksektir.

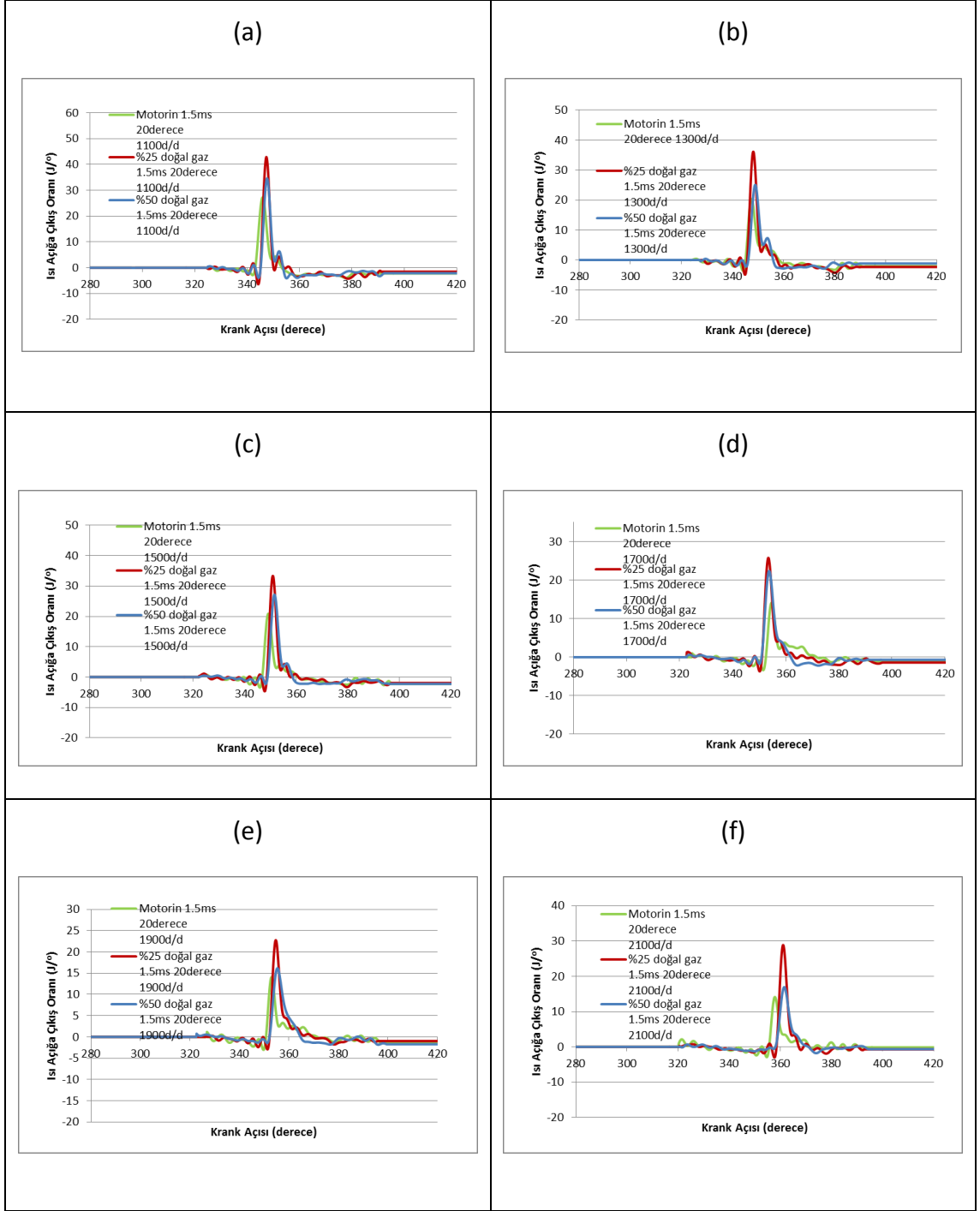
Gaz yakıt/hava karışımı olan dolgunun dizel gönderilmesiyle yanma merkezinde tutuşarak alev cephesinin ilerlemesini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69].

Diğer taraftan, yakıtı karıştırılan gazın oranı arttıkça, yakıtın ısı kapasitesi arttığı için tutuşma gecikmesi süresi uzamaktadır. Gönderilen gaz yakıt miktarı arttıkça, dizel yakıt miktarı azaldığı için, açığa çıkan ısı açığa çıkış oranı miktarı azalmaktadır. Yanma fazında, daha düşük miktarda dizel gönderildiği zaman, yeterince alev cephesi bölgesine gaz yakıt katılamamakta, alev cephesinin ilerlemesi yeterince verimli gerçekleşmemektedir [62].



Şekil 4. 20 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

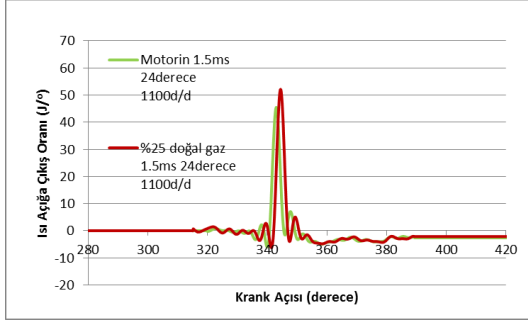
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



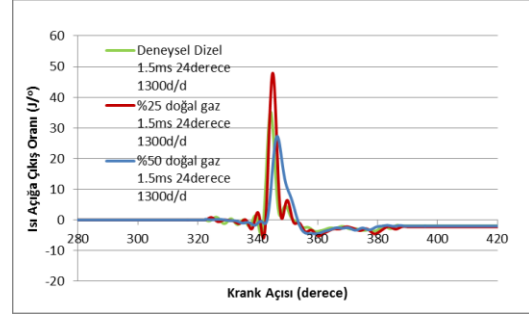
Şekil 4. 21 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

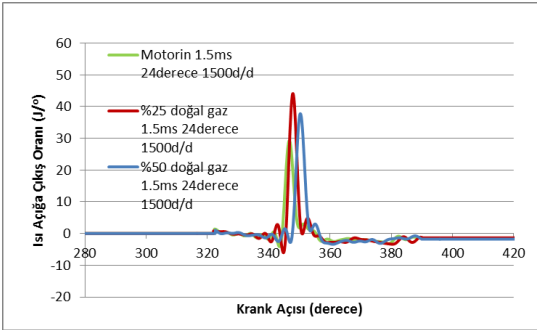
(a)



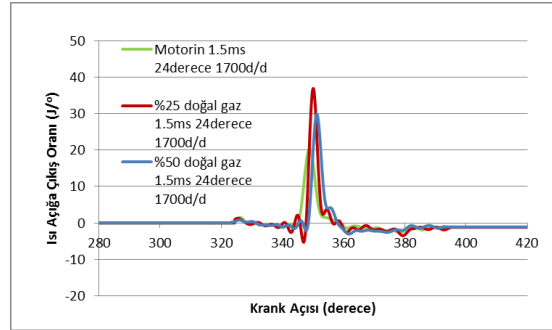
(b)



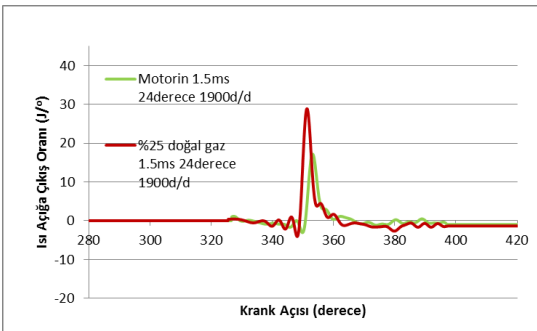
(c)



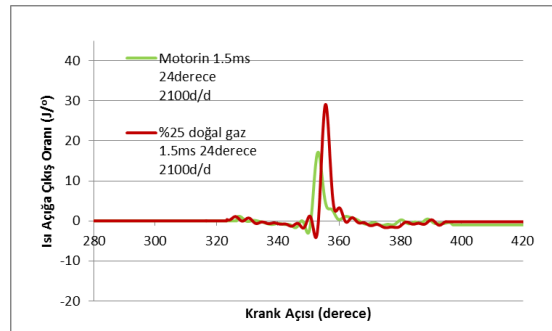
(d)

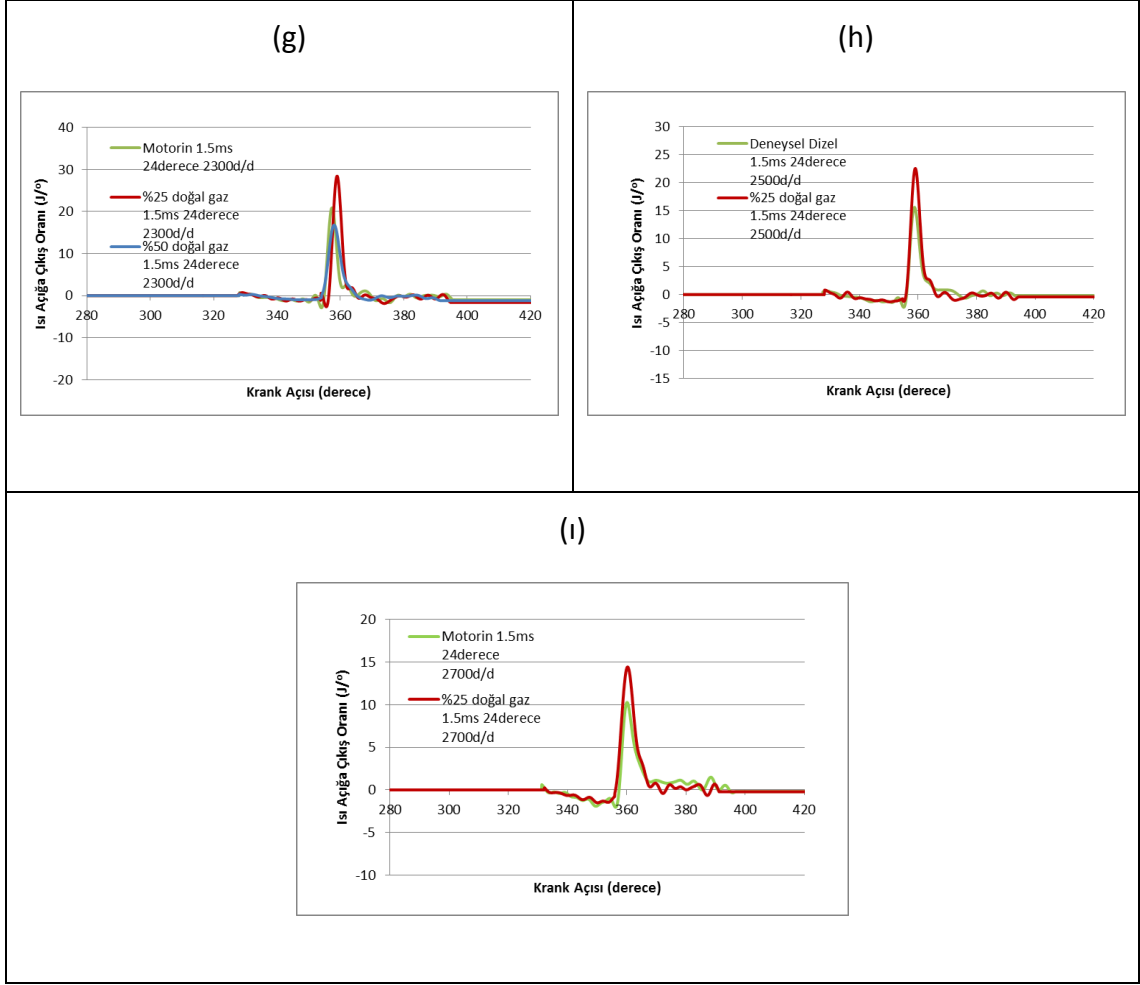


(e)



(f)

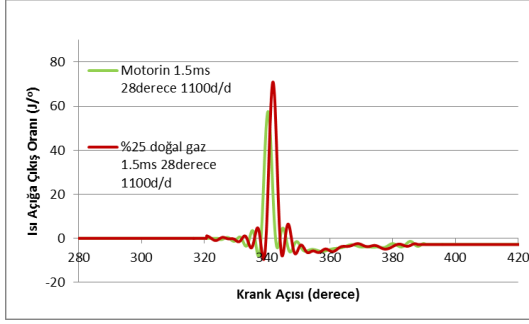




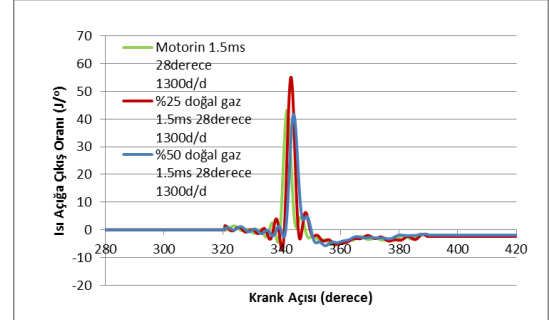
Şekil 4. 22 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

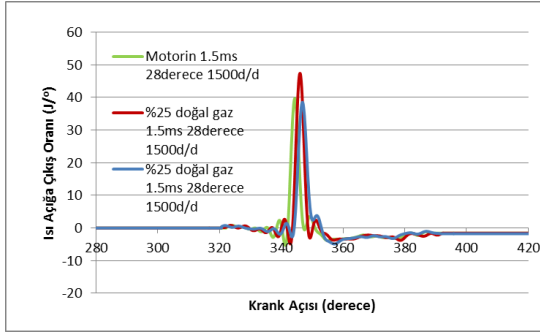
(a)



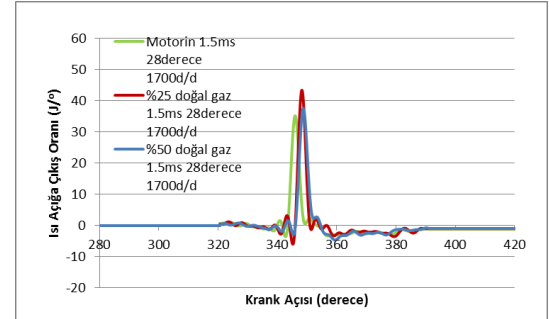
(b)



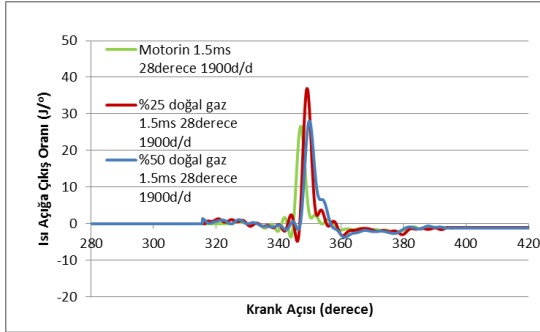
(c)



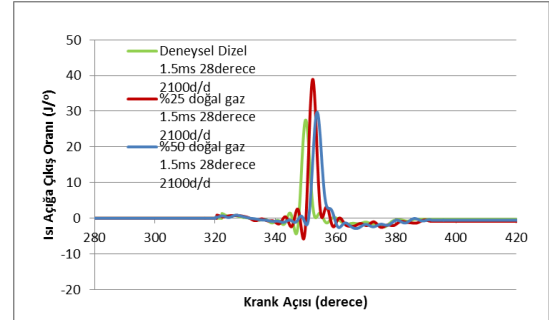
(d)

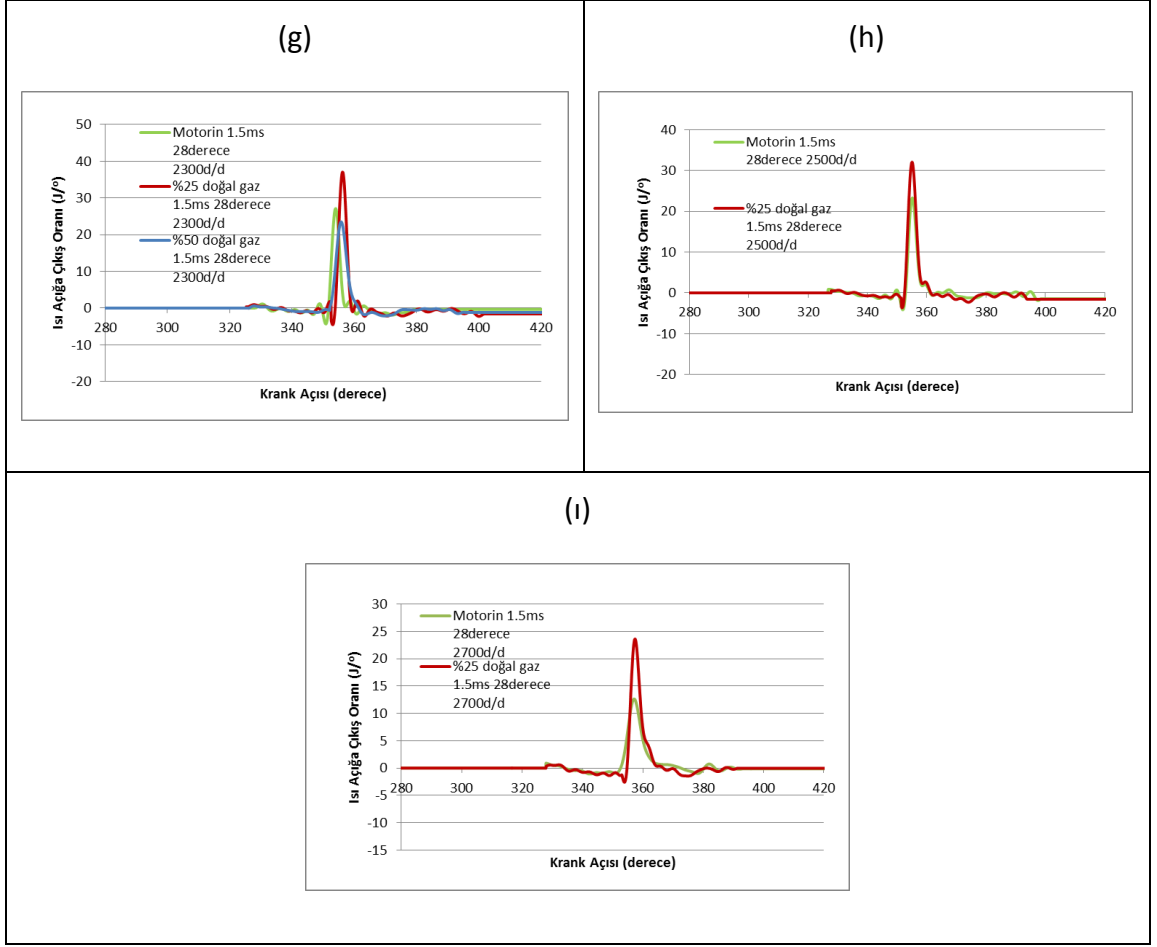


(e)



(f)





Şekil 4. 23 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

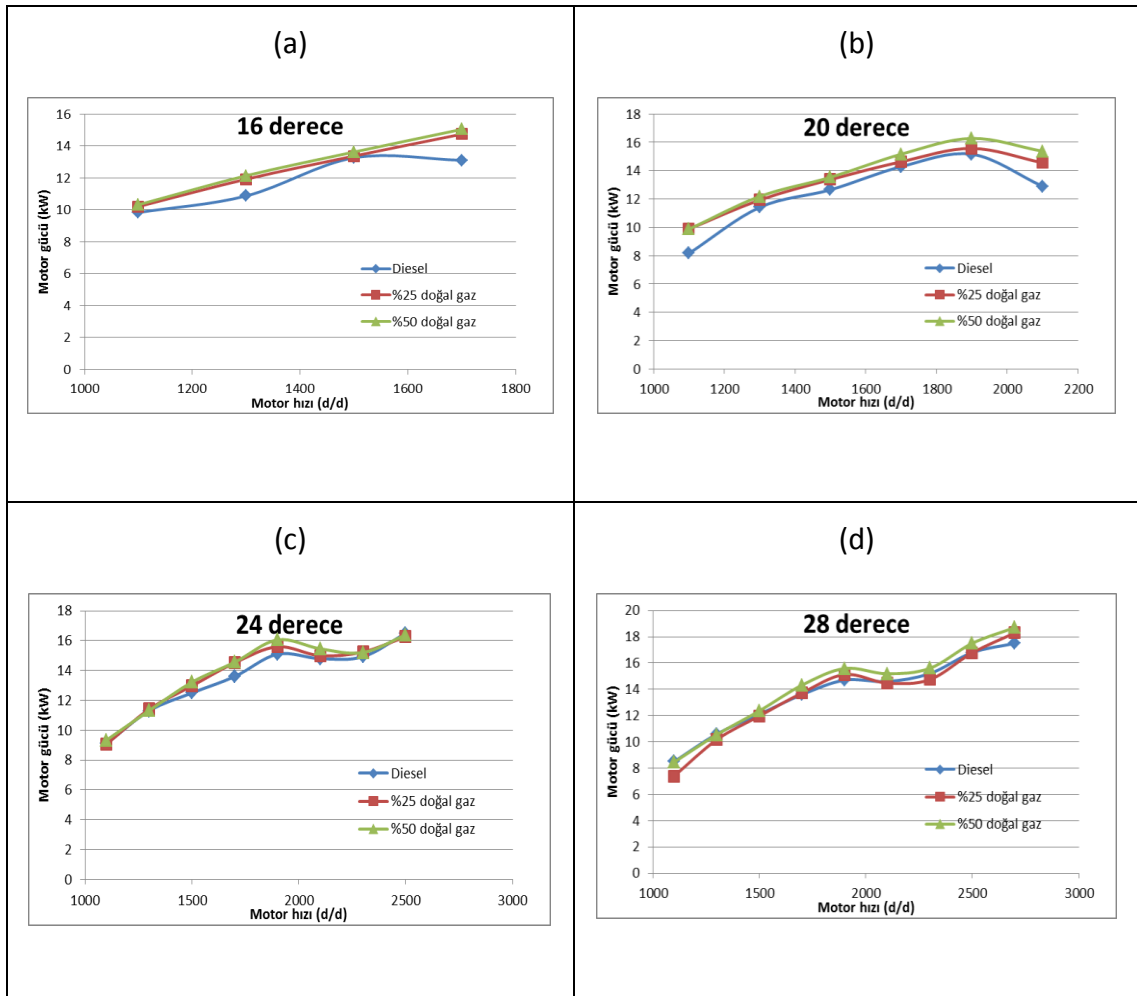
4.1.5.2 1.75ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları

Şekil 4.24’de görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile motor gücünde tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde benzer karakteristik eğriler gözlemlenmiş ve motor gücü artmıştır. Ayrıca, artan motor devriyle motor güçlerinde artış meydana gelmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %12,5 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,8 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,1 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %6,8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,1 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %4,6 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %6,9 artış meydana geldiği bulunmuştur.

Şekil 4.25’te ise motor torku verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, motor torkunda doğalgaz ilavesi ile artış meydana geldiği görülmektedir. Maksimum tork artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %11,4 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,4 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,5 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %6,3 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %5,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %4,83 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,2 artış meydana geldiği bulunmuştur.

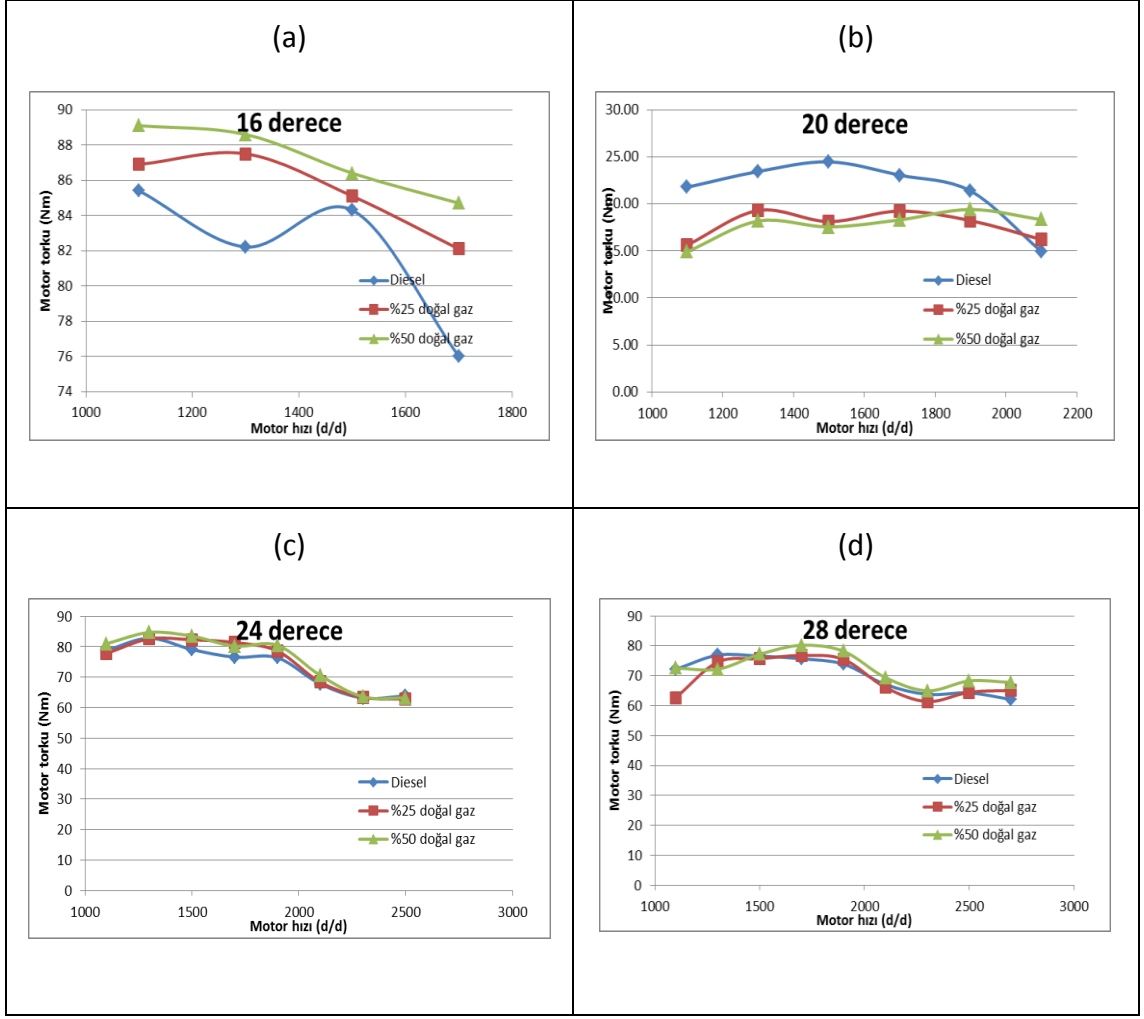
Şekil 4.26'te ise termik verim değerleri verilmiştir. Maksimum verim düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %44,24 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,58 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,27 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %22,74 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,46 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %34,53 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %52,77 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33,09 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, doğalgaz ilavesi ile özellikle düşük devirlerde termik verimde ciddi düşüşler gözlemlenmiştir. Şekil 4.27'te ise özgül yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Maksimum özgül yakıt tüketimi artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %79,3 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %71,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %39,4 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %46,7 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %39,8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %52,7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %111,74 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %49,44 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre aynı motor hızlarında özgül yakıt tüketiminin doğalgaz ilaveli şartta, yalnız motorin yakıtına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca motor devri yükseldikçe özgül yakıt tüketimlerinde azalma gözlemlenmiştir. Çift yakıt kullanıldığında dizele göre daha

düşük termik verim elde edilmektedir. Nedeni, kalorifik değerin kullanılan gaz yakıtta daha düşük olması olarak gösterilmektedir. Art gazlar, yanmayan gaz yakıt, düşük yanma sıcaklığı ve düşük alev ilerleme hızı termik verimin düşmesine sebep olmaktadır [73]. Shan vd. [66] yapmış olduğu çalışmada, EGR oranı arttıkça termik verimin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, pilot püskürtmeyle gönderilen gaz yakıt miktarının artması, özellikle düşük yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur [74].



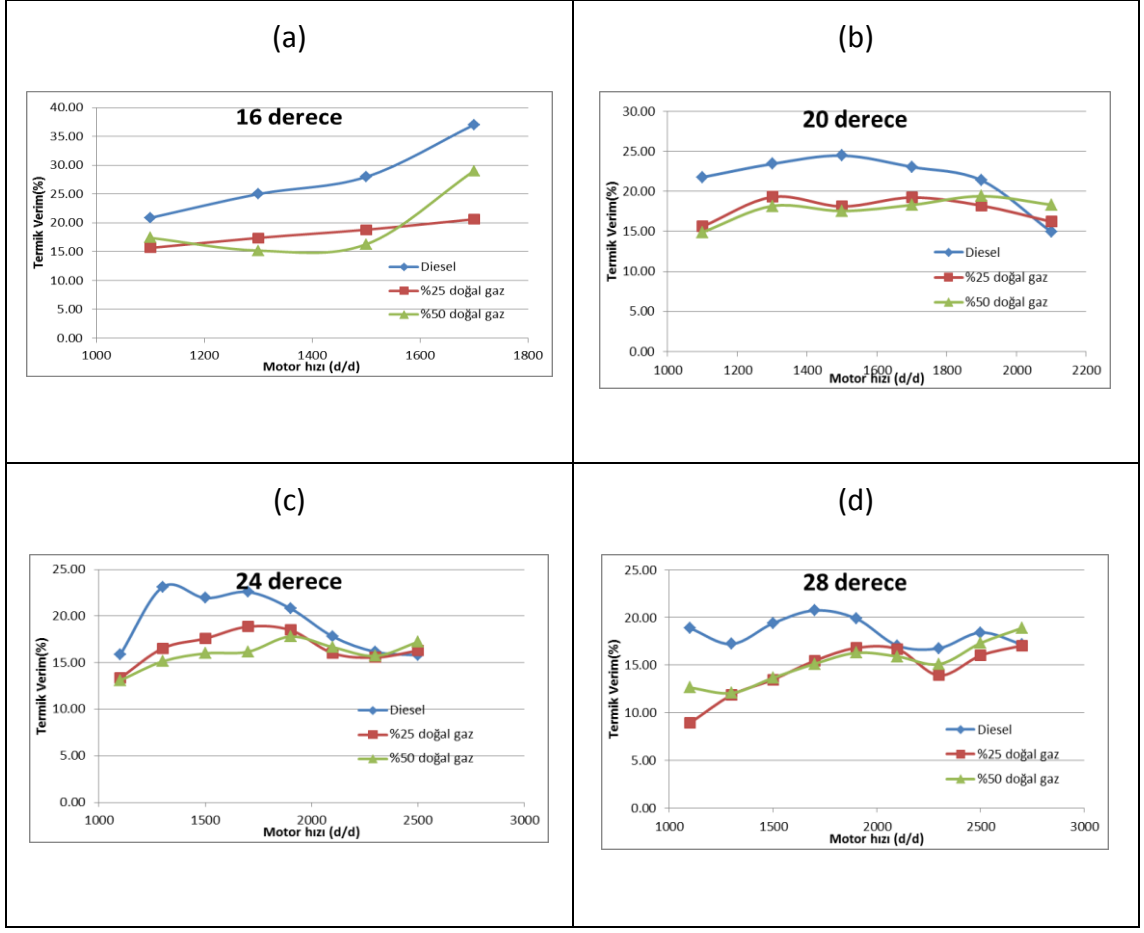
Şekil 4. 24 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



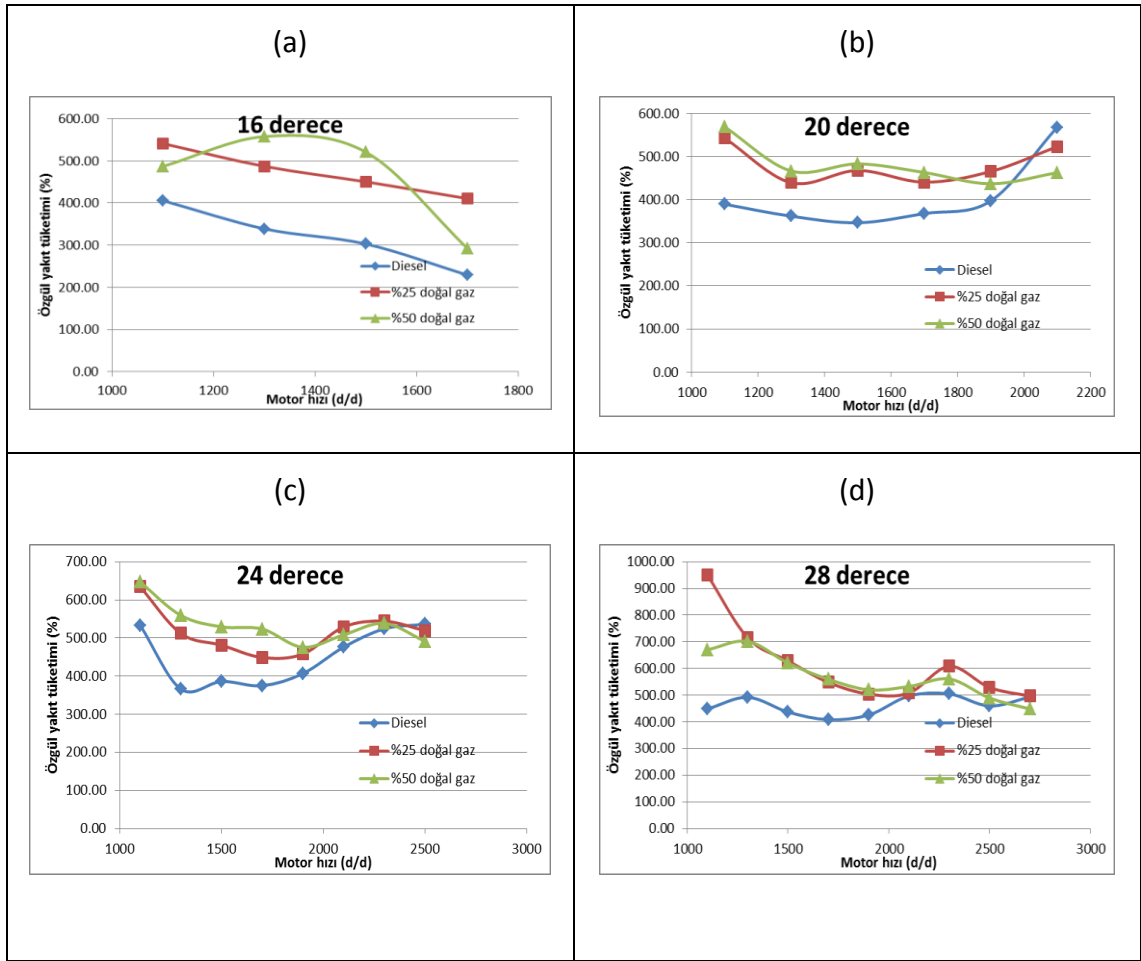
Şekil 4. 25 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 26 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Şekil 4. 27 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.28’da görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile karbonmonoksit miktarlarında tüm püskürme avansı ve çalışma devirlerinde artmaktadır. Maksimum CO emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %3125 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %1387 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %255,4 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %233,1 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %381,7 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %530 artış meydana geldiği;

28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %379 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %90,3 artış meydana geldiği bulunmuştur. Doğalgaz ilavesi ile metan miktarı arttığı için CO emisyonlarında ciddi miktarda artış olmaktadır. Çünkü metan miktarı arttıkça hava-yakıt oranının azalması zorunludur. Gaz yakıt artışı ile düşük yanma verimine sahip gaz yakıt yanması, aynı zamanda düşük silindir içi sıcaklıklar ve de oksijen konsantrasyonunun düşmesine neden olur. Yüksek motor hızlarında, yanma süresinin kısılması, oksijen erişebilirliğini azaltarak, CO miktarlarını daha da arttırır [62]. Kısaca, doğalgaz oranı arttıkça, CO emisyonu artar, çünkü tam yanma gerçekleşmez. Yüksek yüklerde karışım zengin hale geldiği için, hava miktarı azalarak oksidasyon zorlaşır ve CO emisyonları artar. Bilindiği üzere, CO emisyonu temel olarak eksik yanmadan dolayı meydana gelir ve lokal oksijen eksikliği, düşük sıcaklık ve kısa reaksiyon süresi CO artışına neden olmaktadır. Kısacası, çift yakıtlı (doğalgaz+motorin) motorlarda, eksik yanmanın sebebiyle ve de pilot motorin ve doğalgaz sebebiyle daha yüksek miktarda CO emisyonu açığa çıkar [74].

Şekil 4.29'de ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karbondioksit miktarında doğalgaz ilavesi ile düşüş görülmüştür. Maksimum CO₂ emisyonu düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33,8 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %37,2 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %27,3 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33,8 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %31,3 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,7 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %49,6 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %45,9 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

Şekil 4.30'de ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Maksimum HC emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %108,7 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %500 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %73,5 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %164,7 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %78,6 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %207,1 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %145 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %341,7 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, doğalgaz ilavesi ile hidrokarbon oranında artış görülürken; hem doğalgaz-motorin çift yakıtı şartlarında, hem de yalnız motorin yakıtı şartlarında, artan motor devirlerinde genellikle hidrokarbon miktarı seviyelerinde artış gözlemlenmiştir. Gaz yakıtın ilave yakıt olarak kullanılması durumunda alev hızı düştüğünden dolayı yanma kötüleşmektedir. Bu durum HC emisyonlarının artmasına neden olmaktadır [73]. Fakir karışım da alev sönme bölgeleri arttığı için özellikle silindir cidarlarına temas eden bölgelerde eksik yanma meydana gelmekte ve bu da HC emisyonlarını arttırmaktadır. Küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle yanması zorlaştığı için HC emisyonu artmaktadır [74].

Şekil 4.31'de ise, NO_x emisyonları verilmiştir. Maksimum NO_x emisyonu düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %59,2 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %42,1 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %49,3 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %27,6 düşüş meydana geldiği;

24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %55,2 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %29,2 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %81,4 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %51 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, düşük motor devirlerinde doğalgaz-motorin çift yakıt kullanımında, yalnız motorin yakıtı kullanımına göre genel olarak düşüş görülürken, yüksek motor devirlerinde özellikle %50 doğalgaz ilaveli doğalgaz-motorin çift yakıtı, NO_x miktarının yalnız motorin ve %25 doğalgaz ilaveli duruma göre daha yüksek seviyelerde olduğu gözlemlenmiştir.

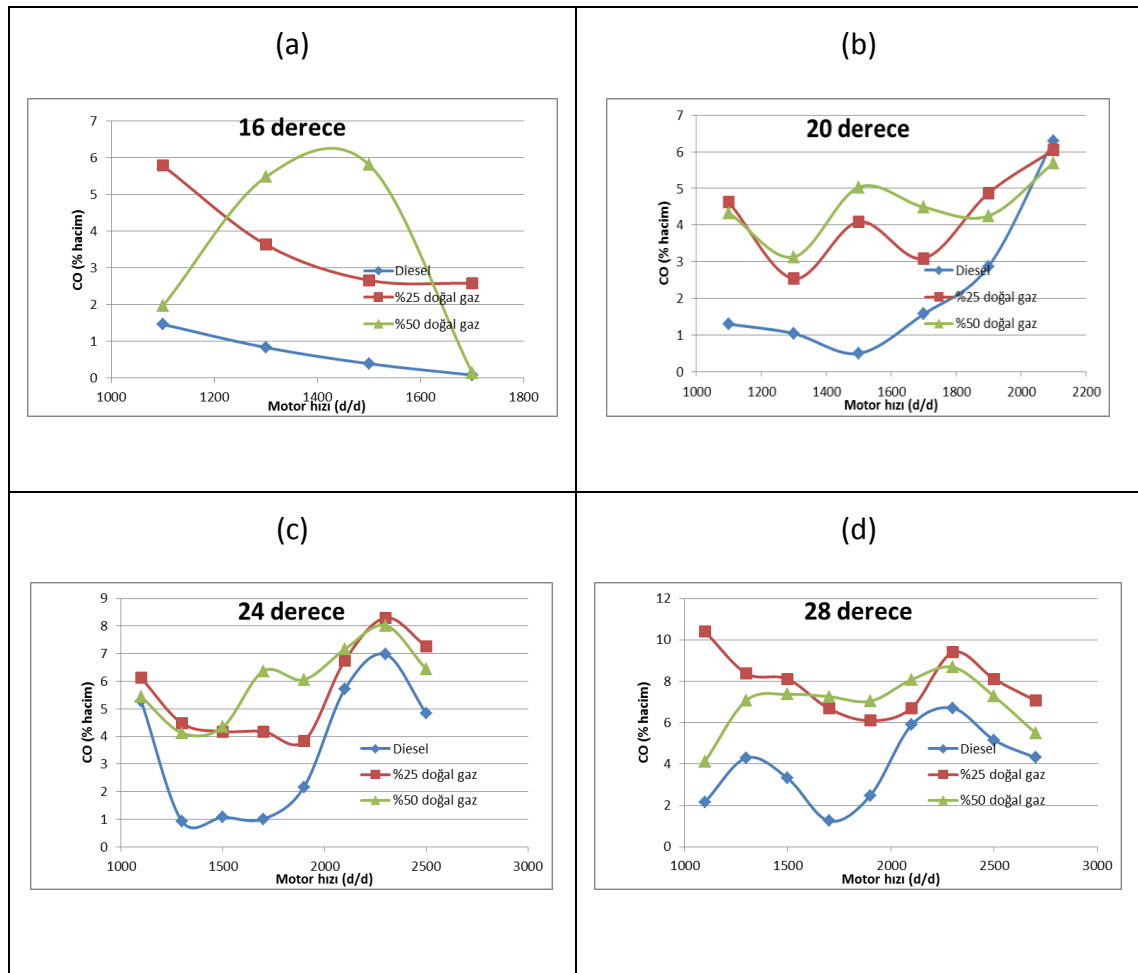
Gaz yakıtın ilavesiyle daha fazla ısı ortaya çıkmış olsa da, daha homojen hava-yakıt karışımının kullanılmış olması, lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasını engellemiş ve NO_x emisyonunu düşürmüştür. Öte yandan, silindir cidarları gaz yakıt kullanımı sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış, gaz yakıt tüm yanma odasına dağılarak daha yüksek ısı salınımının açığa çıkmasına ve NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur. Birbirine zıt olan bu parametreler sonucu NO_x emisyonlarında artış, düşüş veya ciddi bir değişiklik meydana gelmemesi gözlemlenebilir [75].

Şekil 4.32’da ise is emisyon değerleri verilmiştir. Maksimum is emisyonu düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %2,1 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %93,6 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %0,96 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %210,1 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,1 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %29,2 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %81,4 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %86,8 düşüş meydana geldiği

bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, enerji içeriği olarak %50 doğalgaz ilaveli yakıtta, is miktarının yalnız motorin ve %25 doğalgaz şartına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

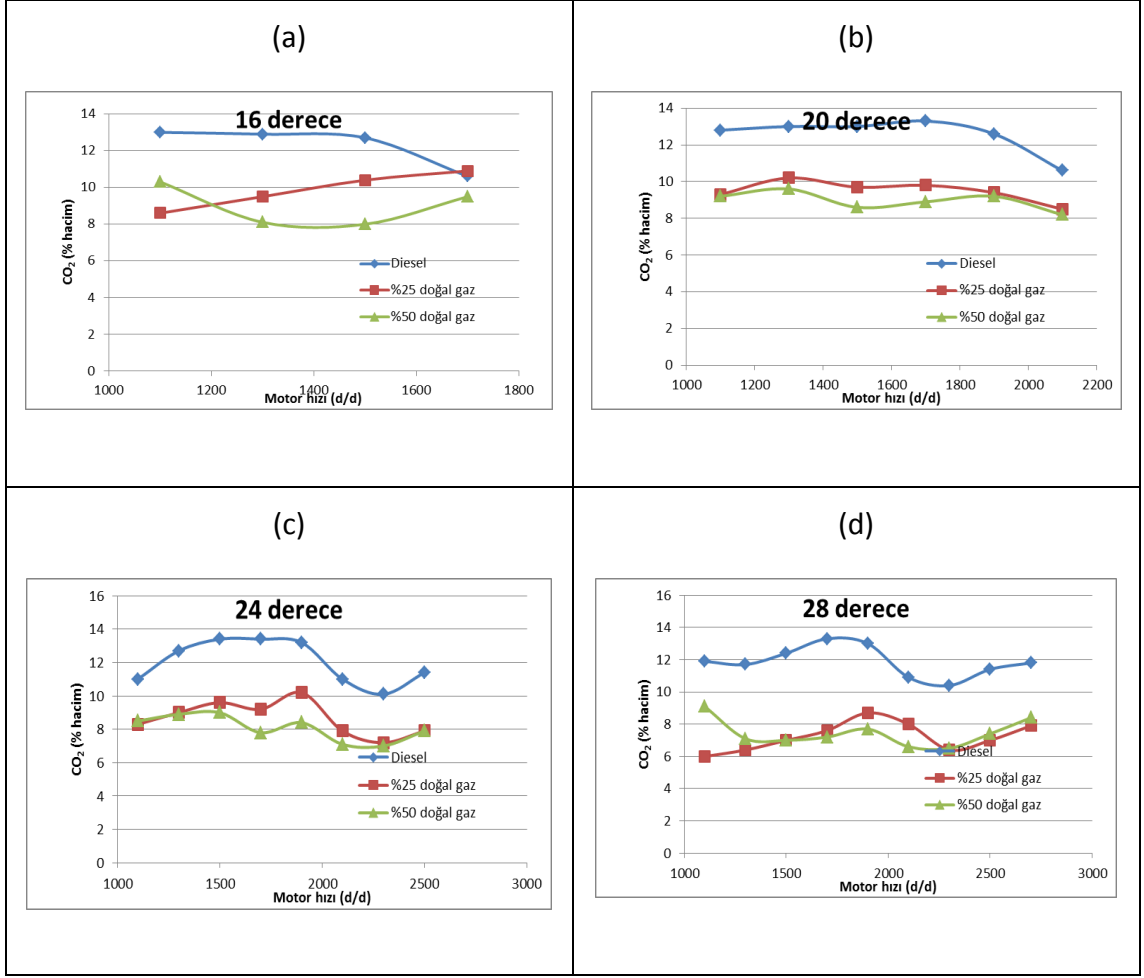
Gaz yakıt miktarı arttıkça, silindir içerisine gönderilen dizel yakıt miktarı azaldığı için, is emisyonları azalmaktadır. Ayrıca, ilave yakıt olarak kullanılan doğalgazın temel komponenti olan metanın parafin ailesinin en düşük is emisyonu oluşturmaya eğilimli üyesi olması da is emisyonunun azalmasında etkilidir [62].

Şekil 4.33'de görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile egzoz çıkış sıcaklığında düşük devirlerde ve özellikle yüksek püskürtme avanslarında doğalgaz kullanımı ile yalnız motorin şartına göre kayda değer bir fark meydana gelmediği gözlemlenmiştir.



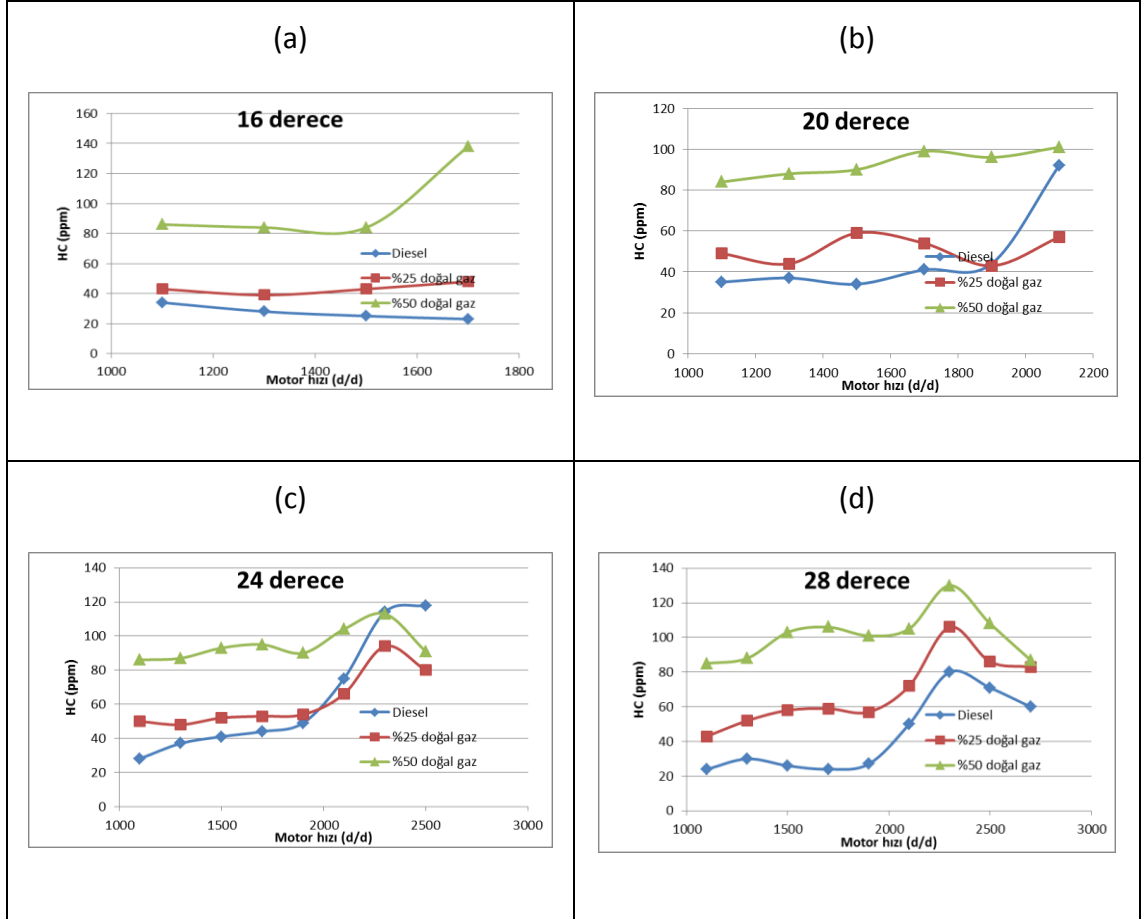
Şekil 4. 28 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



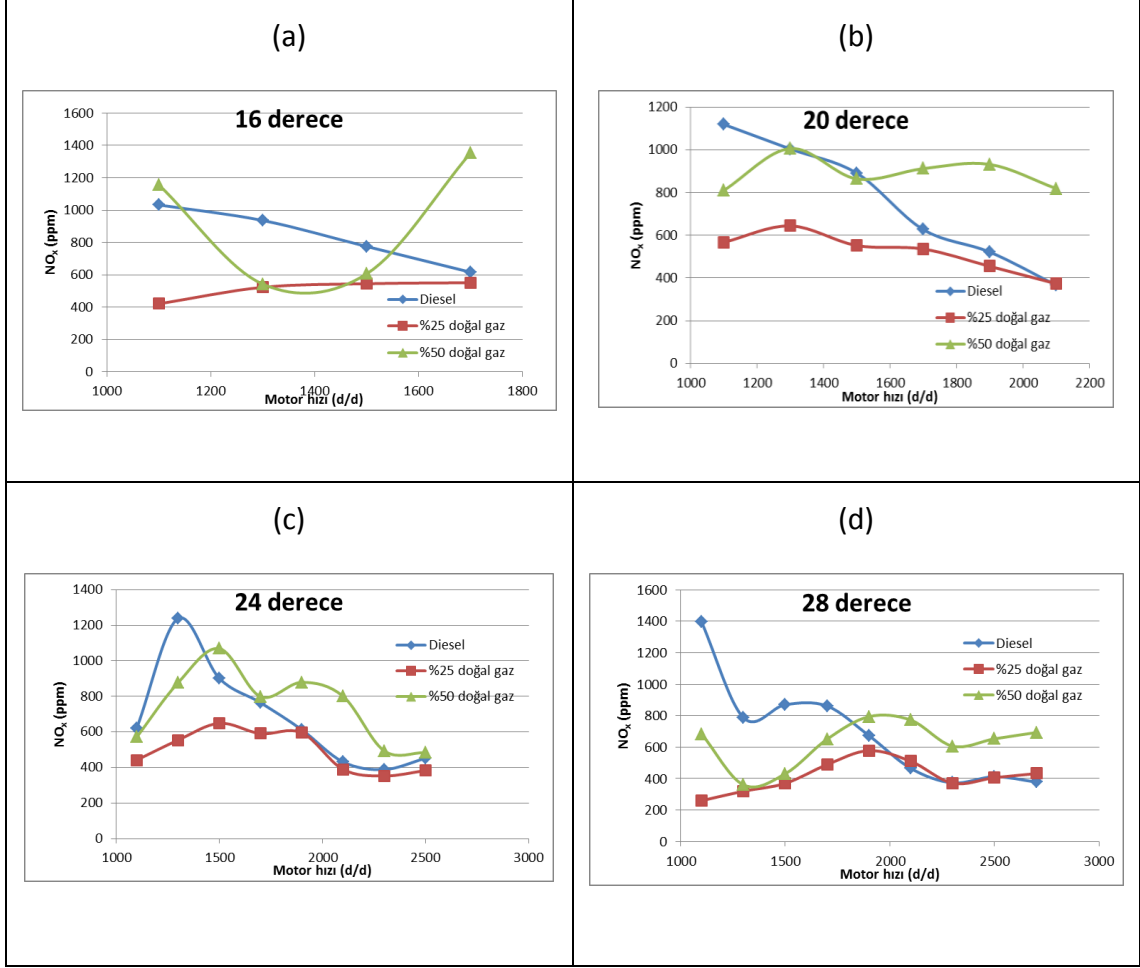
Şekil 4. 29 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi



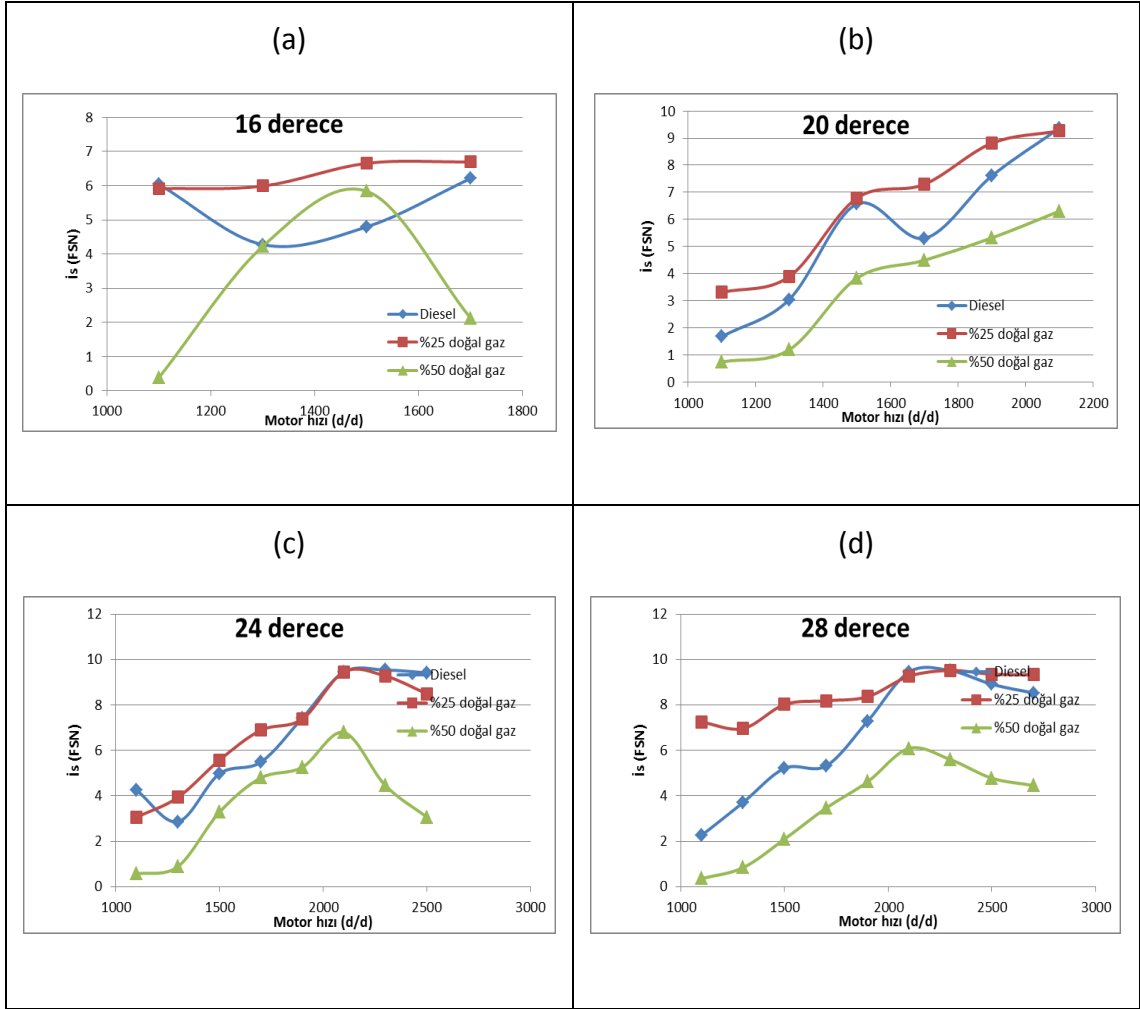
Şekil 4. 30 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi



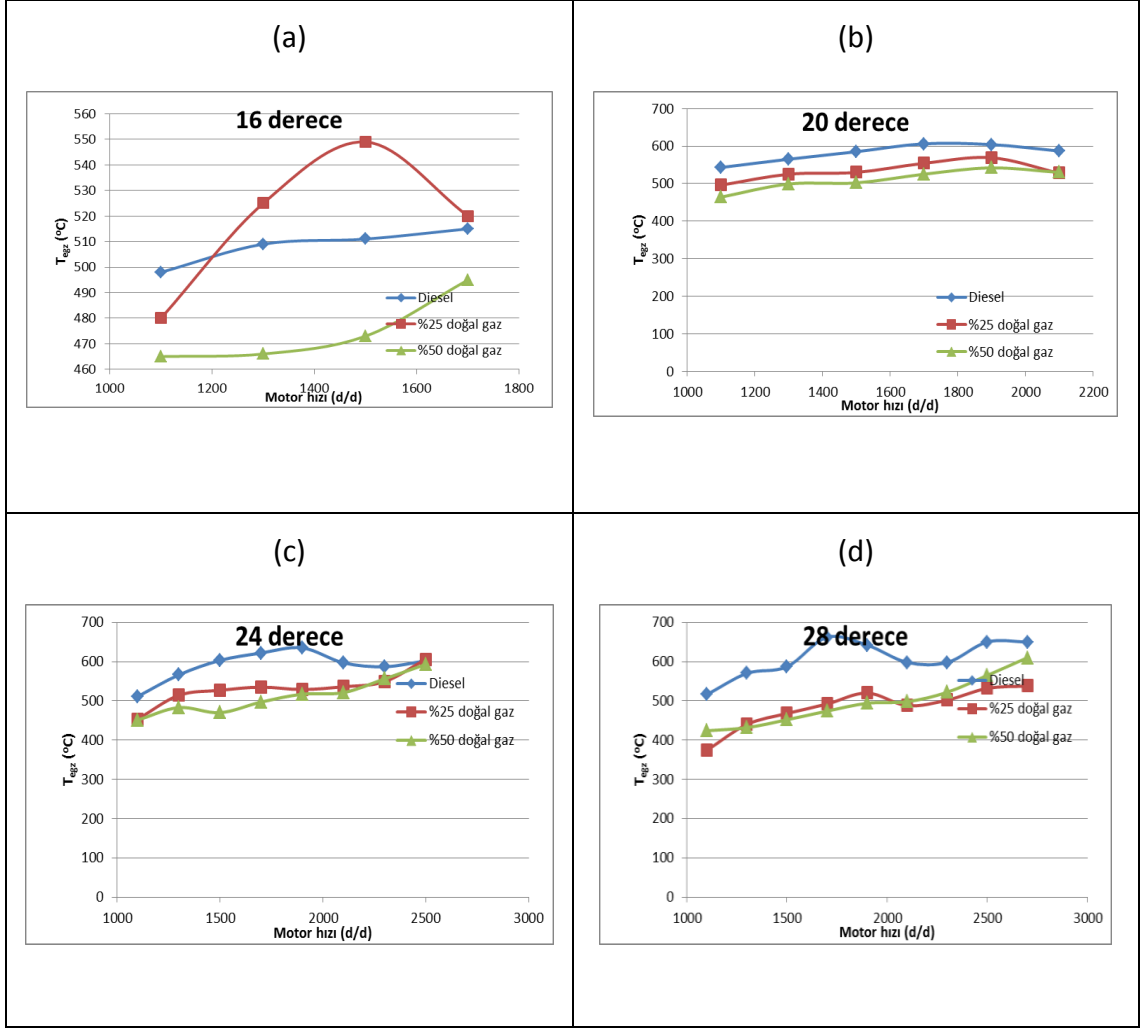
Şekil 4. 31 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi



Şekil 4. 32 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi



Şekil 4. 33 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği

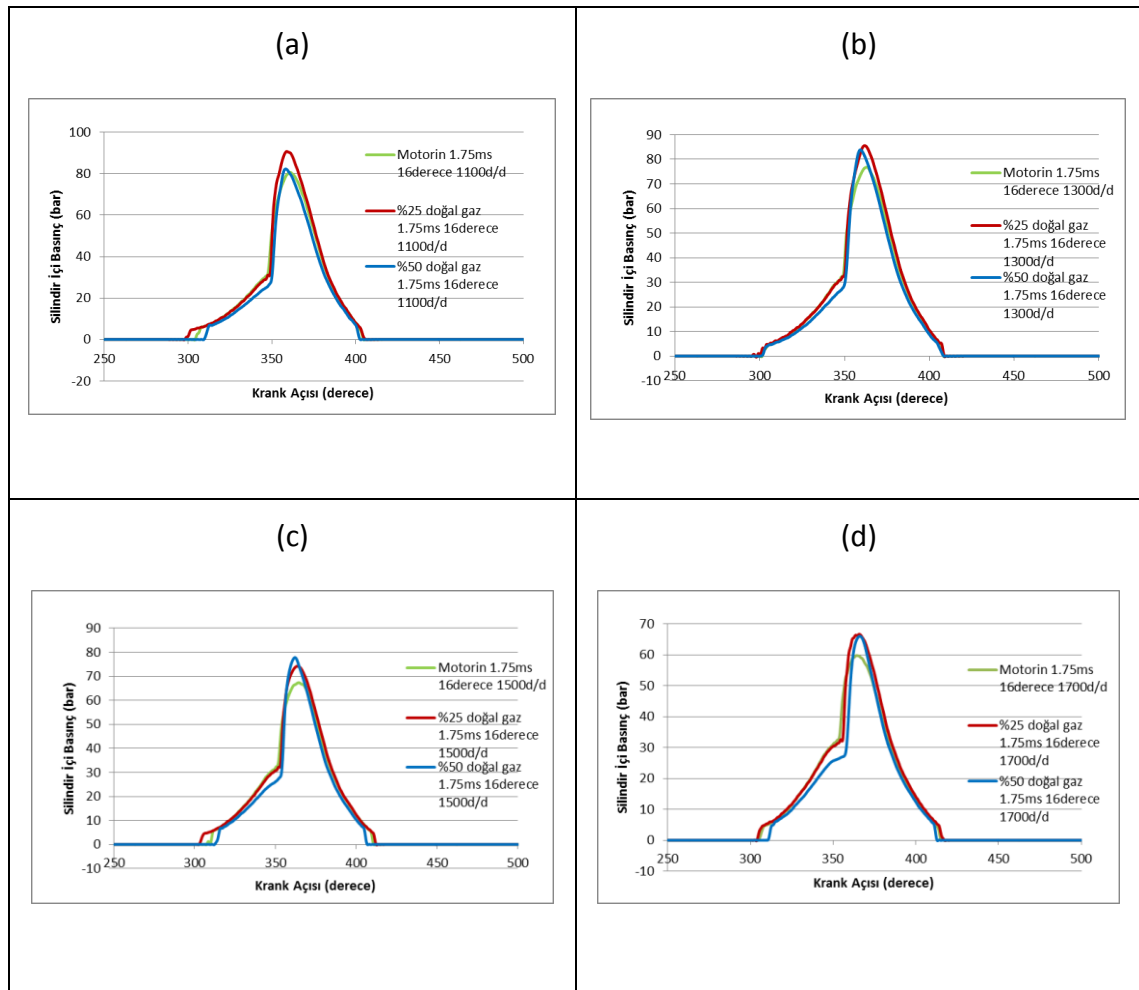
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.34'de görüleceği üzere 16 derece motorin püskürtme avansında, doğalgaz ilaveli yakıtlarda maksimum silindir içi gaz basınçlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 4.35 ve 37'da ise 20 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, özellikle yüksek motor devirlerinde doğalgaz-motorin çift yakıtlarında silindir içi gaz basıncı değerlerinin, yalnız motorin yakıtına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.36'te ise 24 derece motorin püskürtme avansında, özellikle düşük motor devirlerinde doğalgaz-motorin çift yakıtlarında silindir içi gaz basıncın daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Gaz yakıt olarak kullanılan CH_4 oranı arttıkça tutuşma gecikmesi artmaktadır. CH_4 'ün düşük setan sayısına sahip olması bu durumu açıklamaktadır. Dolayısıyla, CH_4 oranı

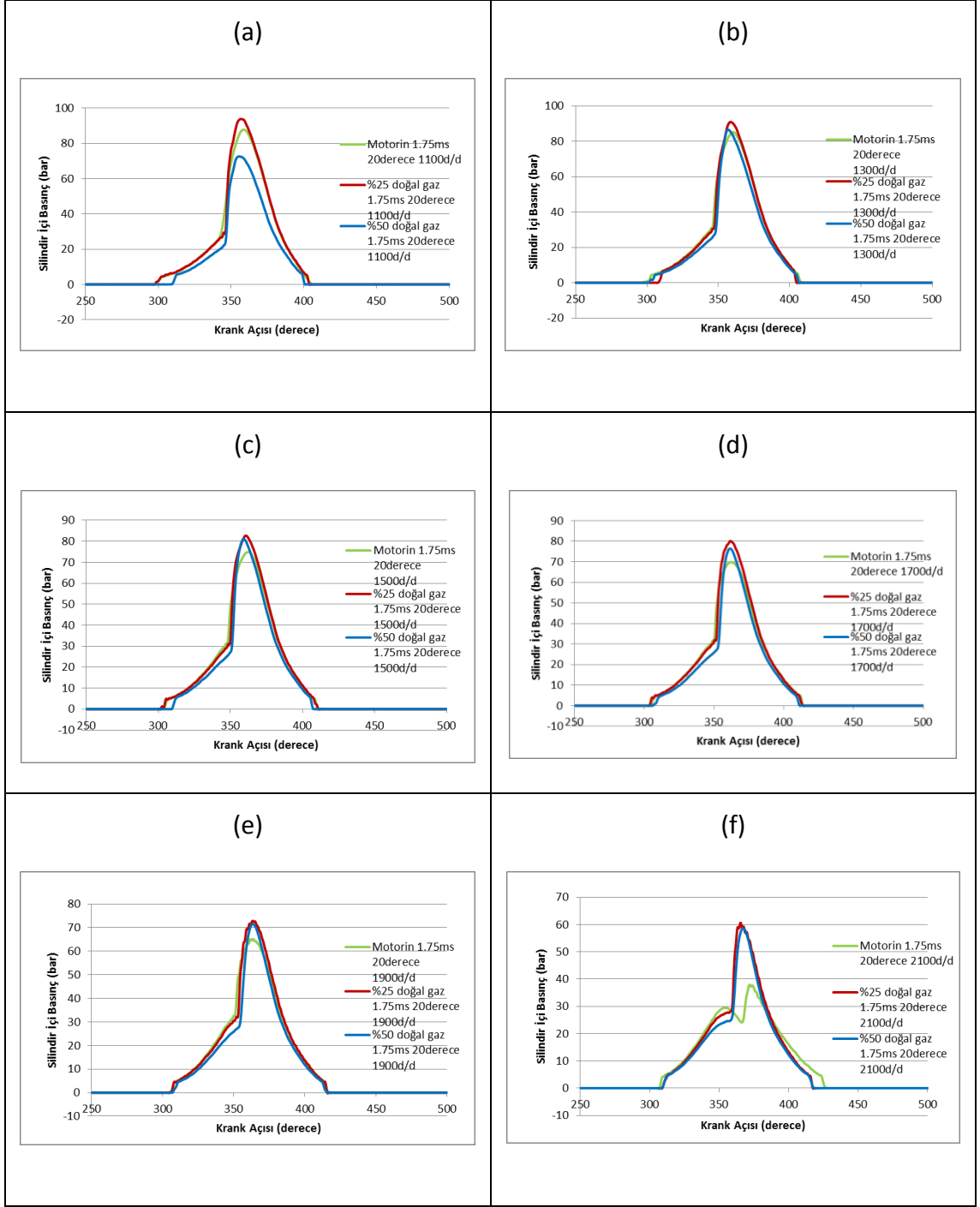
arttıkça pik basınç artmakta ve ısı açığa çıkış oranı yükselmektedir. İçeri alınan gazın artmasıyla birlikte ve gazın çok hızlı yanmasından kaynaklanan ani basınç ve sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. Gaz yakıt ön karışımı olarak kontrolsüz yanma fazında hazır olarak bulunduğu ve yanmanın başlamasıyla hızlı bir şekilde yandığından pik silindir için basıncı ve pik ısı açığa çıkış oranı artmaktadır [75].

Mansor vd. [68] elde ettiği sonuçlara göre, CH₄'ün yüksek olduğu oranlarda silindiri içi maksimum basınç değeri yalnız dizelin kullanıldığı durumdan daha yüksektir.



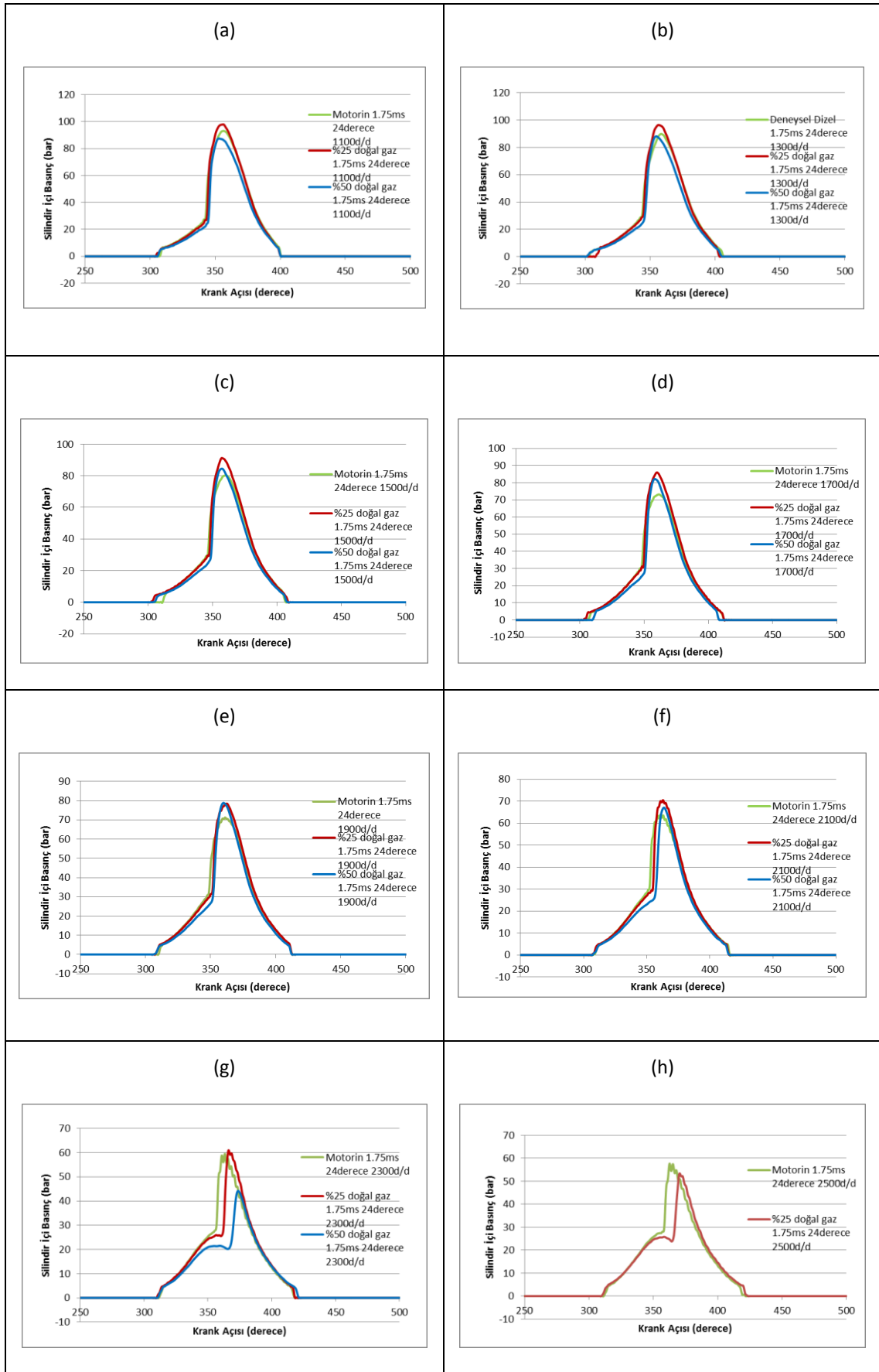
Şekil 4. 34 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



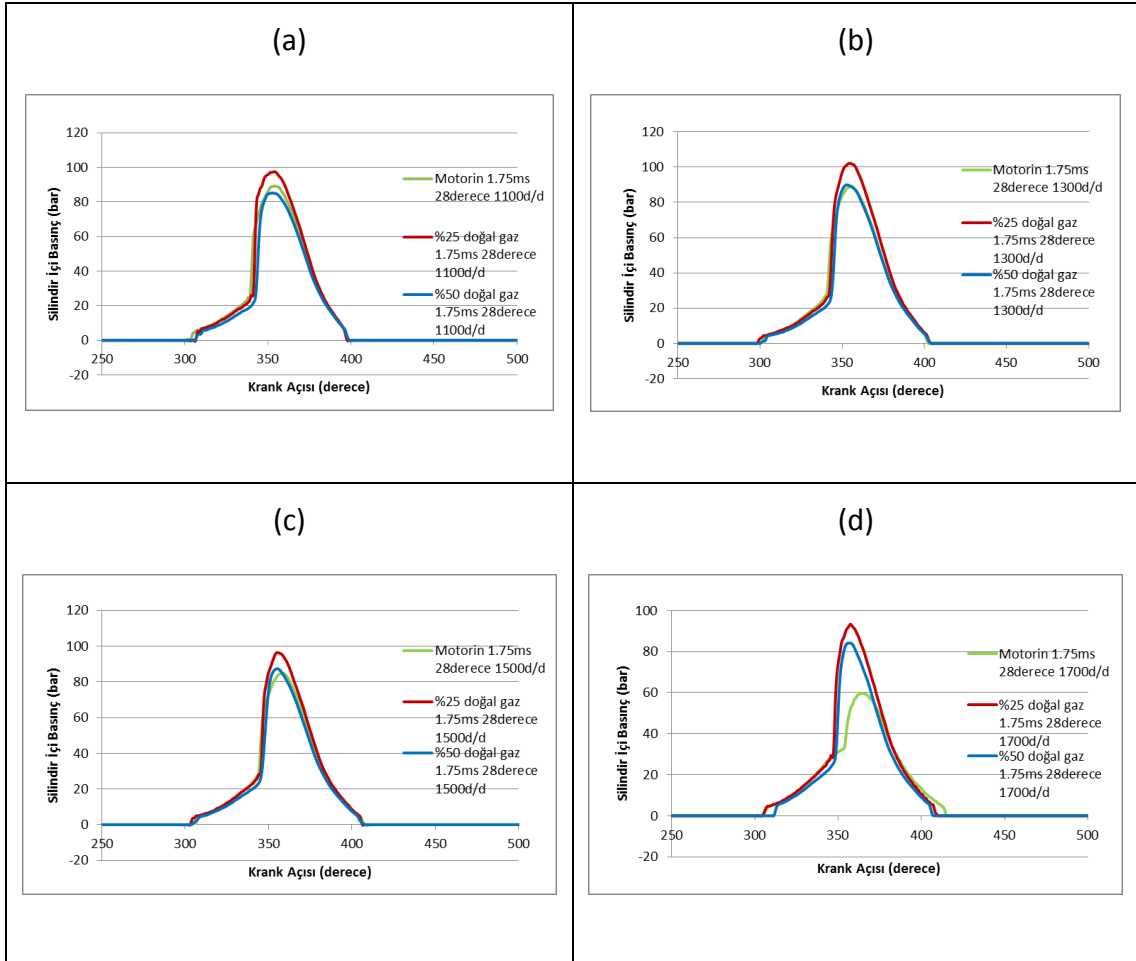
Şekil 4. 35 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

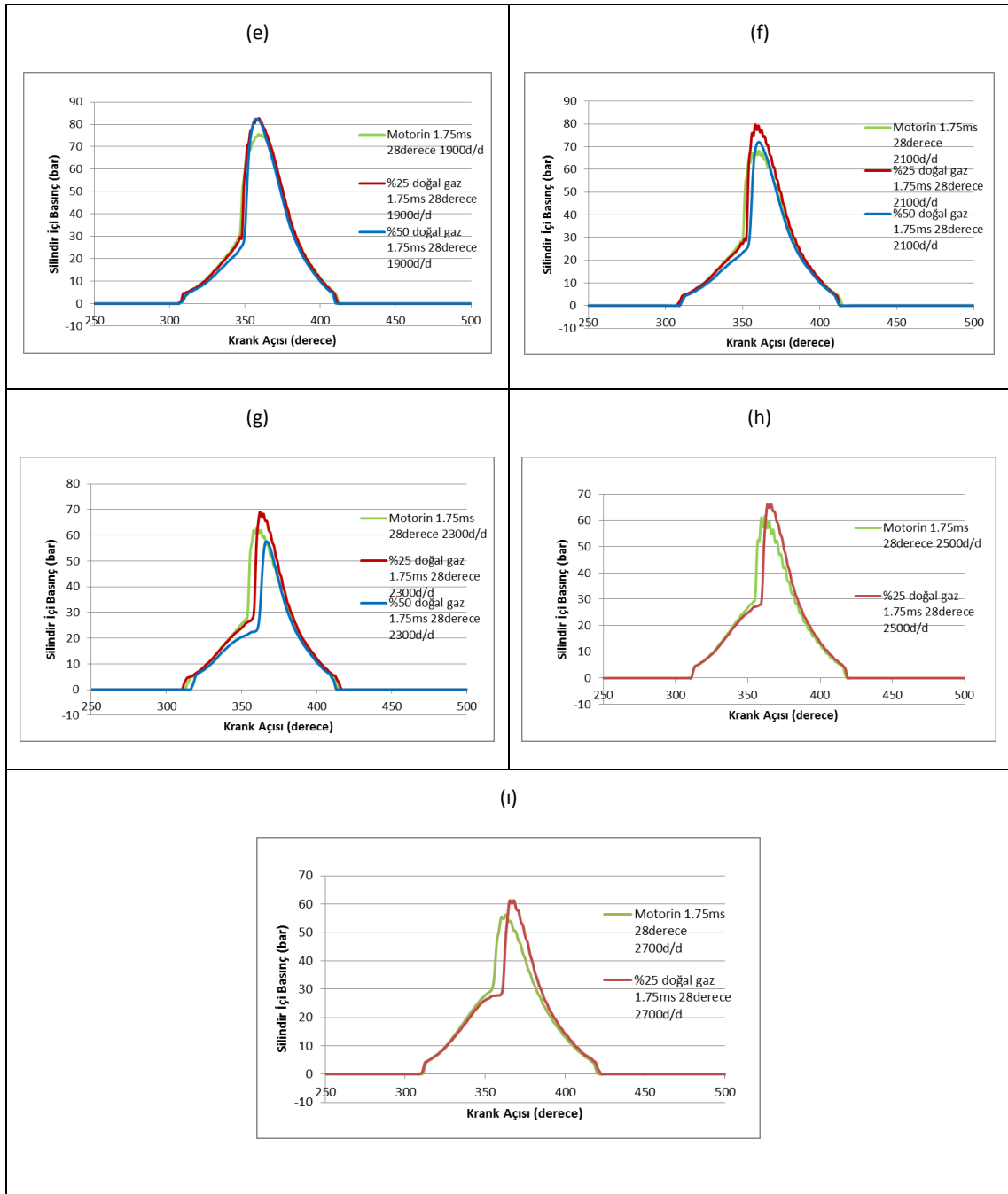
- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



Şekil 4. 36 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi,
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi





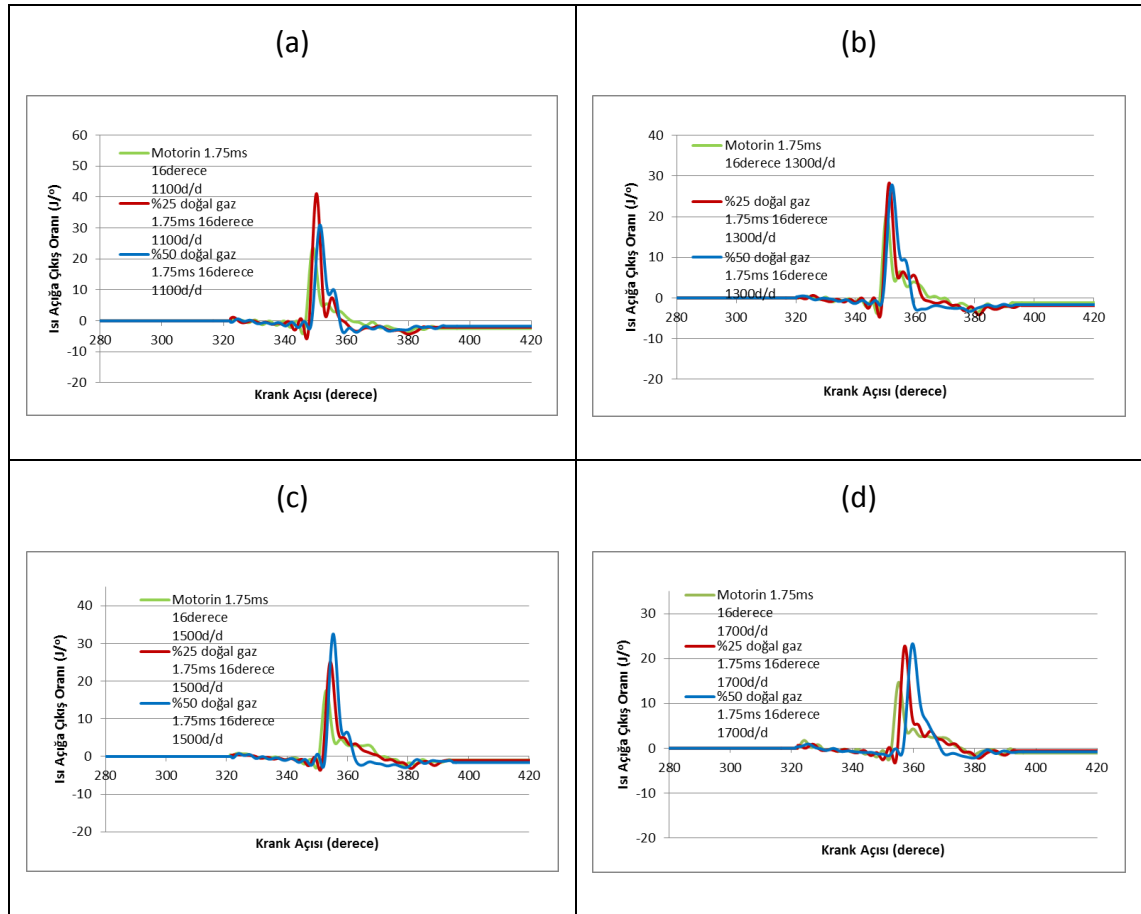
Şekil 4. 37 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
 (i) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

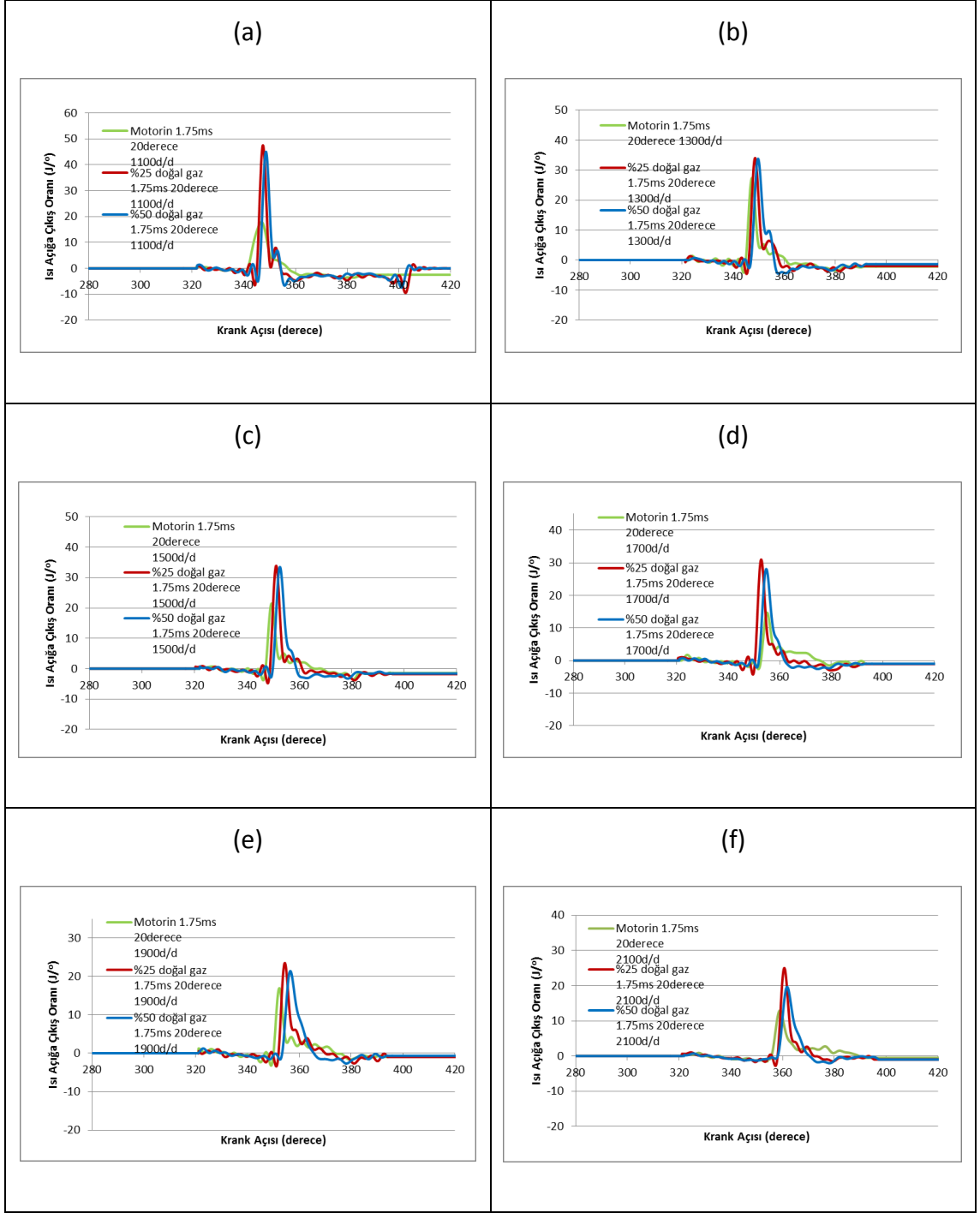
Şekil 4.36 ila 39 arasındaki grafiklerden görüleceği üzere, tüm püskürtme avanslarında, doğalgaz ilaveli çift yakıtların ısı açığa çıkış oranının, yalnız motorin yakıtının ısı açığa çıkış oranına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Gaz yakıt ve havanın ön karışımli ve homojen yapıda kullanılarak, pilot püskürtme ile dizel yakıtla birlikte kontrolsüz yanma fazında bir anda yanmasıyla daha hızlı ve yüksek ısı açığa çıkış oranı gözlenmektedir. Motor yükü arttıkça, silindir içine gönderilen yakıt miktarı arttığı için ısı açığa çıkış oranı artmaktadır [67].



Şekil 4. 38 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

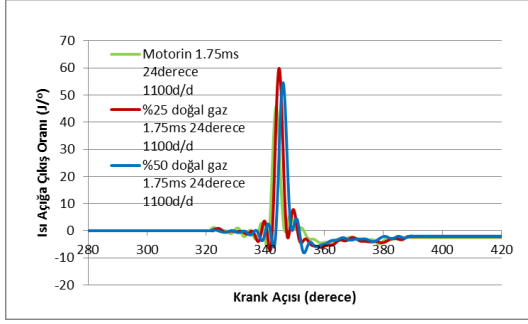
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



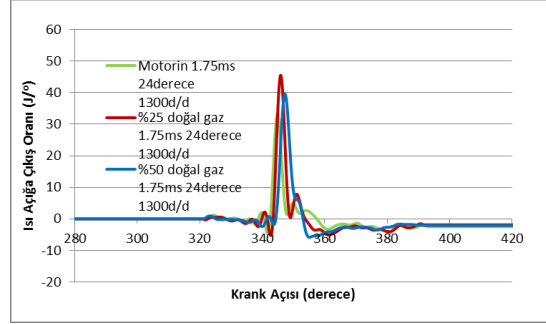
Sekil 4. 39 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

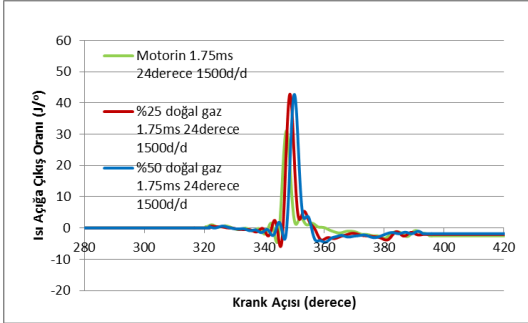
(a)



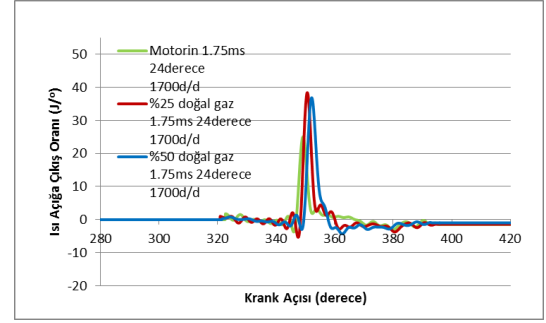
(b)



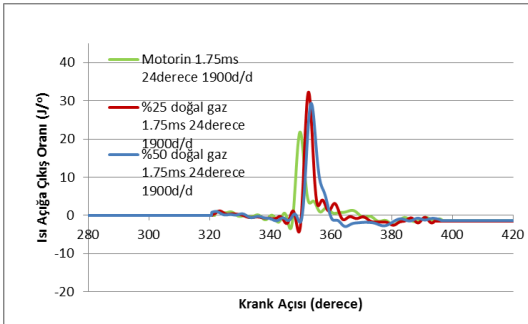
(c)



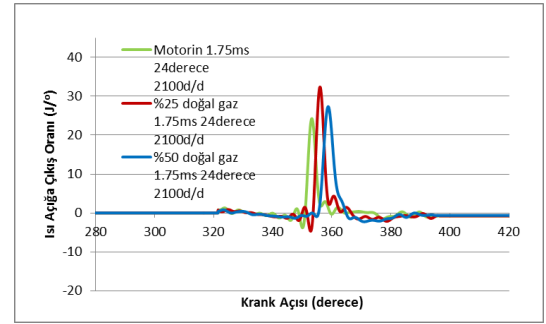
(d)

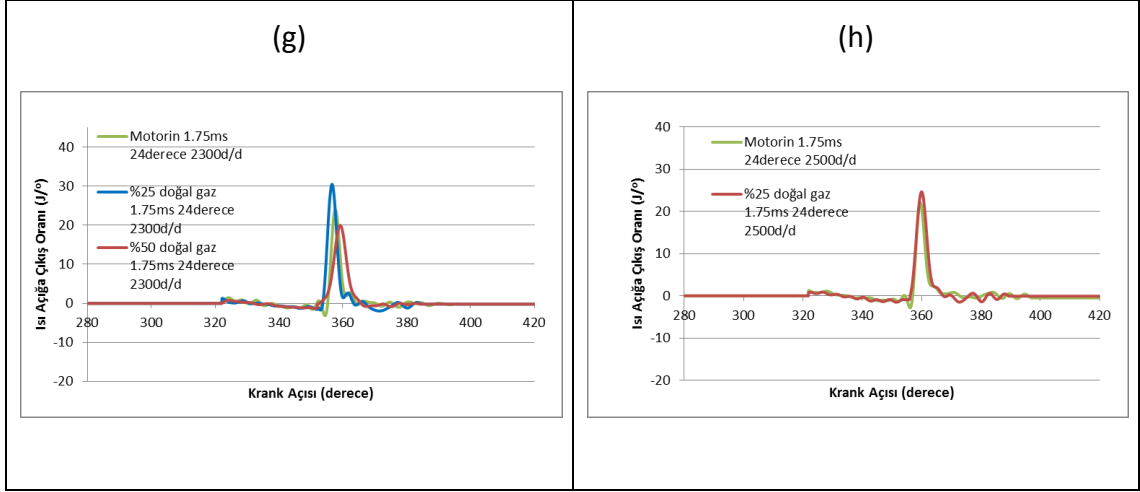


(e)



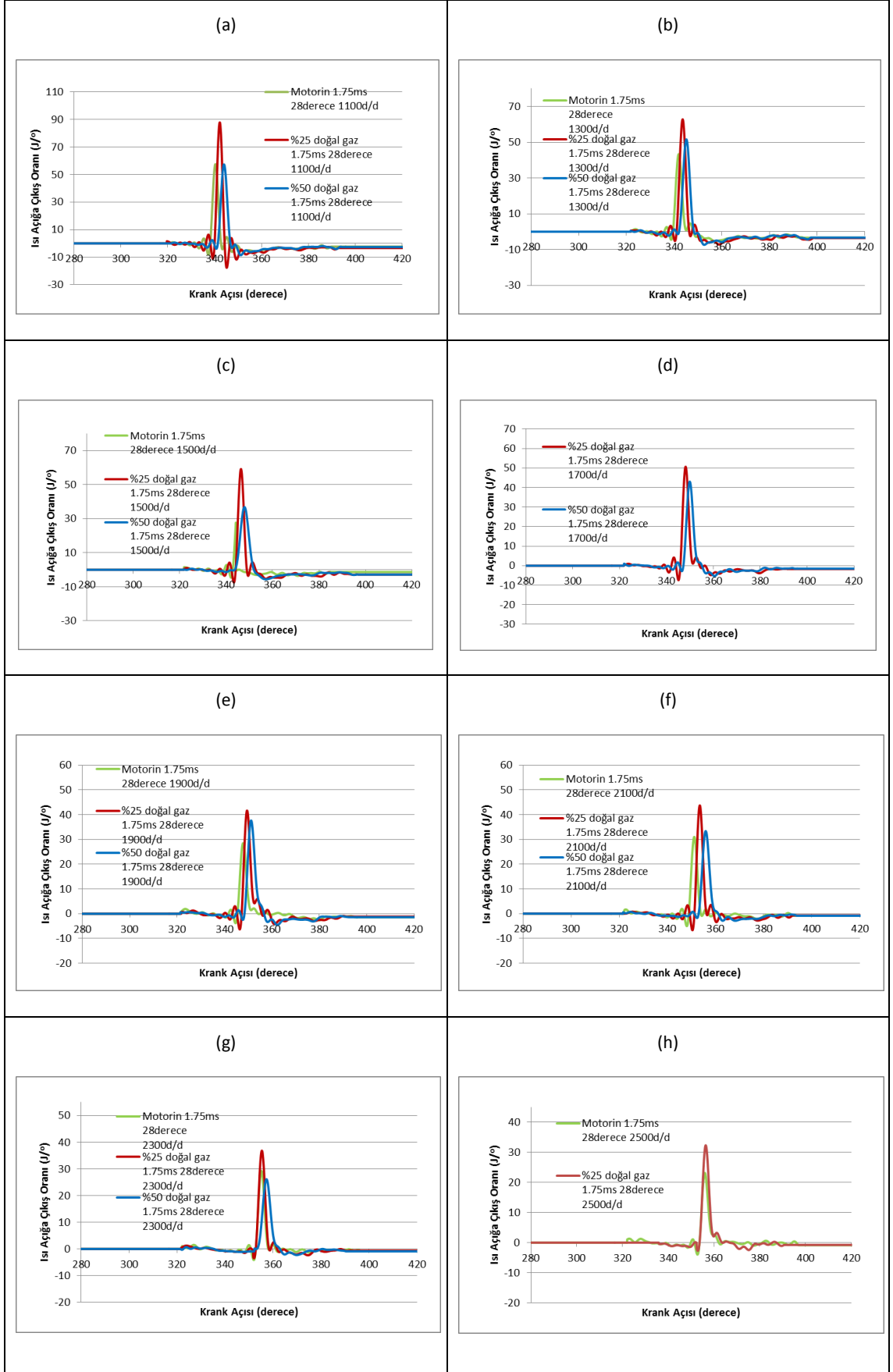
(f)

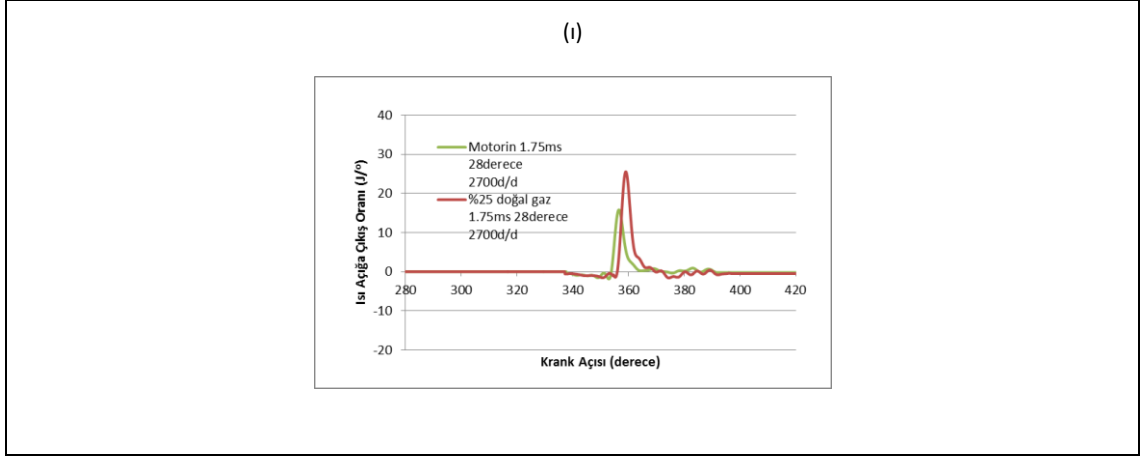




Sekil 4. 40 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi





Şekil 4. 41 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

4.1.5.2 2ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Sonuçları

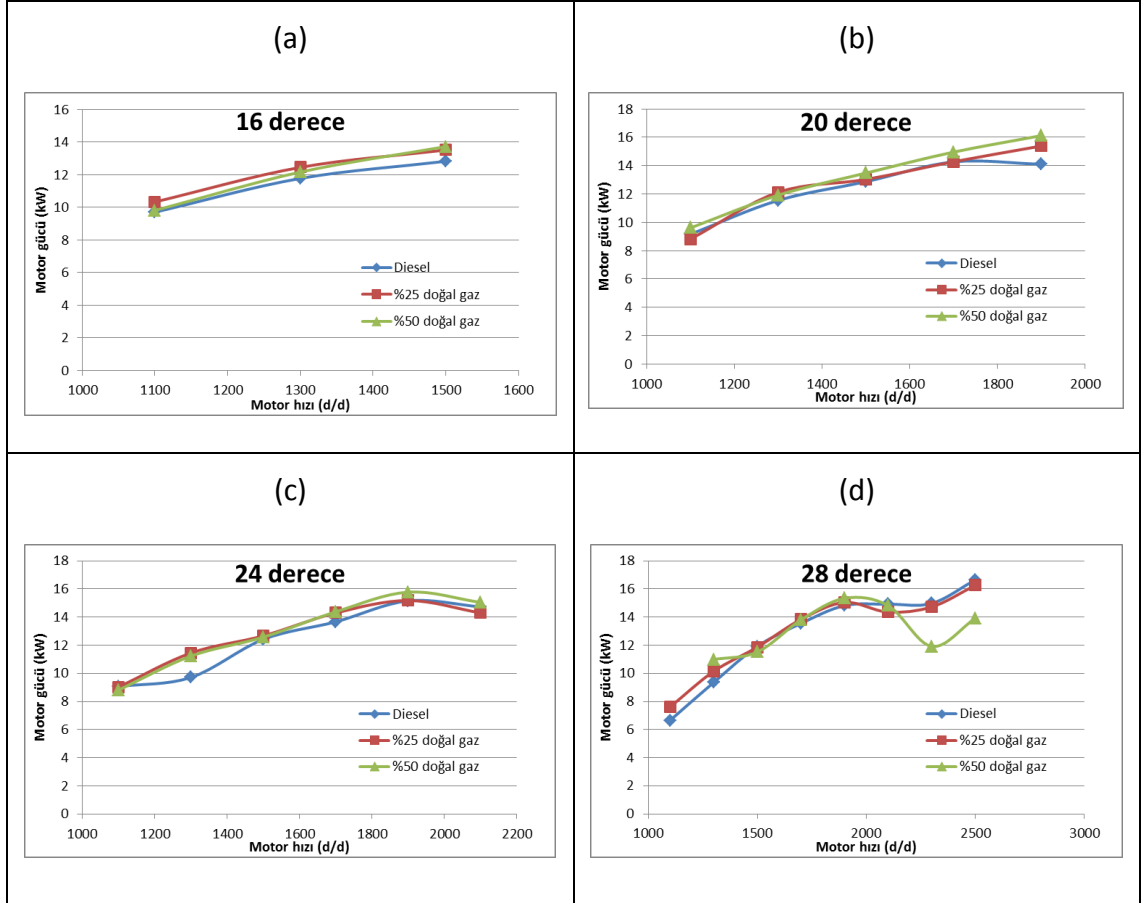
Şekil 4.42'ta görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile motor gücünde tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde benzer karakteristik eğriler gözlemlenmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %6,5 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,1 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,3 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17,9 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında

yalnız motorin yakıtına göre %15,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,3 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17,4 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.43'de ise motor torku verilmiştir. Yine elde edilen sonuçlardan, motor torkunda doğalgaz ilavesi ile ufak bir miktar düşüş meydana gelmediği gibi, bazı çalışma noktalarında motor torku değerinin arttığı da görülmektedir. Maksimum tork artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %2,3 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %3,7 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8,1 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,7 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17,8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %4,3 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,8 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.44'de ise termik verim değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, doğalgaz ilaveli çift yakıtlarda daha düşük termik verim gözlemlenmiştir. Maksimum termik verim düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,8 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,3 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %25,31 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %29,3 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %43,5 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %53,7 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d

motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33,2 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,5 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.45'te ise özgül yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aynı motor hızlarında özgül yakıt tüketiminin doğalgaz ilaveli yakıtlarda, dizel yakıtına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca motor devri yükseldikçe özgül yakıt tüketimlerinde azalma gözlemlenmiştir. Çünkü, motor devri arttıkça, motor gücünde artmaktadır ve motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır [63].

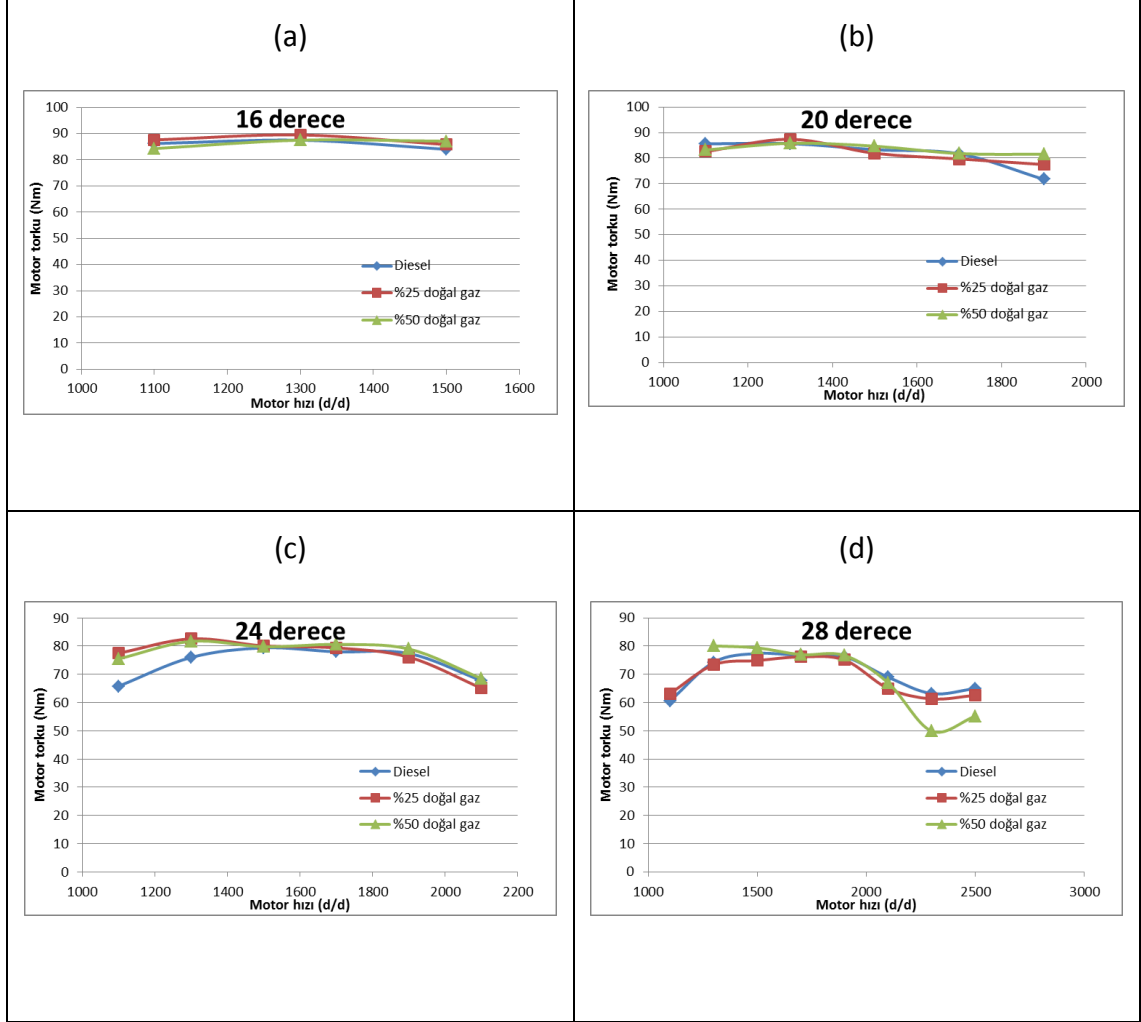
Pilot püskürtmeyle gönderilen dizel yakıtının düşmesi özellikle düşük yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur [74].

Çift yakıtlı motorlarda gaz yakıt oranının artması termik verim ve yanma verimini düşürmektedir. Termik verimin düşüş nedeni, yanmamış gaz yakıt, düşük volümetrik verim ve yanma zamanının gaz yakıt değişiminden sonra tam optimize edilmemesidir [63].



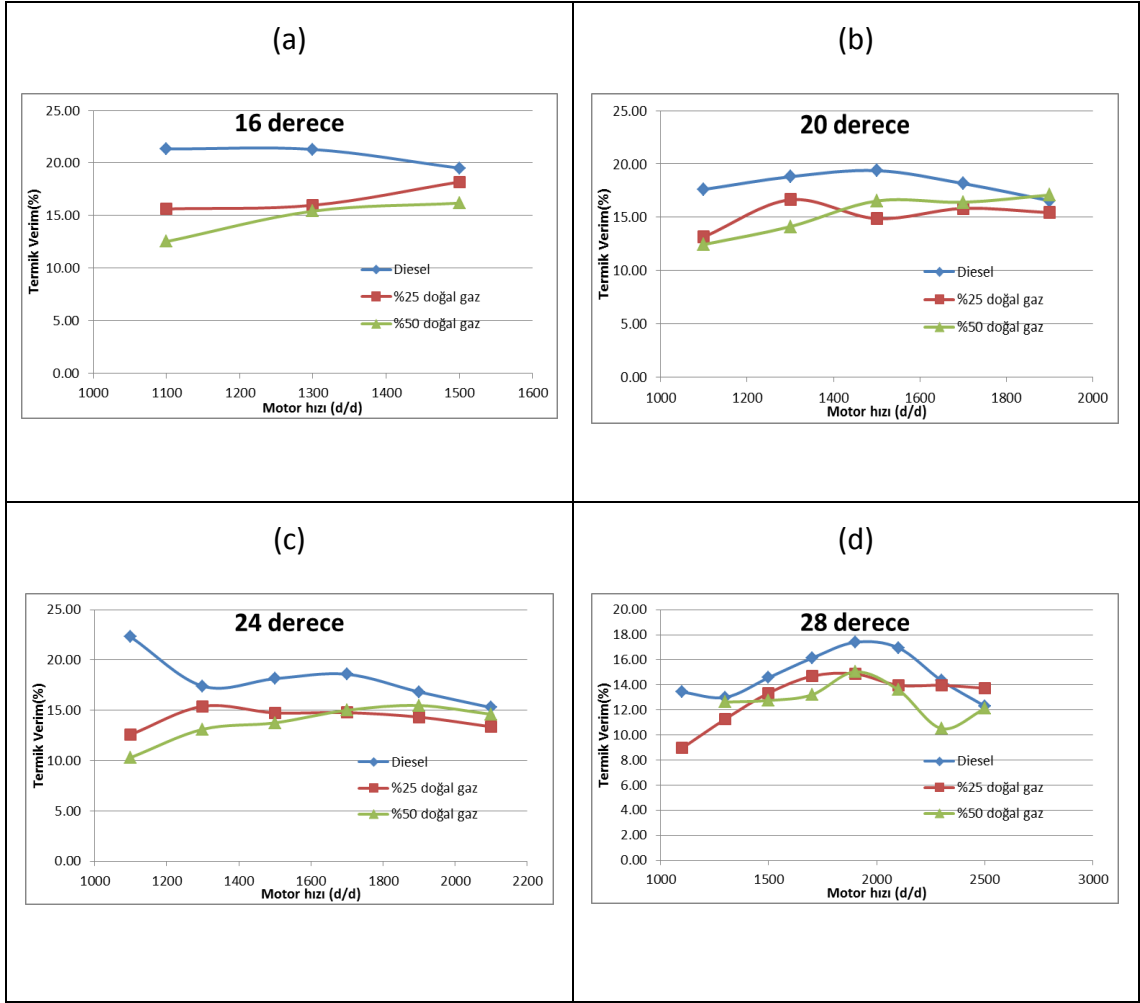
Şekil 4. 42 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



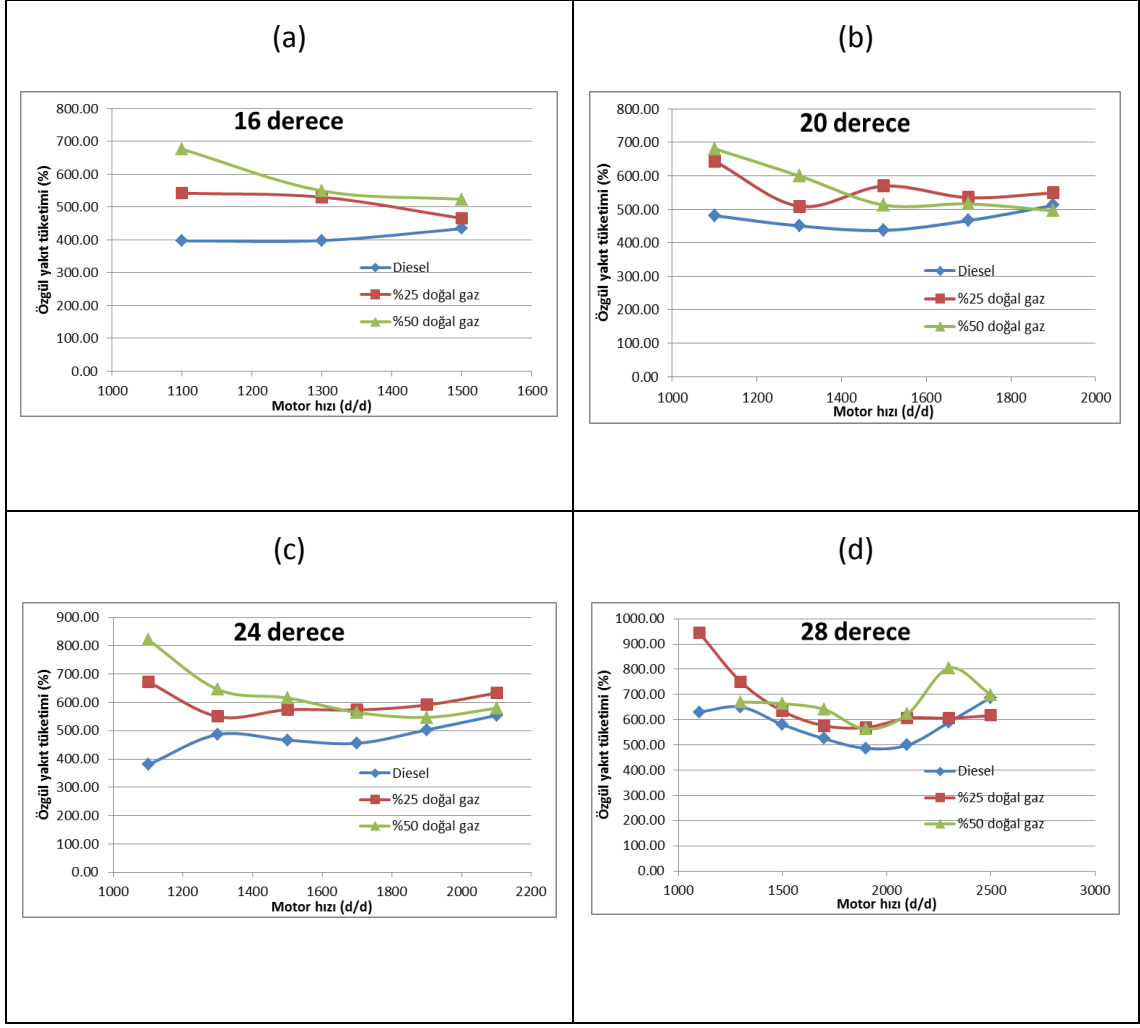
Şekil 4. 43 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
 (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 44 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Sekil 4. 45 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.46’te görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile karbon monoksit miktarlarında tüm püskürme avansı ve çalışma devirlerinde artış gösterdiği görülmüştür. Maksimum CO emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %74,4 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %110,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %321,9 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %286,2 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %208,1 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100

d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %305,3 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48,9 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %63,3 artış meydana geldiği bulunmuştur.

CO formasyonu yanmamış gaz yakıt ulaşılabilirliği, karışım teşkili, yakıt dekompozisyonu ve oksidasyonuna bağlı olarak açığa çıkar. Düşük yüklerde dolgu sıcaklığının düşüklüğü veya aşırı fakir karışımın oluşması yanma verimini olumsuz olarak etkilediği için, CO emisyonları artmaktadır [70]. Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, motor yükü arttıkça CO emisyonu azalmaktadır, ama yine de dizel-gaz yakıt (doğalgaz) kullanımında açığa çıkan CO miktarı, sadece dizel kullanıldığı durumlara göre çok yüksektir. Özellikle düşük yüklerde, sıcaklık çok artmadığı için efektif yanma sağlanamamakta ve emisyon artmaktadır [70].

Şekil 4.47’te ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, doğalgaz ilavesi ile karbondioksit miktarında düşüş görülmüştür.

Gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

Şekil 4.48’da ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve düşük motor devirlerinde, doğalgaz ilavesi ile hidrokarbon oranında düşüş görülürken; yüksek devir şartlarında ise doğalgaz ilaveli yakıtlarda hidrokarbon miktarının yalnız motorin hidrokarbon miktarına göre artış görülmüştür.

Düşük yüklerde ilave yakıt olarak kullanılan metan oranının artması sebebiyle HC emisyonu artışı çok fazlayken; yüksek yüklerde daha az artış görülmektedir. Tam motor yükü ve basınçta yanma daha iyi gerçekleştiğinden dolayı HC emisyonunda daha az artış görülmektedir. Özellikle düşük yüklerde, önemli miktarda gaz yakıt yanmaya katılmayarak, egzozdan atılmaktadır. Yük arttıkça gaz yakıtın aleve katılımı arttığı için, açığa çıkan emisyon miktarı azalmaktadır. Yük miktarı arttıkça, hava/yakıt oranı stokiometriye yaklaştıkça, alev ilerleme mekanizması iyileşerek, yanmamış HC miktarı artışı azalmaktadır [62].

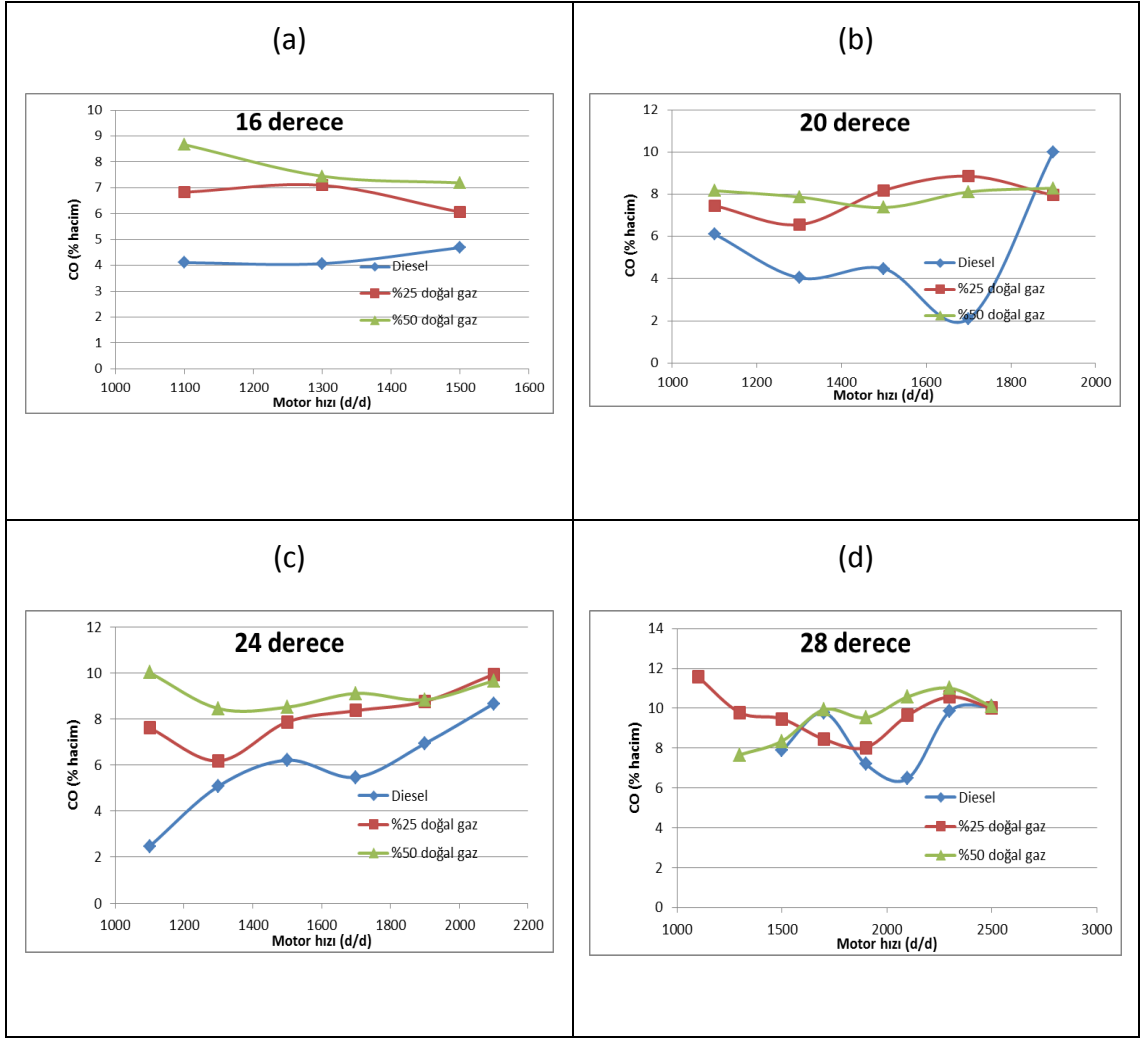
Kullanılan metanın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından ve supap bindirmesi esnasında bir kısmının dışarı kaçmasından dolayı tam yanma gerçekleşmemektedir. Bu nedenle HC emisyonlarında ciddi oranda artış görülmektedir [74].

Şekil 4.49’de ise NO_x emisyonları verilmiştir. Maksimum NO_x emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %46,6 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %71,2 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %42 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %69,9 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %69,2 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %141,1 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %36,1 düşüş meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %98,1 artış meydana geldiği bulunmuştur. %50 doğalgaz ilaveli doğalgaz - motorin çift yakıtı şartlarında NO_x emisyonları, yüksek devir şartlarında yalnız motorin yakıtı NO_x emisyon oranlarına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Gaz yakıt daha yüksek silindir içi sıcaklık ve basınca sebep olmaktadır. Yüksek oksijen konsantrasyonu ve yüksek silindir içi sıcaklıkların NO_x formasyonunun temel nedeni olduğu bilinmektedir. NO_x formasyonu büyük oranda gaz yakıtın hava yakıt oranına bağlıdır. NO_x emisyonu çift yakıt modunda özellikle kontrolsüz yanma fazında açığa çıkan ısı açığa çıkış oranına bağlıdır. Düşük yüklerde volümetrik verimin de etkisiyle, NO_x emisyonlarını pozitif olarak etkilemektedir. Buna karşılık orta ve yüksek yüklerde çift yakıt kullanımında hava-yakıt oranının zenginleşmesinden dolayı NO_x emisyonları yalnız motorin yakıtı kullanımına göre, silindir içi sıcaklıkların da artmasından dolayı, artmaktadır [67]. Diğer taraftan; bölgesel olarak aşırı zengin karışım bölgeleri silindir içinde NO_x formasyonuna sebep olmaktadır. Bu yüzden tutuşma ve silindir içindeki sıcaklık, uygun püskürtme avansı ile kontrol altına alınabilmektedir [69].

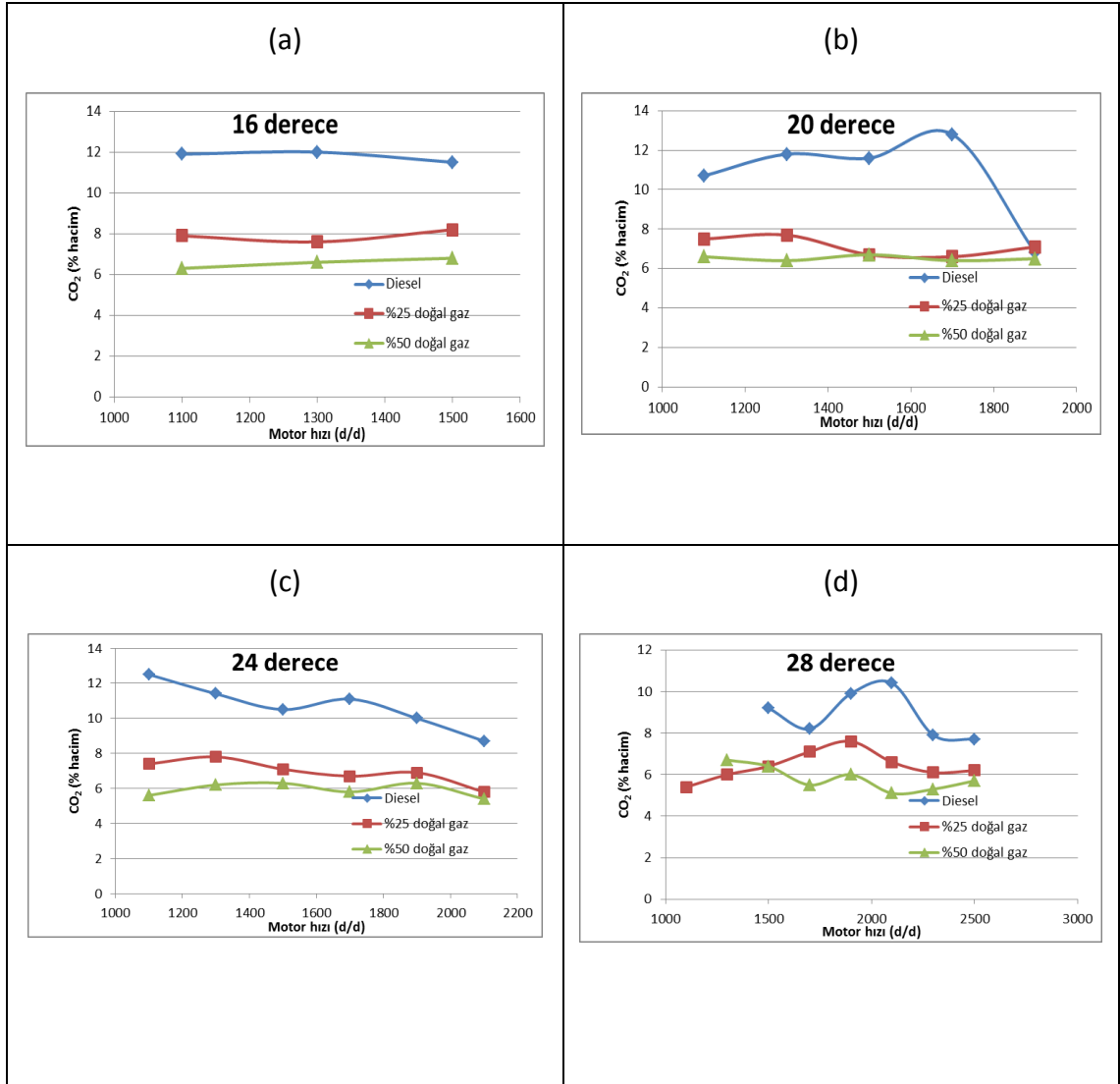
Şekil 4.50’de ise is emisyon değerleri verilmiştir. Maksimum is emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,5 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %16,2 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,1 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %49,2 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %80,8 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33,6 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 doğalgaz ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,2 artış meydana geldiği; %50 doğalgaz ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %67,3 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, %25 doğalgaz ilaveli çift yakıtın is miktarının daha yüksek, %50 doğalgaz ilaveli motorin-doğalgaz çift yakıtı is miktarlarından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.66’da görüldüğü gibi, doğalgaz ilavesi ile egzoz çıkış sıcaklığında farklı devir ve püskürtme avanslarında yalnız motorin yakıtına göre daha düşük seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Silindir içine gönderilen metan oranı arttıkça is emisyonunun azaldığı görülmektedir. Ayrıca CH₄, dizel yakıtından daha az karbon içerdiği için is emisyonu daha fazla azalmaktadır. CH₄ gazı emme manifoldundan gönderildiğinde, hava ile daha homojen karıştığından, daha az yakıt içeri püskürtülerek daha verimli yanma elde edilebilmektedir [75]. Diğer taraftan, çift yakıt kullanımında oksijen konsantrasyonunun düşmesinden dolayı, yakıtın oksijenle karşılaşması daha zor hale gelmektedir. Bu durum is oluşumunu arttırıcı etki göstermektedir [70].



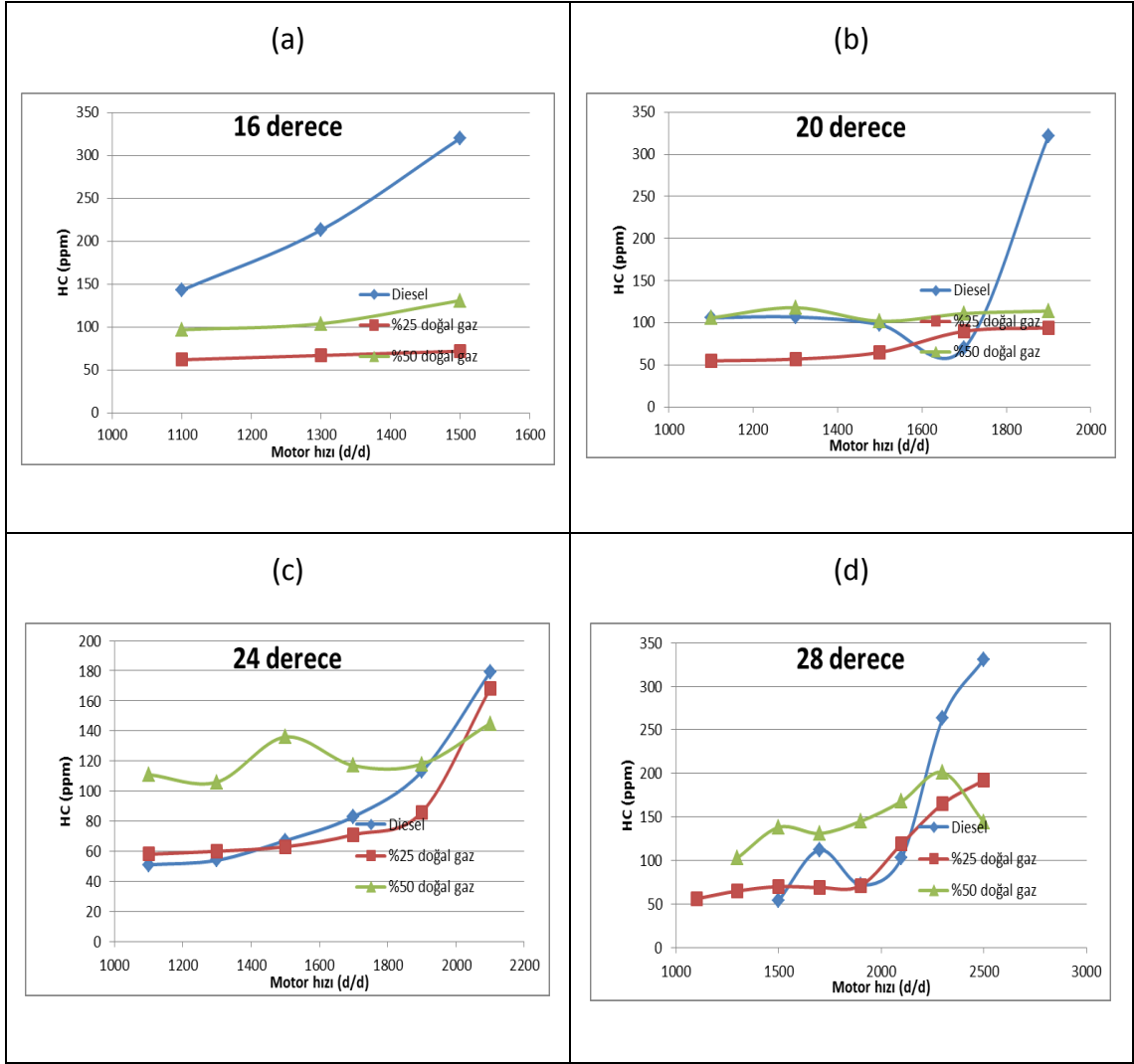
Şekil 4. 46 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



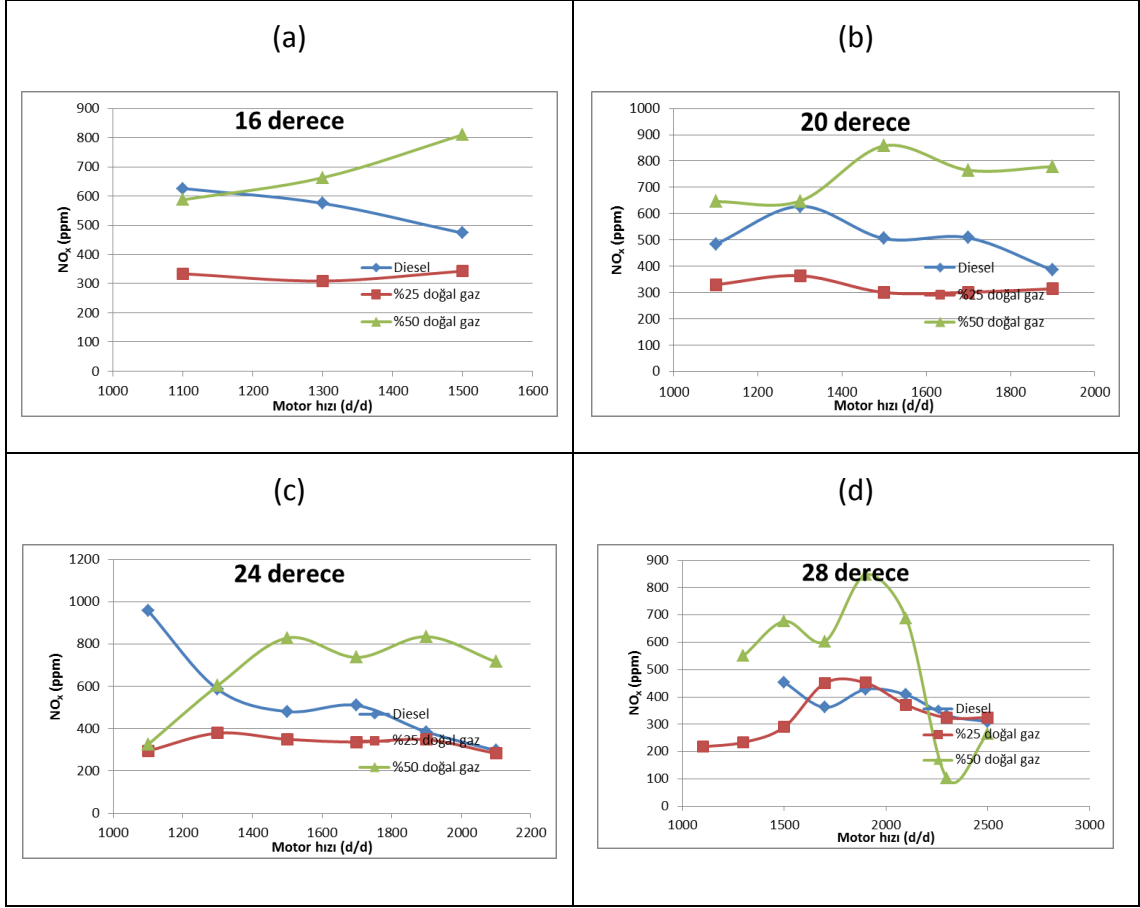
Şekil 4. 47 Farklı püskürtme avanslarında CO₂ emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
 (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi



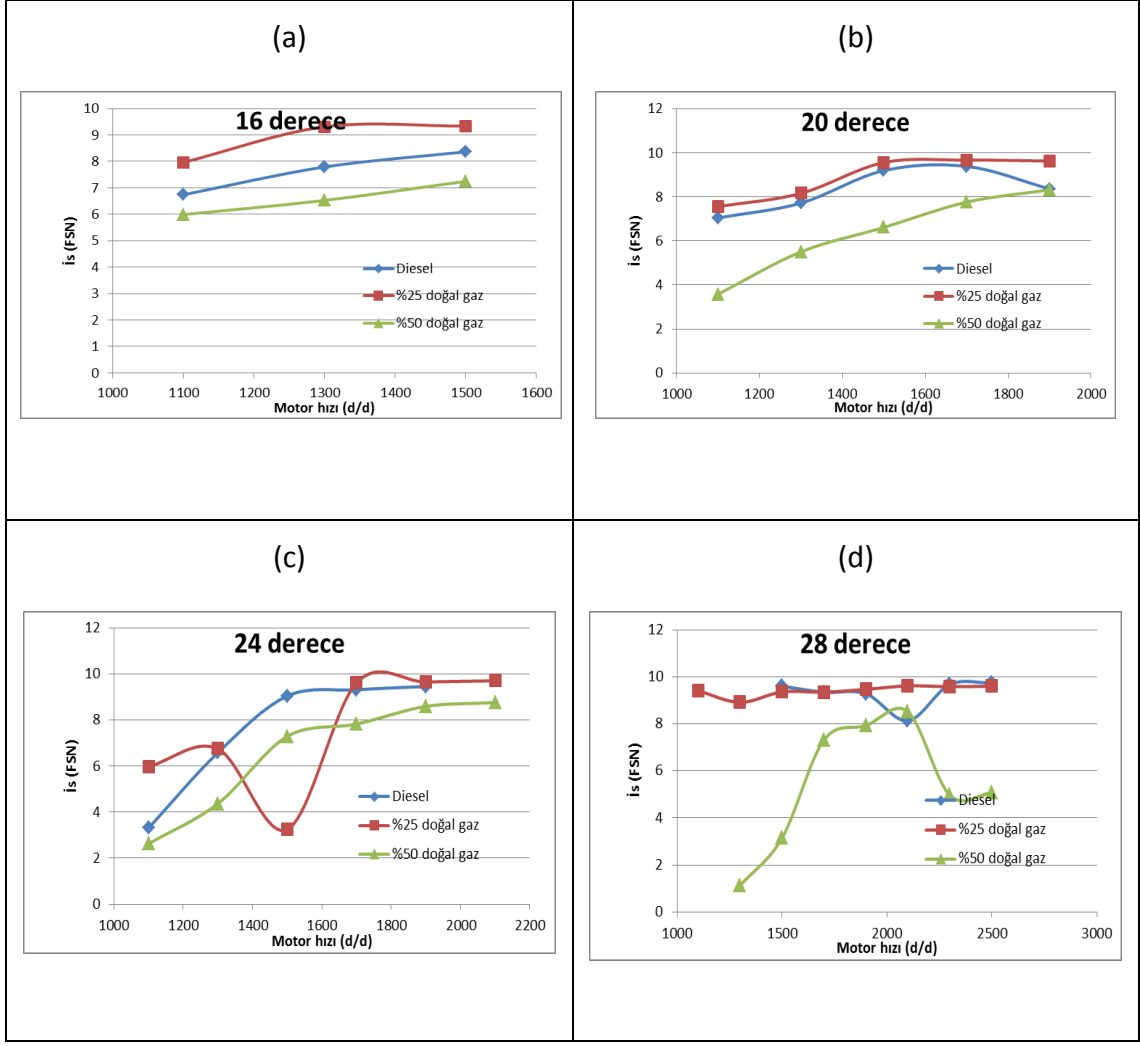
Şekil 4. 48 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi



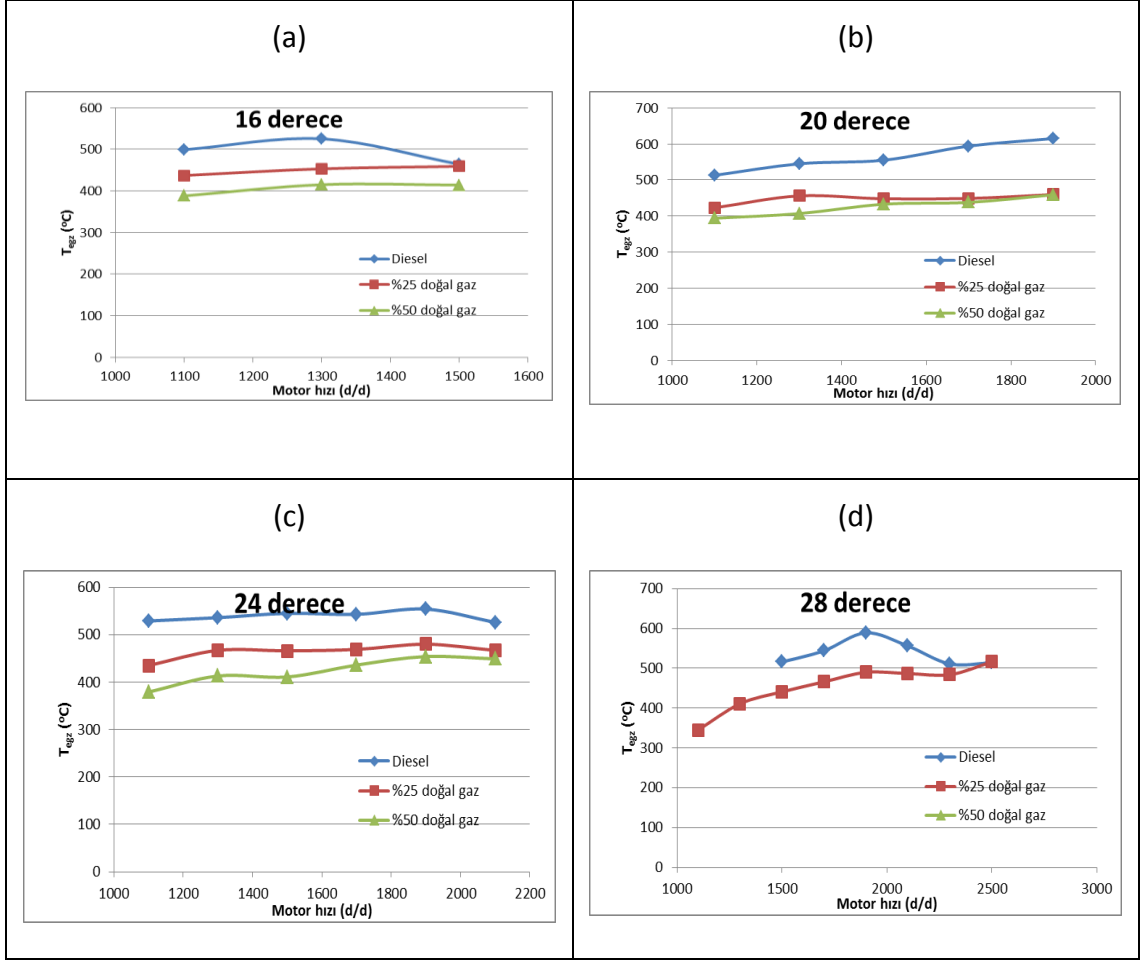
Şekil 4. 49 Farklı püskürtme avanslarında NO_x emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NO_x emisyonu eğrisi



Şekil 4. 50 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi



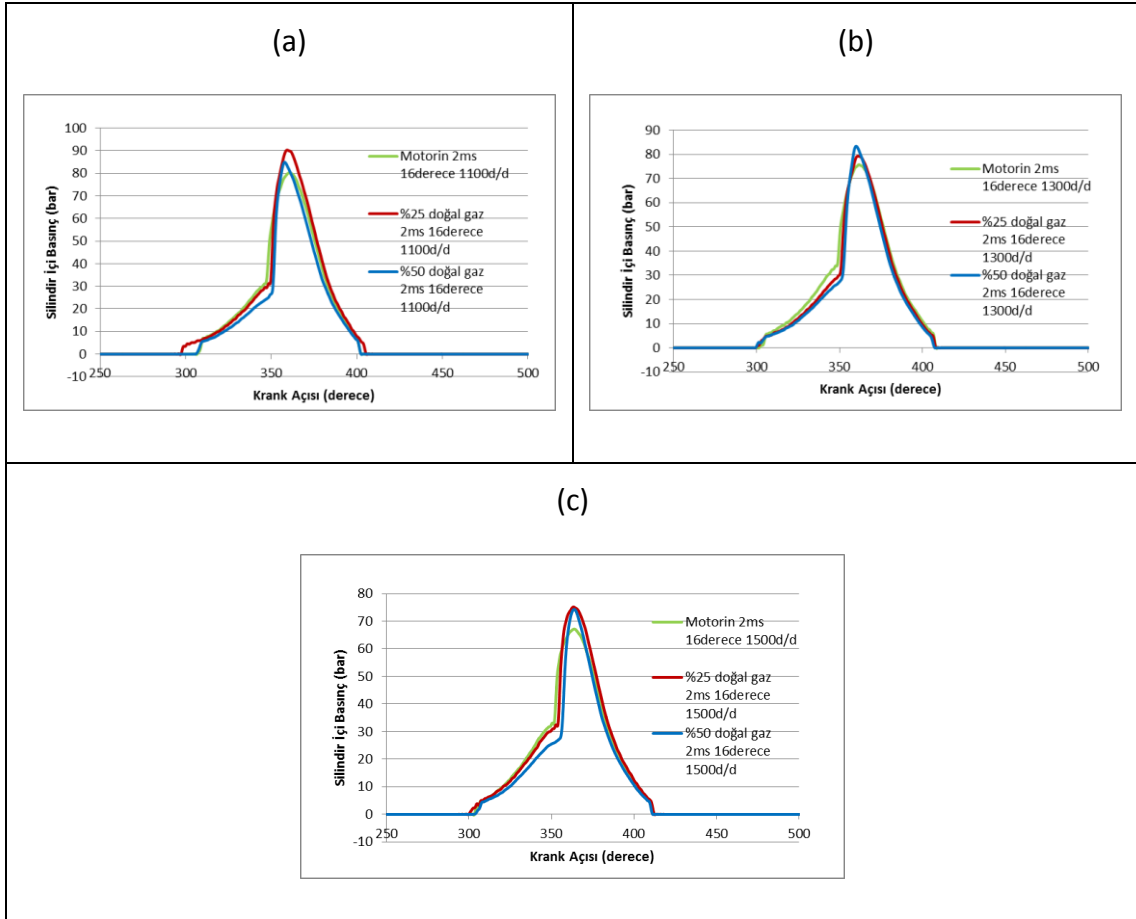
Şekil 4. 51 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi,

Şekil 4.52 ve 53’de görüleceği üzere 16 ve 20 derece püskürtme avanslarında, doğalgaz ilaveli şartlarda, silindir içi gaz basıncı, yalnız motorin yakıtının silindir içi gaz basıncına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.54’de 24 derece püskürtme avansında silindir içi gaz basıncı verilmiştir. Düşük devirlerde yalnız motorin silindir içi basıncı doğalgaz katkılı doğalgaz-motorin yakıtına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.55’te görüleceği üzere 28 derece püskürtme avansında, doğalgaz ilaveli çift yakıtların silindir içi gaz basıncının, yalnız motorin yakıtının silindir içi gaz basıncına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

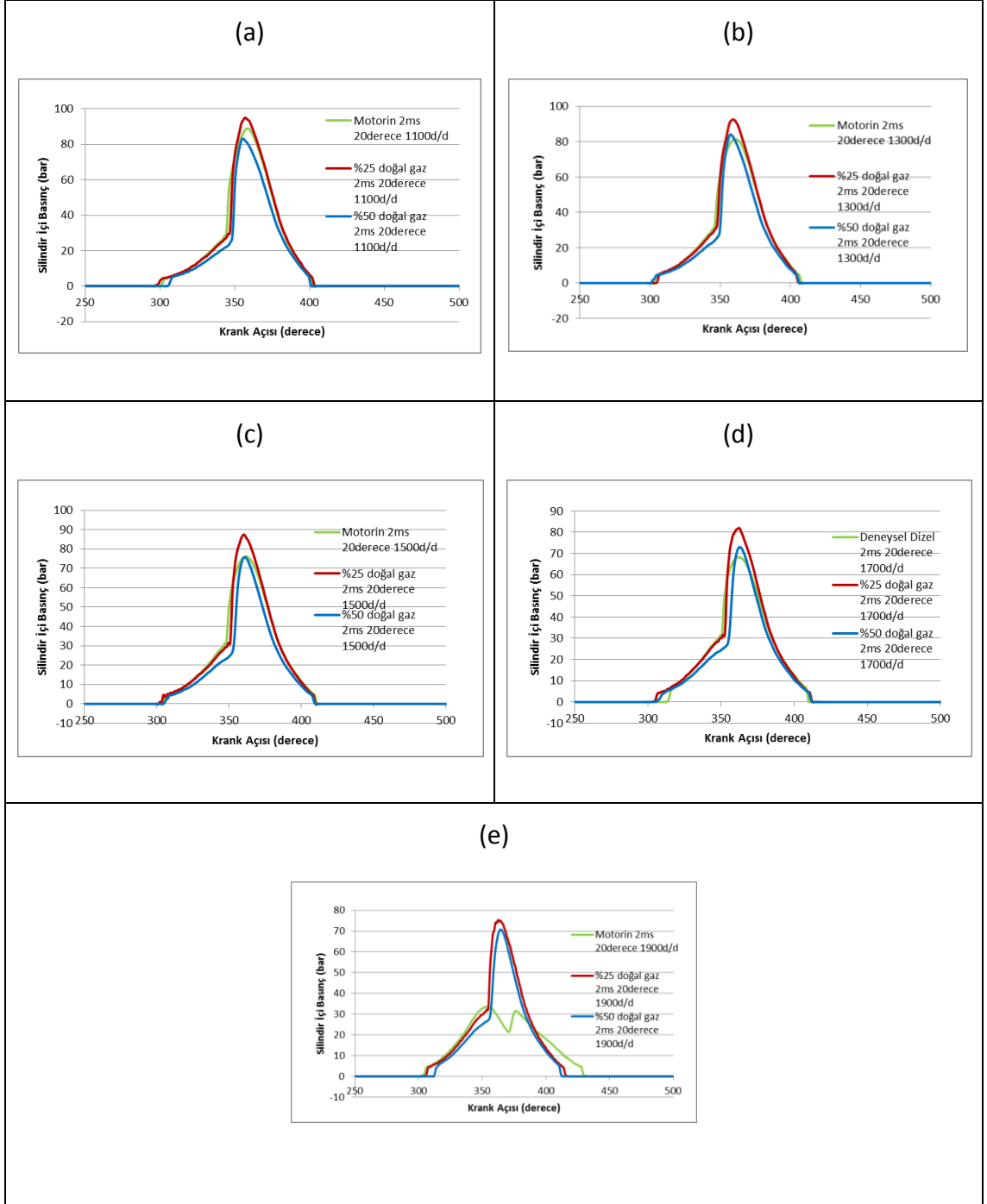
Gaz yakıt kullanımında, motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha yüksek enerji

açığa çıkmasını, gaz yakıtın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi gaz basıncı değerlerinin artmasını sağlamaktadır [69]. Ancak diğer taraftan, Gaz yakıt kullanılan durumlarda, pilot püskürtmeyle yanma odasına gönderilen motorin miktarının düşük olması, yanma süresinin uzamasına, yanma yoğunluğunun azalmasına ve dolayısıyla silindir içi basınçların düşmesine sebep olmaktadır [69].



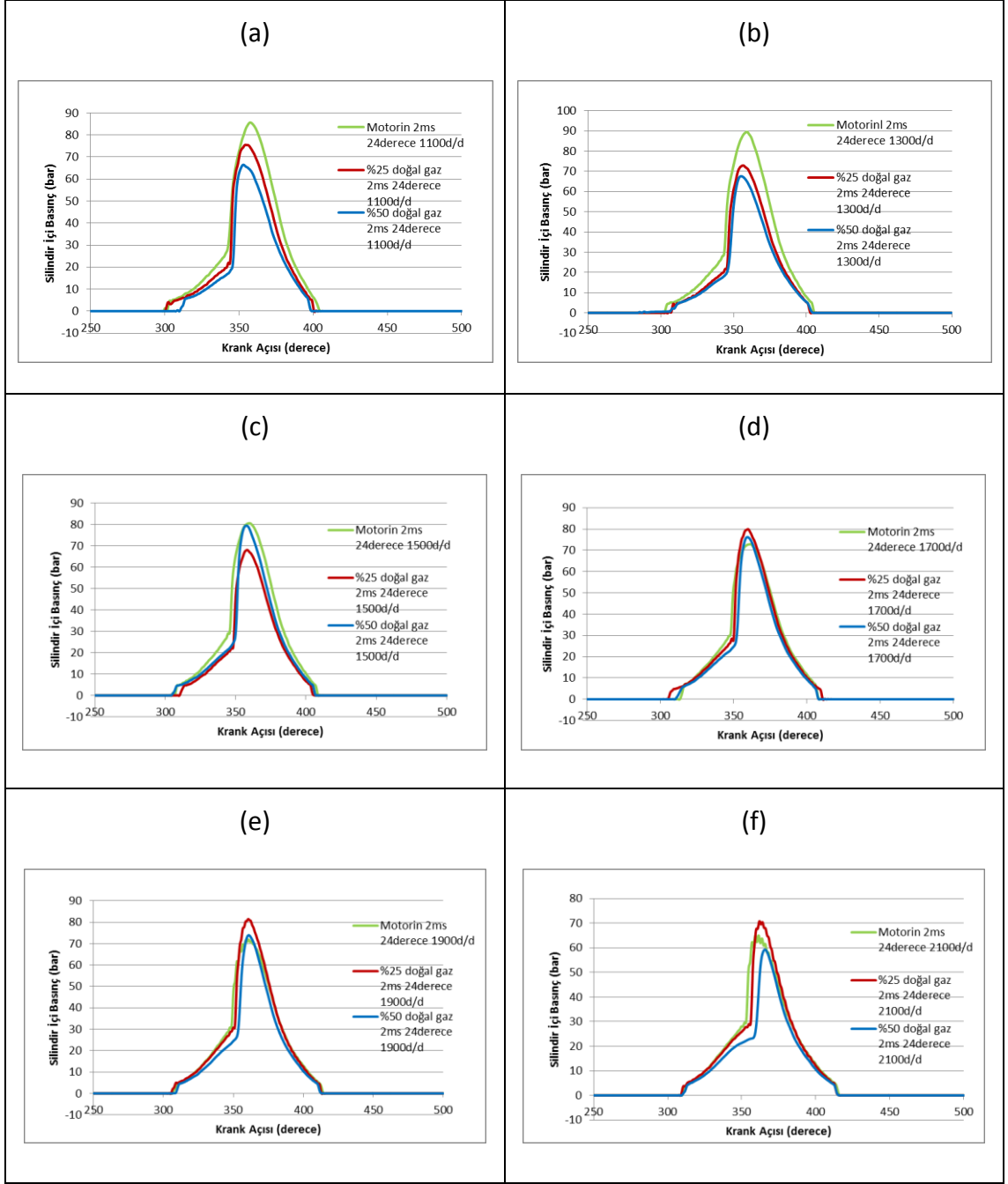
Sekil 4. 52 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



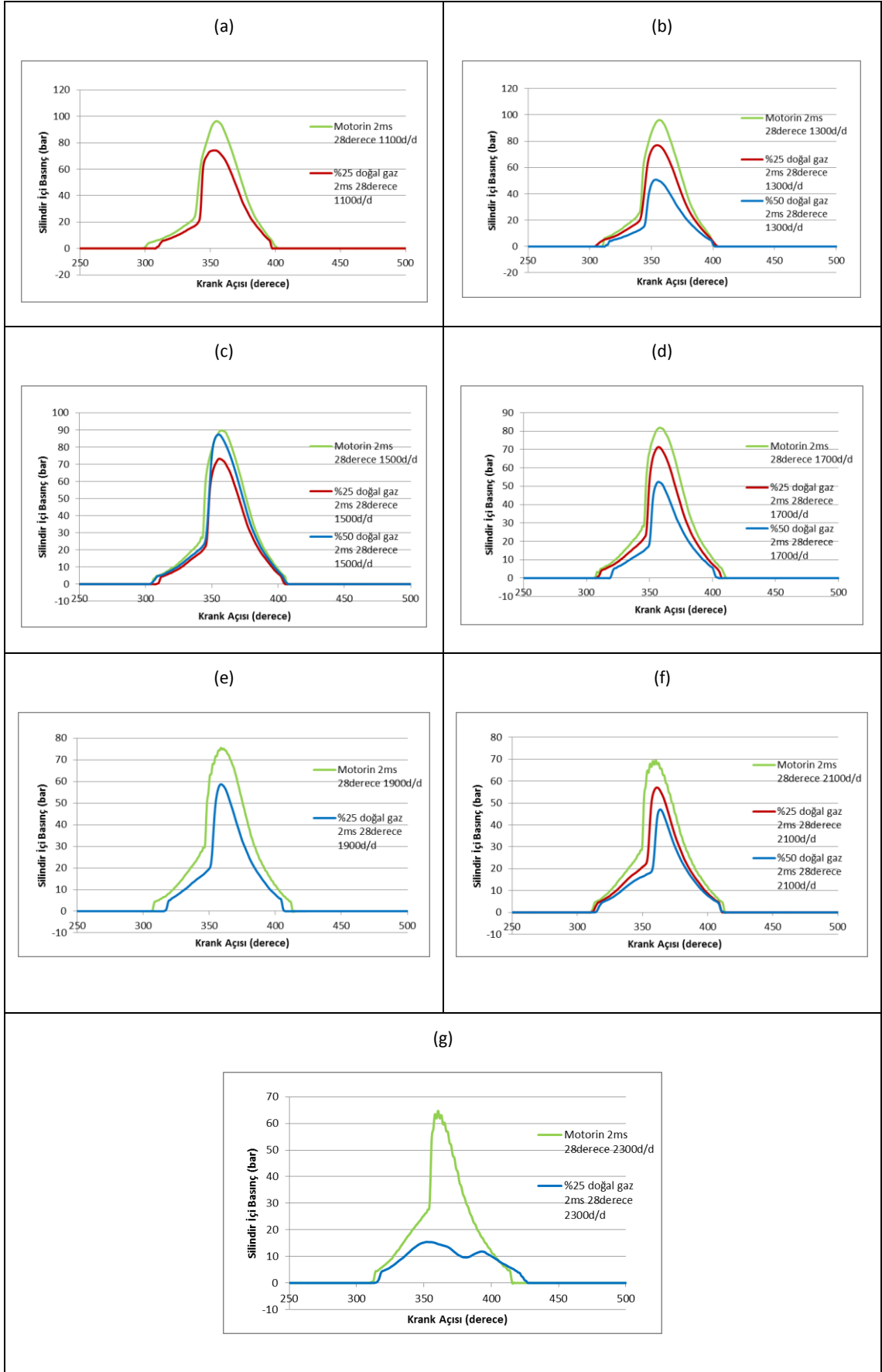
Şekil 4. 53 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



Şekil 4. 54 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

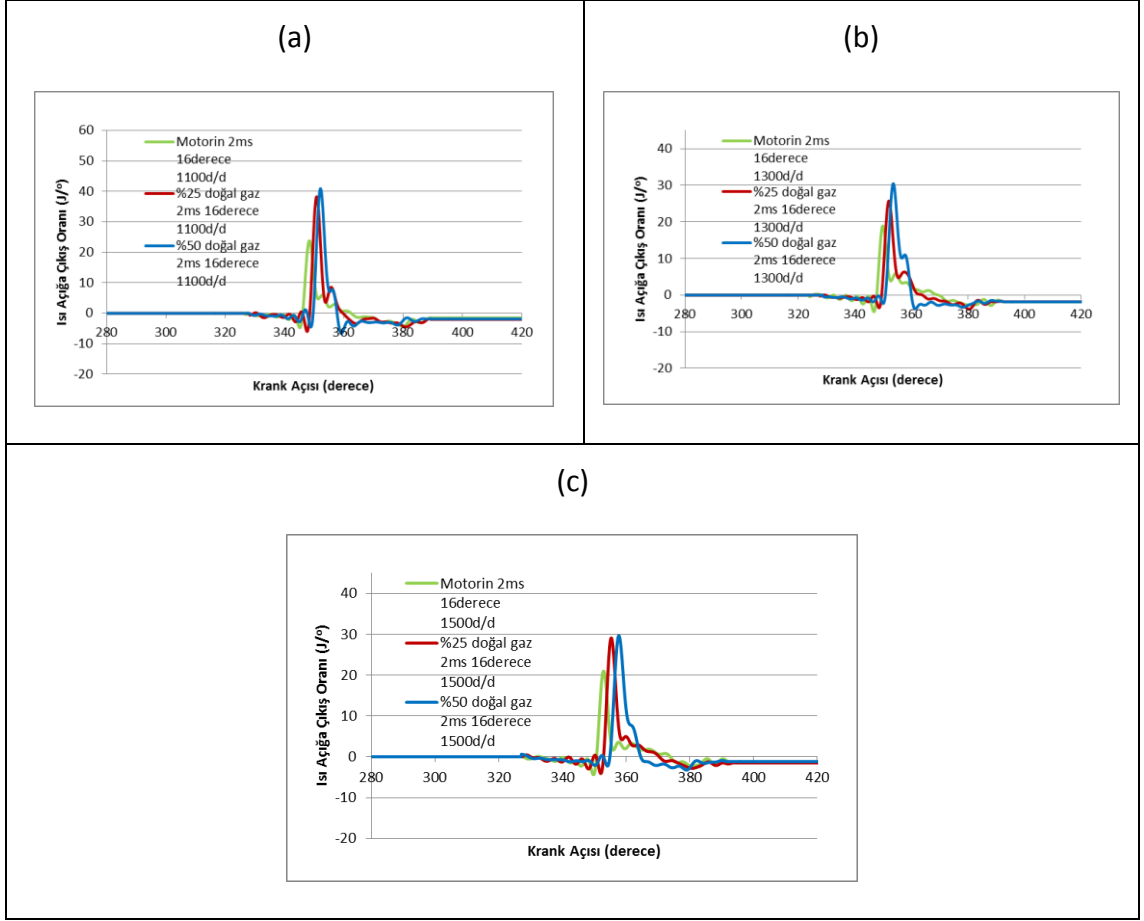
- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi, (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

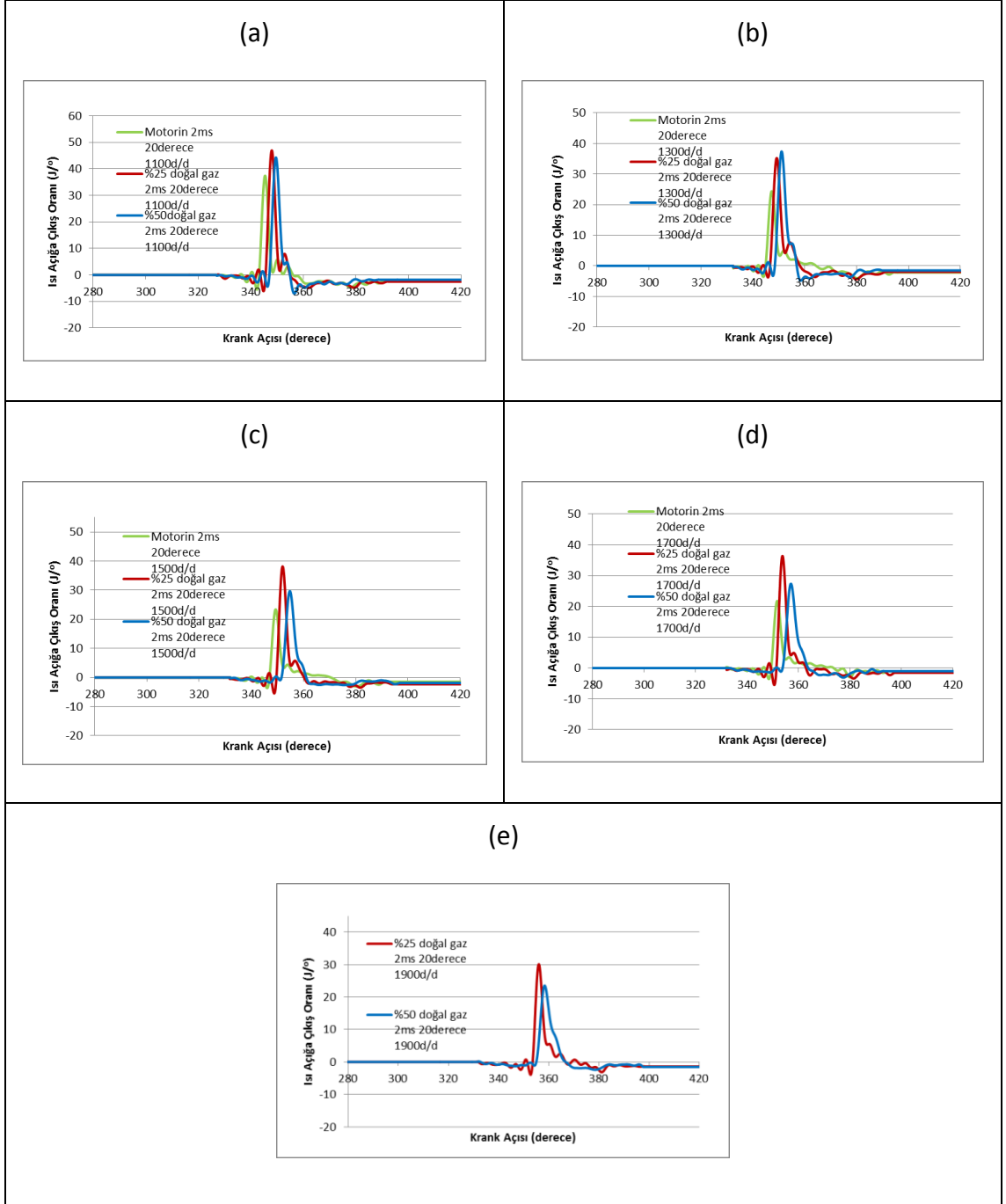
Şekil 4.56-59 arasında görüleceği üzere, düşük püskürtme avanslarında, doğalgaz ilaveli çift yakıtların ısı açığa çıkış oranının, yalnız motorin yakıtının ısı açığa çıkış oranına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek püskürtme avansı ve düşük devirlerde ise yalnız motorin yakıtının ısı açığa çıkış oranı daha yüksektir.

Gaz yakıt ilavesi ile, kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69]. Diğer taraftan, yakıtı karıştırılan gazın oranı arttıkça, yakıtın ısı kapasitesi arttığı için tutuşma gecikmesi süresi uzamaktadır. Gönderilen gaz yakıt miktarı arttıkça, dizel yakıt miktarı azaldığı için, açığa çıkan ısı açığa çıkış oranı miktarı azalmaktadır. Yanma fazında, daha düşük miktarda dizel gönderildiği zaman, yeterince alev cephesi bölgesine gaz yakıt katılamamakta, alev cephesinin ilerlemesi yeterince verimli gerçekleşmemektedir [62].



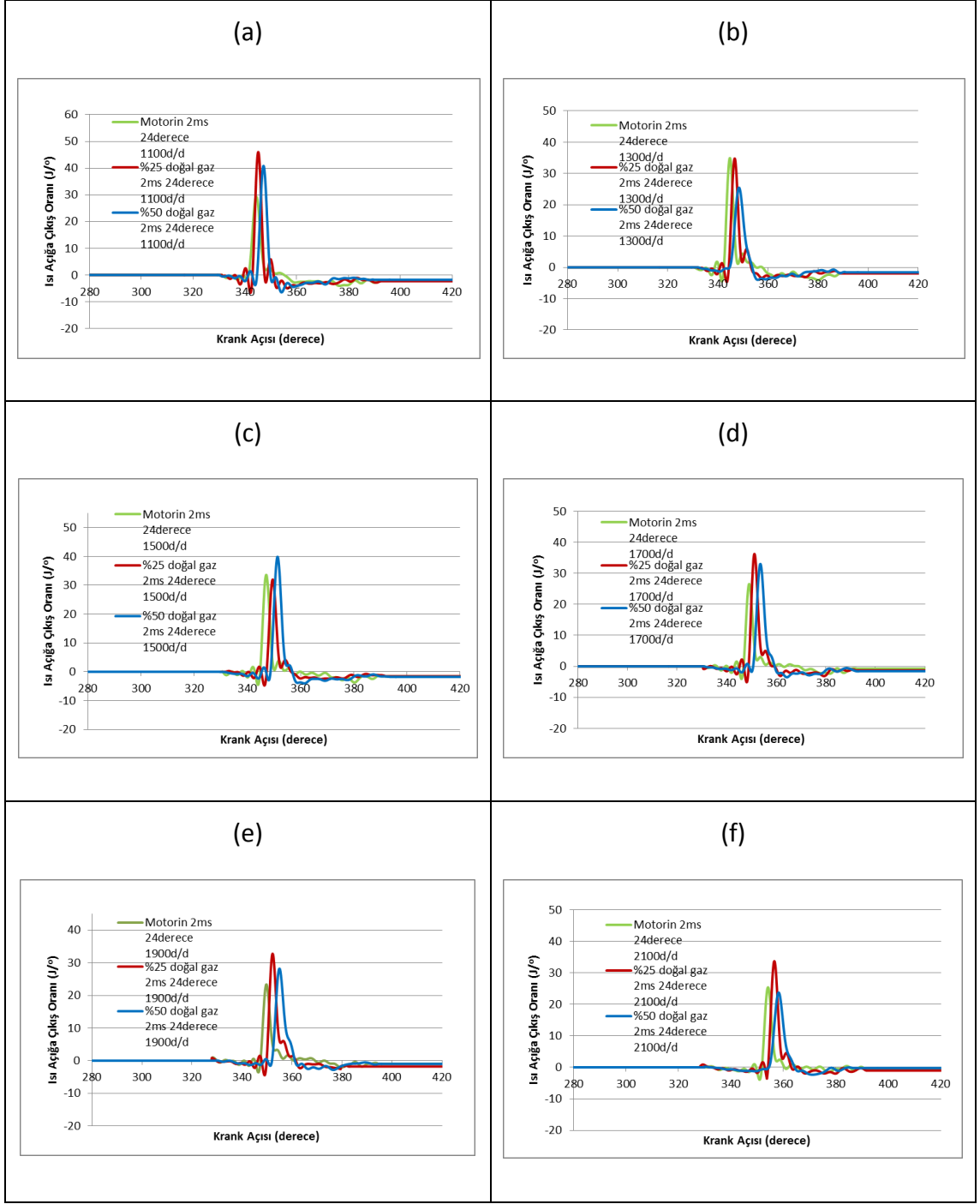
Şekil 4. 56 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



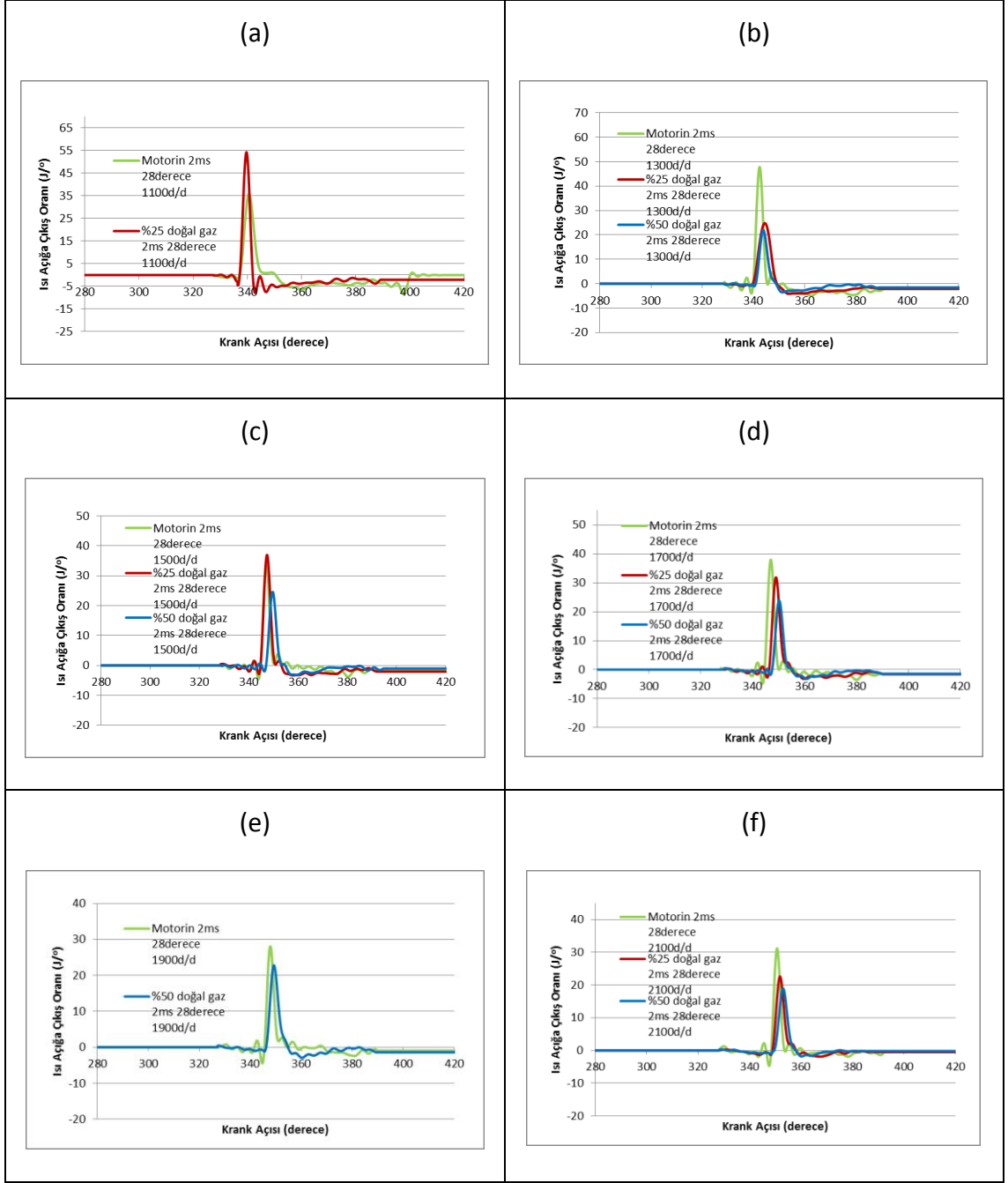
Şekil 4. 57 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



Şekil 4. 58 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



Sekil 4. 59 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, doğalgaz-motorin çift yakıtlı çalışma şartında, yalnız motorin yakıtına göre motor gücünde artış meydana geldiği, termik verimde genel olarak bir miktar düşüş meydana geldiği; ancak doğalgazın daha ekonomik bir yakıt olmasından dolayı, termik verimdeki bu ufak düşüşün önemsiz olduğu sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, is emisyonlarında artan doğalgaz miktarı ile ciddi miktarda iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. NO_x emisyonları ise, doğalgaz ilavesi ile genel olarak tüm çalışma şartlarında artmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Motor gücü değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9.14 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 10.66 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 11.28 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,15 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 14,22 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 14,98 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 11,2 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 12,52 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 12,3 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 7,39 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 8,19 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,94 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 14,58 kW değerine ulaştığı görülmüştür.
- Motor gücü değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 13,1 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 14,74 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 15,04 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 8,16 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,88 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 9,87 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 13,6 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 14,52 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 14,56 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 17,5 kW değerinde iken, %25

doğalgaz ilaveli durumda 18,3 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 18,7 kW değerine ulaştığı görülmüştür.

- Motor gücü değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,7 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 10,33 kW değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,82 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 13,72 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 14,1 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 15,39 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 16,12 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,71 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 11,45 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,71 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 8,81 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,66 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 7,61 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,36 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 10,99 kW değerine ulaştığı görülmüştür.
- Termik verim değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %25,16 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %19,13, %50 doğalgaz ilaveli durumda %17,93 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %24,59 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %19,4, %50 doğalgaz ilaveli durumda %19,14 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %24,35 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %17,52 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %21,35 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %15,59 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında

%22,4 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %15,08 , %50 doğalgaz ilaveli durumda %13,87 değerine ulaştığı görülmüştür.

- Termik verim değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %37,02 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %20,64, %50 doğalgaz ilaveli durumda %29,03 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %21,77 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %15,62 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %14,93 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %18,33 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %23,13 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %16,55, %50 doğalgaz ilaveli durumda %15,14 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %18,88 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %8,92 , %50 doğalgaz ilaveli durumda %12,63 değerine ulaştığı görülmüştür.
- Termik verim değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %21,34 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %15,63, %50 doğalgaz ilaveli durumda %12,53 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %17,61 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %13,15, %50 doğalgaz ilaveli durumda %12,44 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %22,3 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %12,6, %50 doğalgaz ilaveli durumda %10,31 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %13,43 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %8,97 değerine ulaştığı , %28° püskürtme avansında, 2300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %14,35 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %12,63 değerine ulaştığı görülmüştür.

- NO_x değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1624 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1309 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 697 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1024 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1866 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1298 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 623 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1018 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2133 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1120 ppm değerine ulaştığı; ; 24° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1036 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1539 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 3651 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 2181 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 753 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1205 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.
- NO_x değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1032 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 421 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 936 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 542 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1119 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 567 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 810 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1237 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 554 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 876 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1395 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda

260 ppm , %50 doğalgaz ilaveli durumda 684 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.

- NO_x değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 626 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 334 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 473 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 810 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 508 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 301 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 385 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 779 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 958 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 295 ppm değerine ulaştığı; ; 24° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 297 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 716 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 454 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 290 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 428 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 848 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.
- İS değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1,069 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,329 FSN değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 0,434 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,074 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,264 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,729 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,814 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 0,246 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,541 FSN değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1,222 FSN değerinde iken,

%50 doğalgaz ilaveli durumda 0,182 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1,08 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,154 FSN , 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1,523 FSN değerinde iken,%50 doğalgaz ilaveli durumda 0,114 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.

- İş değerı, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,039 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 5,914 FSN , %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,387 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,36 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,27 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 5,301 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 4,488 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 4,255 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 3,058 FSN değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,86 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,885 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,259 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 7,248 FSN , %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,356 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.
- İş değerı, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 7,793 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,313 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 6,529 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 8,357 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,621 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 7,042 FSN değerinde iken,%50 doğalgaz ilaveli durumda 3,578 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 3,307 FSN değerinde iken, %25

doğalgaz ilaveli durumda 5,979 FSN değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,579 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 4,368 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 8,132 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,616 FSN , 28° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,602 FSN değerinde iken,%50 doğalgaz ilaveli durumda 3,12 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.

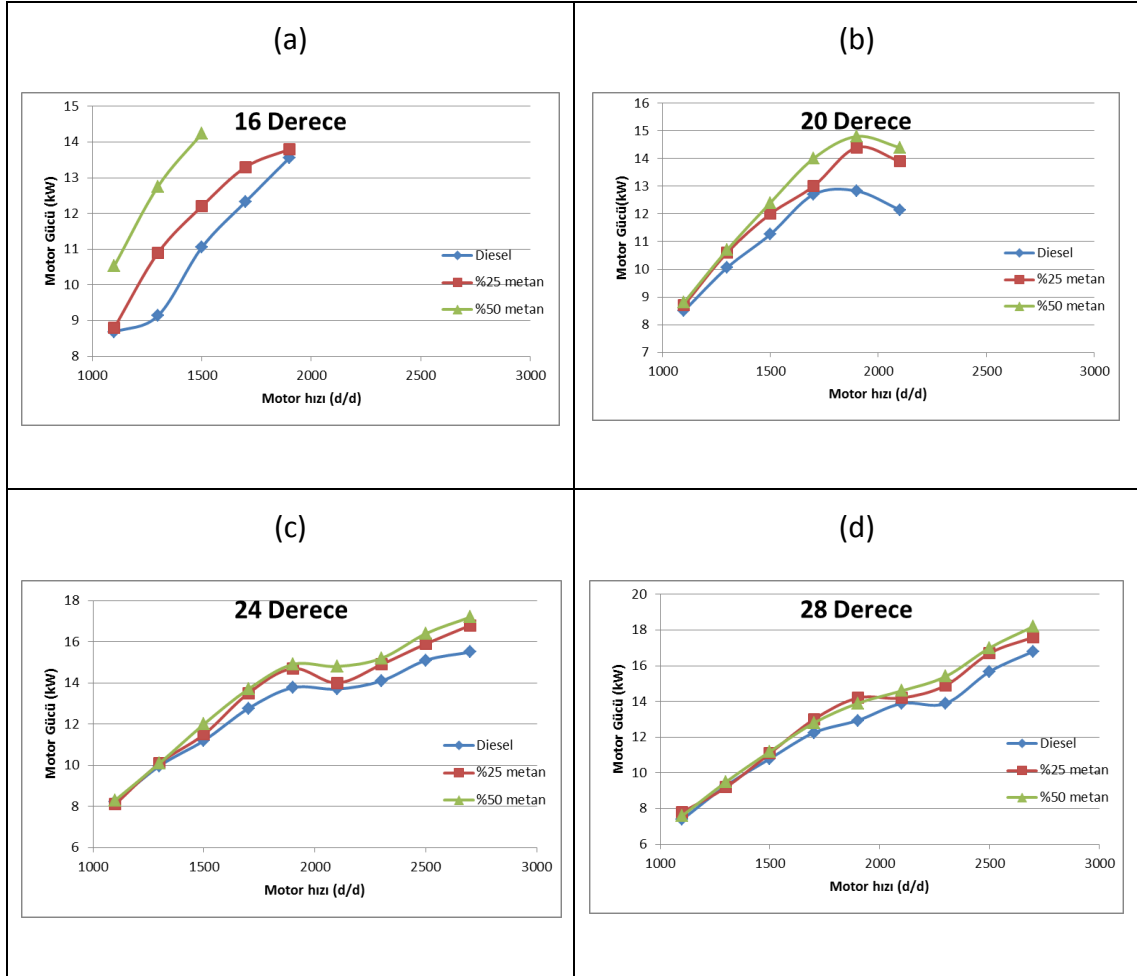
4.1.6 Common-rail Yakıt Sistemine Çevrilmiş Motorun Metan-Motorin Çift Yakıtlı Performans Deney Sonuçları

Motor common-rail test düzeneğine çevrildikten sonra, yalnız motorin (%0 metan), %25 metan ve %50 metan olmak üzere 3 ayrı koşulda ve 16°, 20°, 24° ve 28° olmak üzere 4 farklı püskürtme avansında ve 1100 d/d, 1300 d/d, 1500 d/d, 1700 d/d, 1900 d/d, 2100 d/d, 2300 d/d, 2500 d/d ve 2700 d/d motor hızı olmak üzere, 9 farklı motor hızında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, motor gücü, motor torku, termik verim, özgül yakıt tüketimi, emisyonlar ve yanma karakteristiği açısından karşılaştırılmıştır. Şekil 4.58’te görüldüğü gibi, metan ilavesi ile motor gücünde tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde yükselme gözlemlenmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,3 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %39,6 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,5 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %11 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,9 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.61’da ise motor torku verilmiştir. Yine elde edilen

sonuçlardan, motor torkunda benzer karakteristik eğriler olduğu gibi, metan ilavesi ile bir yükseliş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum tork artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %37,6 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,1 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,4 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,6 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.62’de ise termik verim değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, metan ilavesinde termik verimde bir miktar artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum verim artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %11 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8,4 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,3 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %29,6 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,8 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %40,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %51,7 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.63’te ise özgül yakıt tüketimi grafiği görülmekle beraber, özgül yakıt tüketiminin termik verime zıt karakteristik gösterdiği görülmektedir. Maksimum özgül yakıt tüketimi düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız

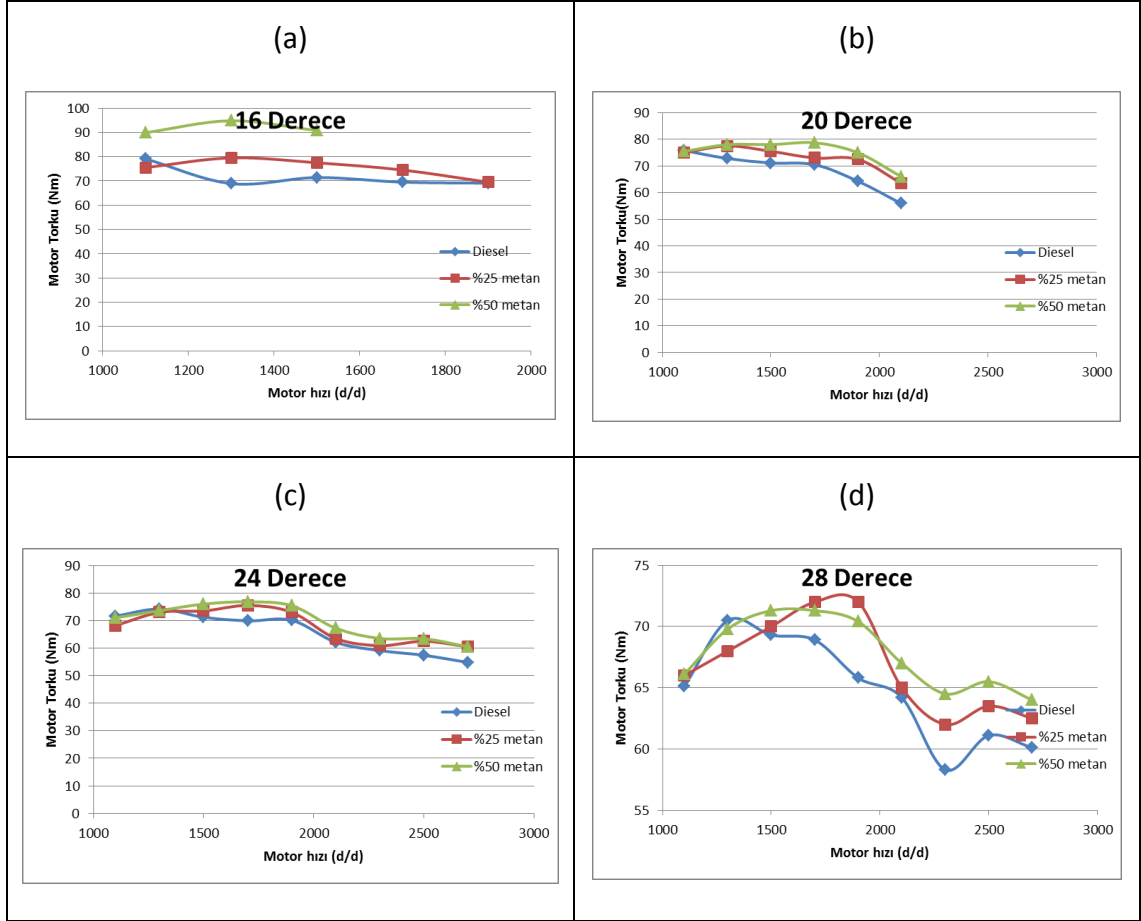
motorin yakıtına göre %9,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %18,11 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,4 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %22,8 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,8 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,8 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,4 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %34,1 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır [63]. Gaz yakıt miktarının artması ile daha verimli bir kontrolsüz yanma fazı gerçekleşir ve termik verim artar, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi düşmektedir [74].

4.1.6.1 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları



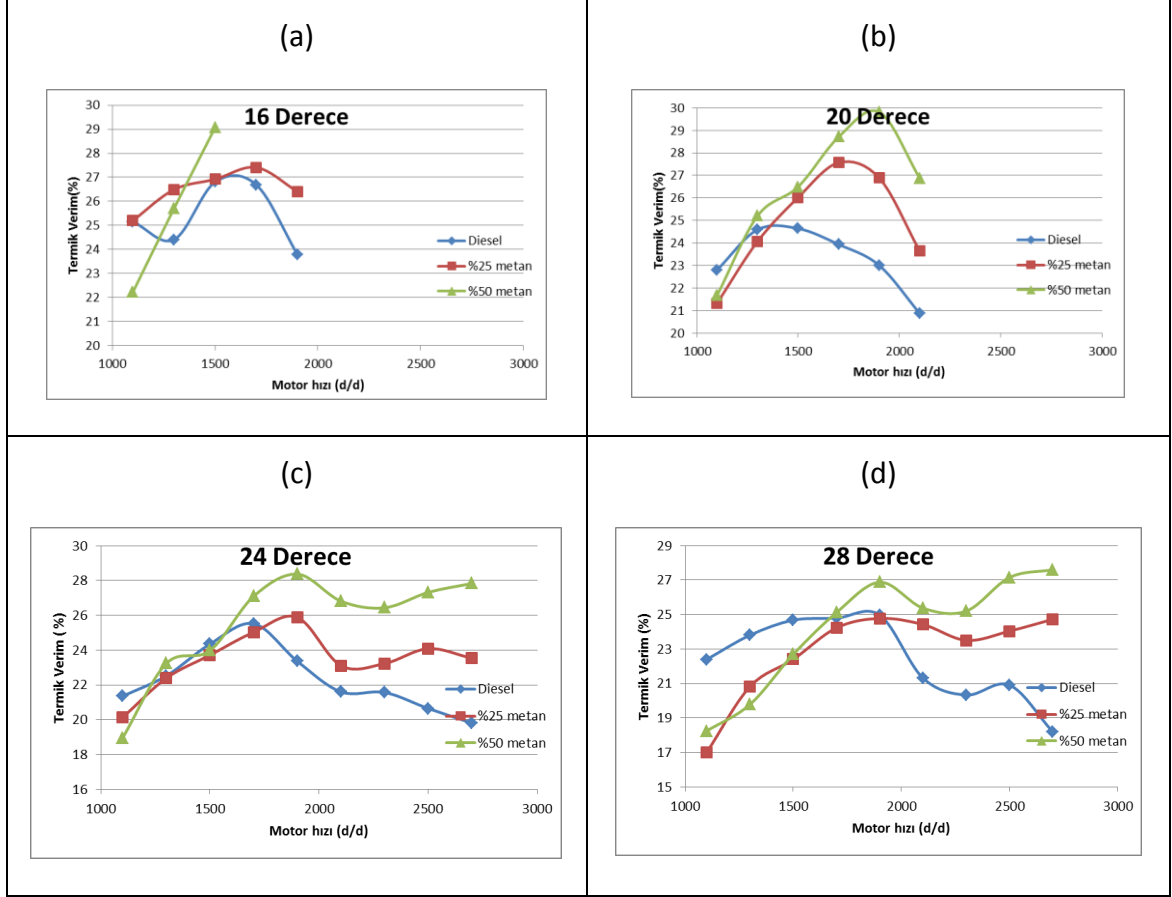
Şekil 4. 60 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



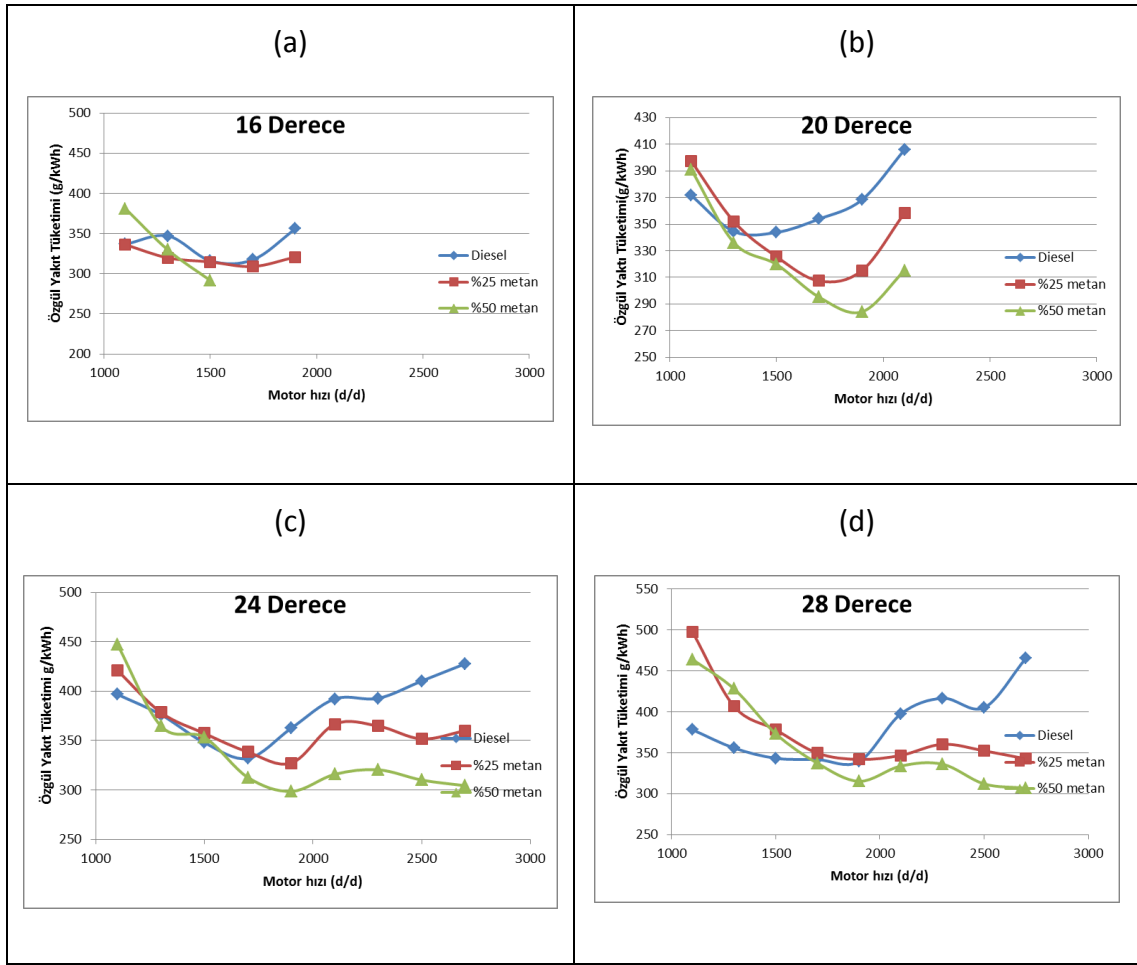
Şekil 4. 61 Farklı püskürtme avanslarında motor tork karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 62 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Şekil 4. 63 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.64'te görüldüğü gibi, metan ilavesi ile karbon monoksit miktarlarında tüm püskürme avansı ve çalışma devirlerinde artış gösterdiği görülmüştür. Maksimum CO emisyonu artış, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %766,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10800 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %280,9 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %423,8 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %291,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %242,4 artış meydana geldiği;

28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %214,3 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %416,7 artış meydana geldiği bulunmuştur. Gaz yakıt oranı arttıkça düşen silindir içi sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu, CO emisyonunda ciddi artışa sebebiyet vermektedir. Yüksek motor hızlarında yanma süresinin kısılması, oksijen erişebilirliğini azaltarak CO miktarını daha da artırmaktadır [62]. Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, katalitik susturucu kullanıldığında dizel-gaz yakıt çiftinin CO emisyonu tüm yüklerde motorinin altına düşürülmektedir. Oksidasyon katalistinin kullanımında, özellikle orta ve yüksek yüklerde CO emisyonlarını sifıra yakın olacak kadar azalttığı görülmektedir [70].

Şekil 4.65'te ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karbondioksit miktarında benzer karakteristik eğriler olduğu görülmekle beraber, bazı çalışma noktalarında ufak bir artış, bazı çalışma noktalarında ise ufak bir düşüş meydana gelmiştir.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70]. Ancak, diğer taraftan, gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

Şekil 4.66'da ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve düşük motor devirlerinde, metan ilavesi ile hidrokarbon oranında yükseliş görülürken; 2700 d/d motor hızında ise metan ilaveli yakıtlarda, hidrokarbon miktarında kayda değer bir değişiklik görülmemiştir.

İlave yakıt olarak kullanılan CH₄ oranı arttıkça, HC emisyonu artmaktadır. Bu durum, gaz yakıtı oluşturan bileşiklerin yanmamış HC'leri oluşturma eğiliminin yüksek olmasından kaynaklıdır [63]. Crevis hacimleri, dizel motorda piston ve silindir cidarları arasındaki boşluklar ve üst segmandaki boşluklar daha fazla olduğu için artmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar bu ölü hacimde dizelden çift yakıtlıya dönüştürülen motorlarda daha fazla birikmekte dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır [70].

Şekil 4.67'de ise NO_x emisyonları verilmiştir. Maksimum NO_x emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız

motorin yakıtına göre %25,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,6 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %32 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %93,3 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %91 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %50,3 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %94,8 artış meydana geldiği bulunmuştur. NO_x emisyonları genelde benzer karakteristik özellik gösterirken, yüksek püskürtme avansı koşullarında metan ilaveli çift yakıtın NO_x emisyon oranı, yalnız motorin yakıtına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

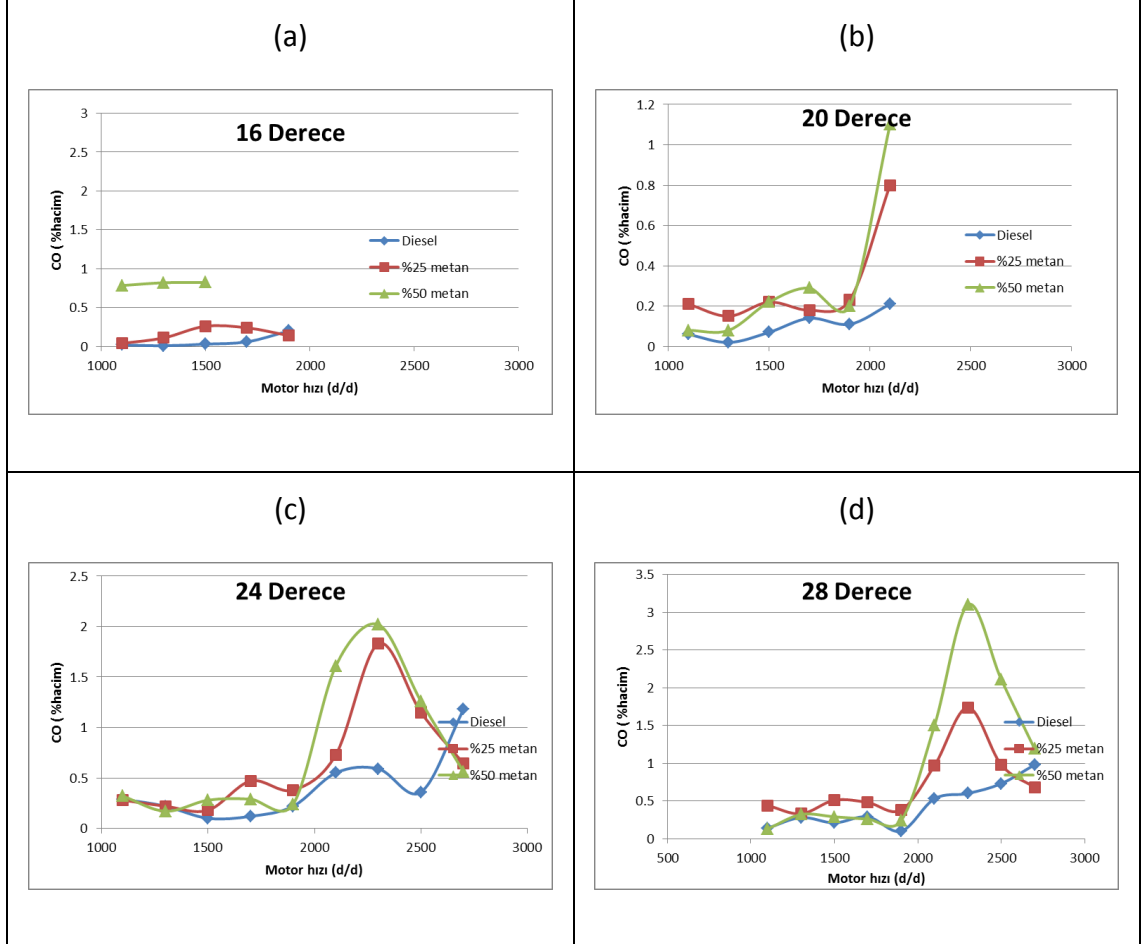
NO_x emisyonları oksijen konsantrasyonu ve adyabatik alev sıcaklığının yanı sıra yanma süresine de bağlıdır. Yanma süresi ve sıcaklığı değişmediği durumlarda, elde edilen test sonuçlarında ciddi bir değişim gözlemlenmemesi doğaldır [74]. Gaz yakıt ilavesiyle, artan alev sıcaklığından dolayı ise NO formasyonu yükselmektedir. Yalnızca metan karışimli gaz yakıt kullanımında motorine göre yüksek alev sıcaklığı nedeniyle daha fazla NO oluşmaktadır. NO formasyonu hava fazlalık katsayısına bağlı değişim göstermektedir. Özellikle stokiometrik şartlarda en yüksek NO değeri oluşmaktadır. Ancak, dizel motorlar fakir yakıtla çalıştığı için emisyon sonuçları yine hava fazlalık katsayısına bağlı değişmektedir [68].

Şekil 4.68’de ise is emisyon değerleri verilmiştir. Maksimum is emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %298,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %2989 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %63,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %76,5 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız

motorin yakıtına göre %46,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %83,3 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %69,2 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %92 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, 16 derece püskürtme avansı haricindeki tüm püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, metan ilavesi ile is miktarlarında düşüş gözlemlenmiştir.

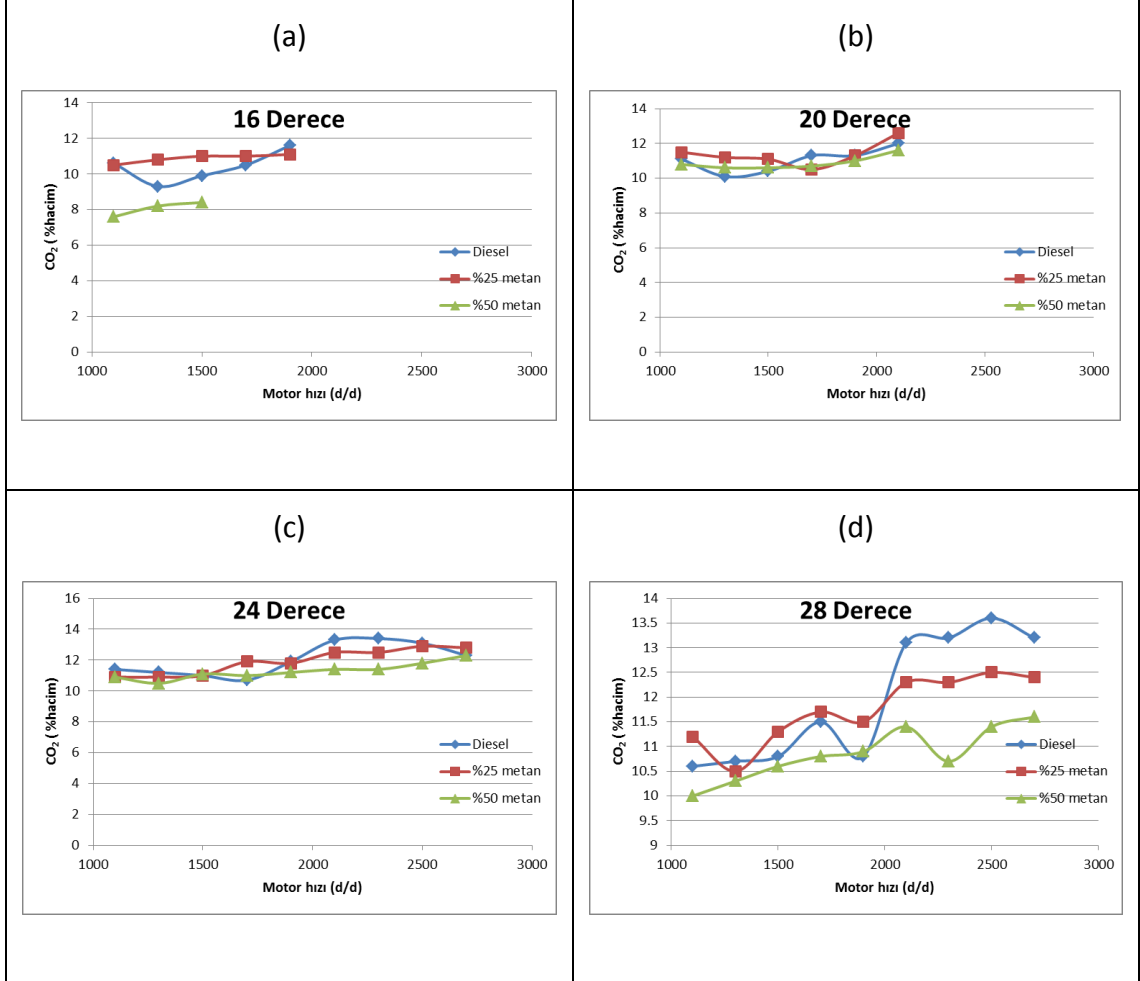
Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH₄'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH₄ miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].

Şekil 4.69'da ise, metan ilaveli ve yalnız metanlı çalışma şartlarındaki egzoz gaz sıcaklıkları verilmiştir. Düşük devirlerde gaz yakıt ilavesi ile egzoz sıcaklığı değerlerinin artarken, yüksek devirlerde ciddi bir değişiklik meydana gelmemiştir.



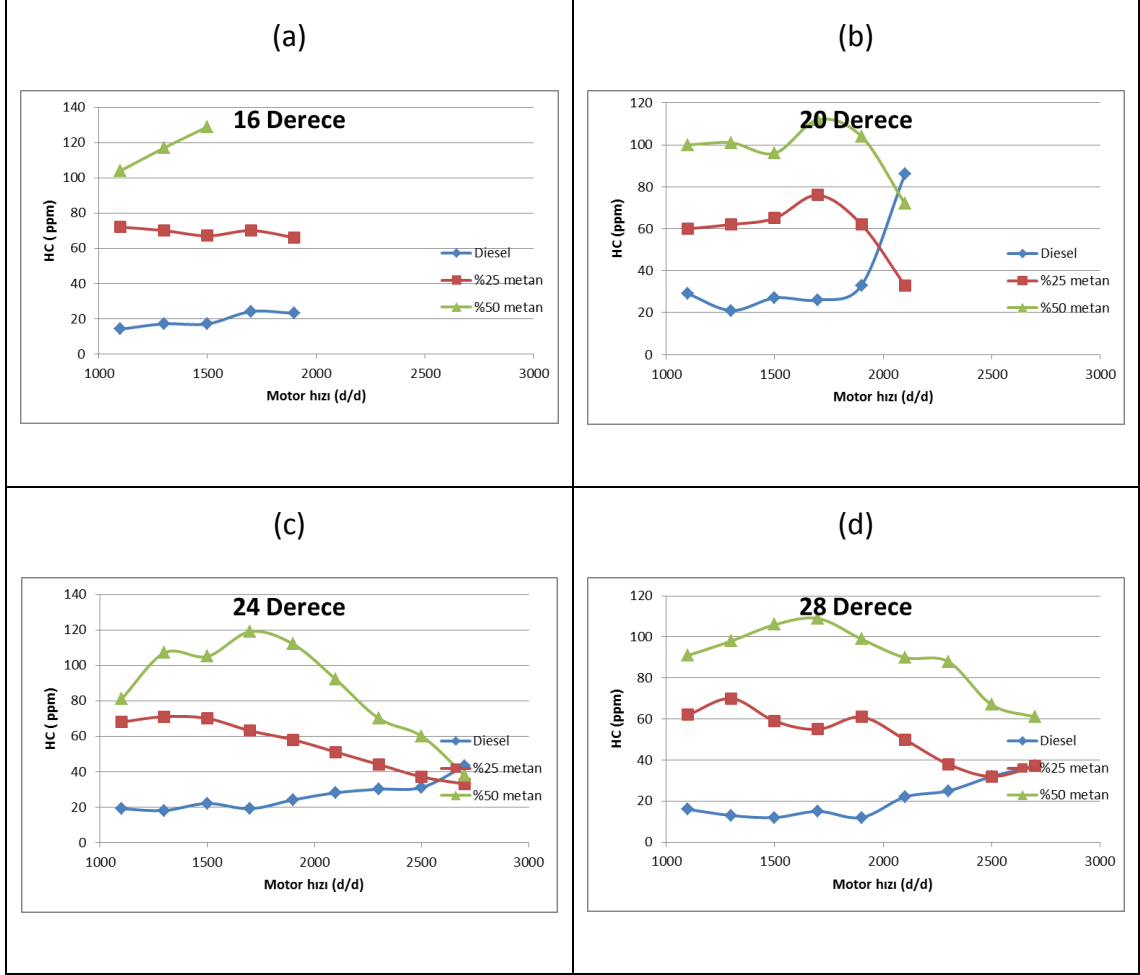
Şekil 4. 64 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



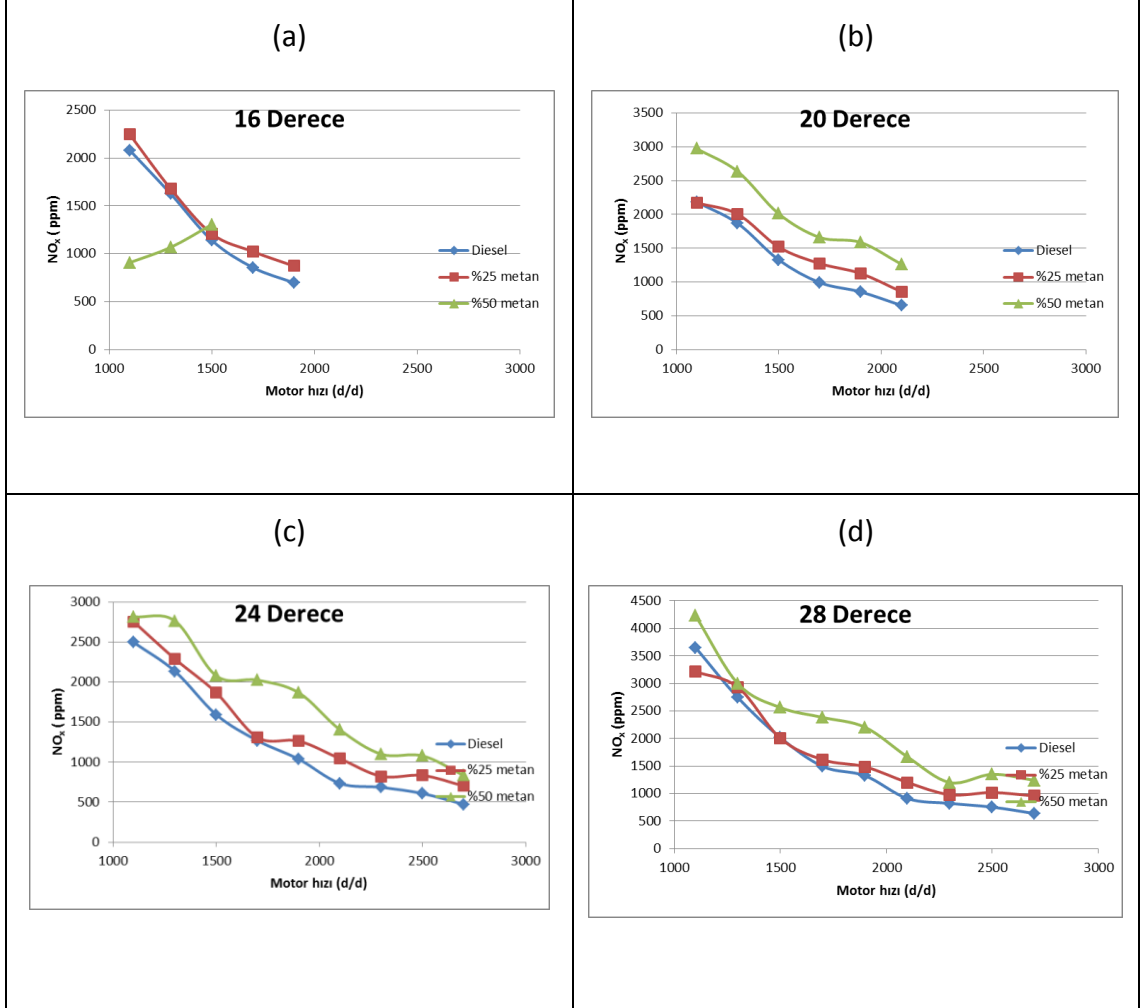
Şekil 4. 65 Farklı püskürtme avanslarında CO₂ emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO₂ emisyonu eğrisi



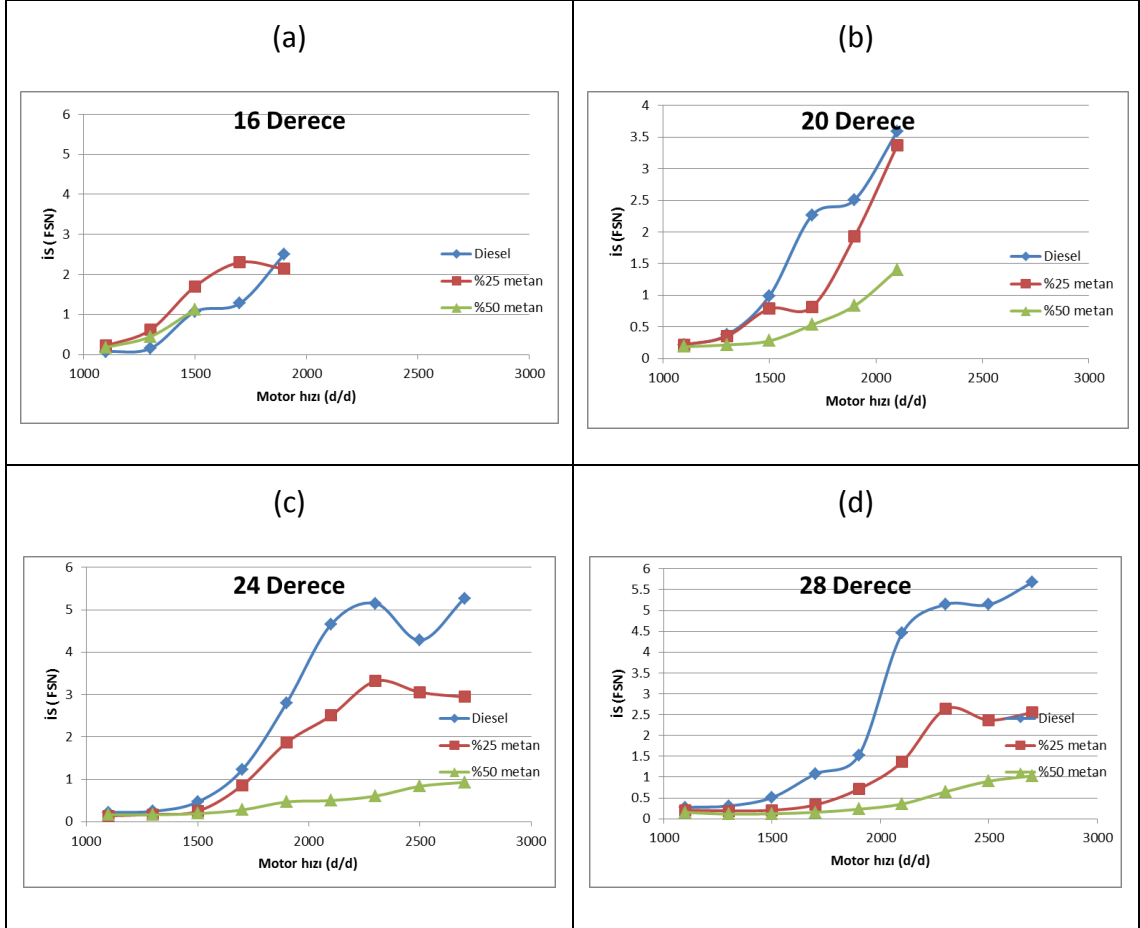
Şekil 4. 66 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
 (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi



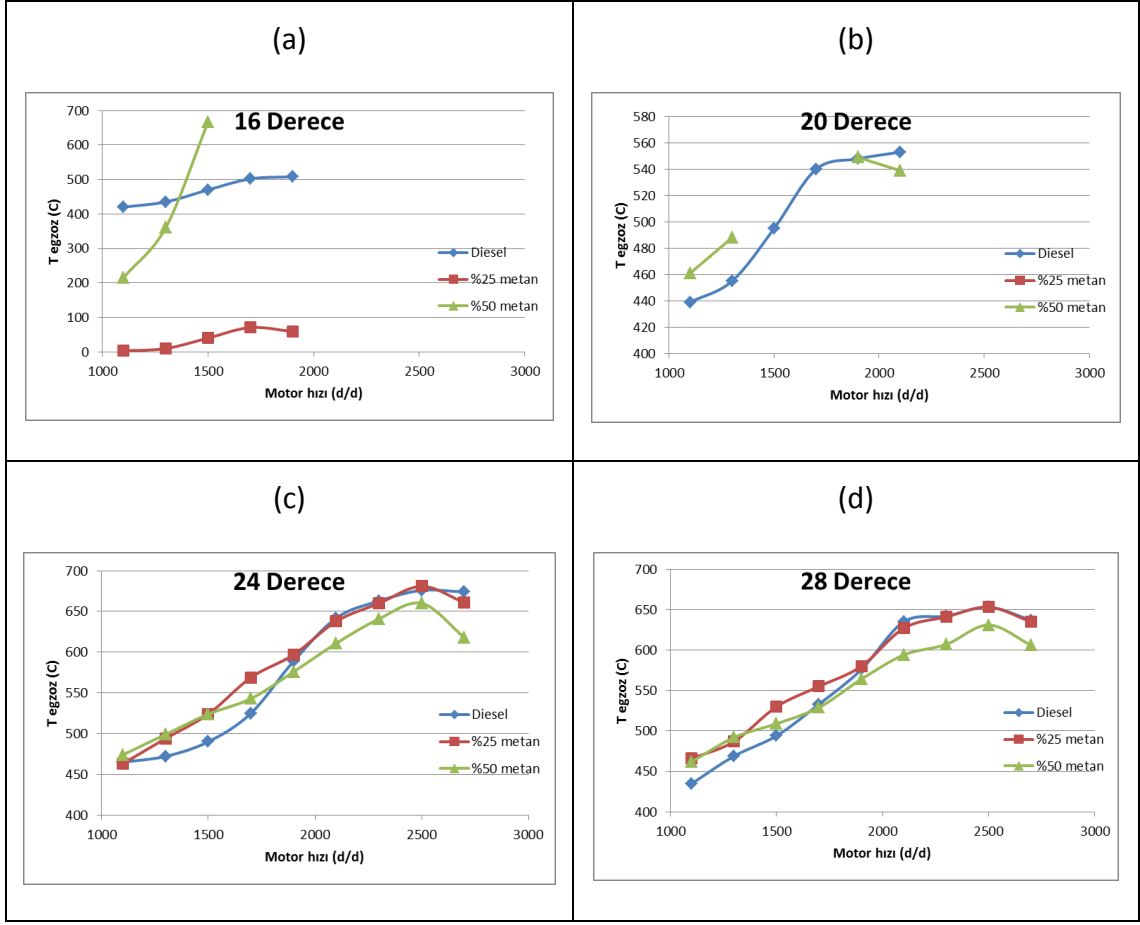
Şekil 4. 67 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi



Şekil 4. 68 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi

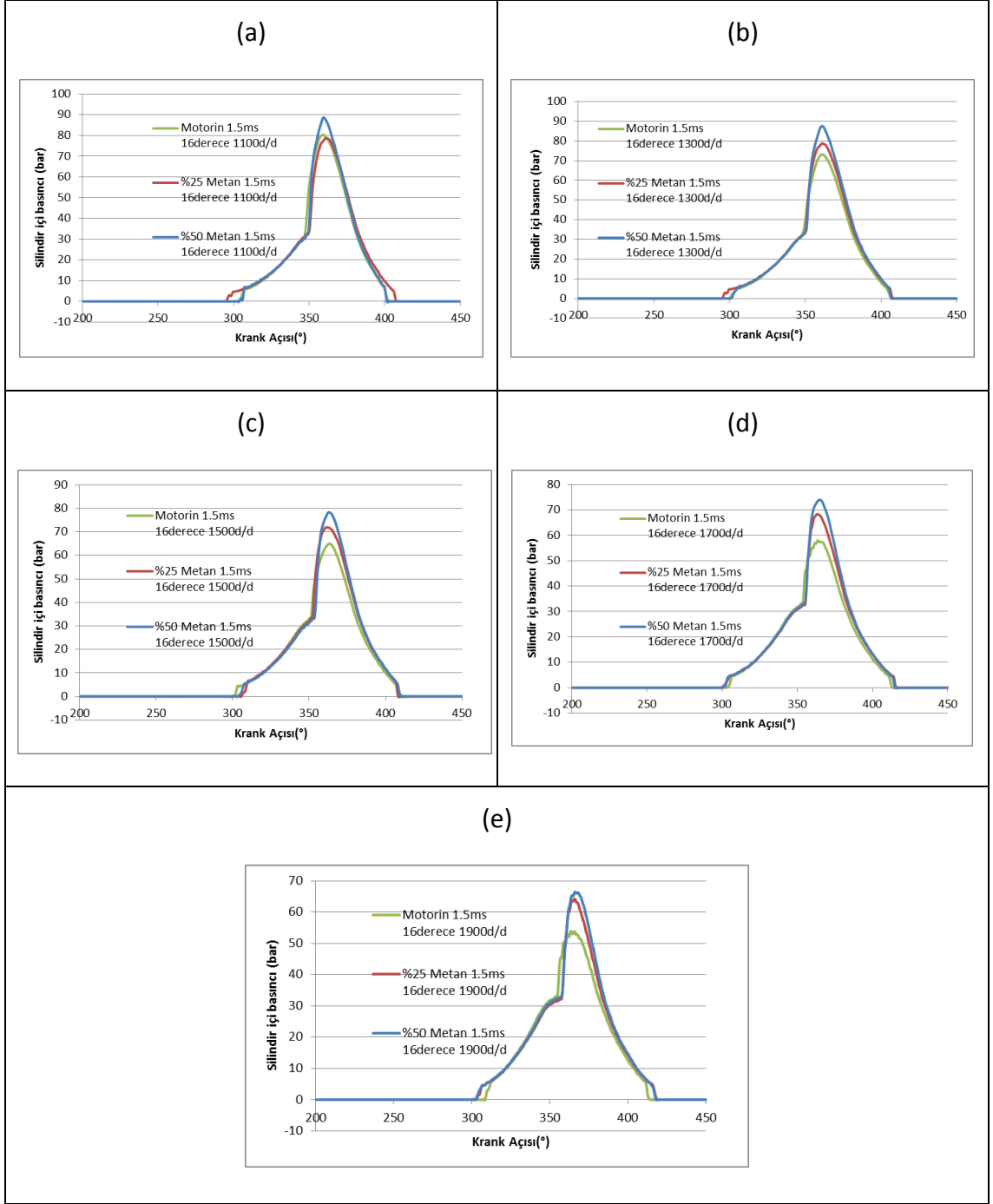


Şekil 4. 69 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi

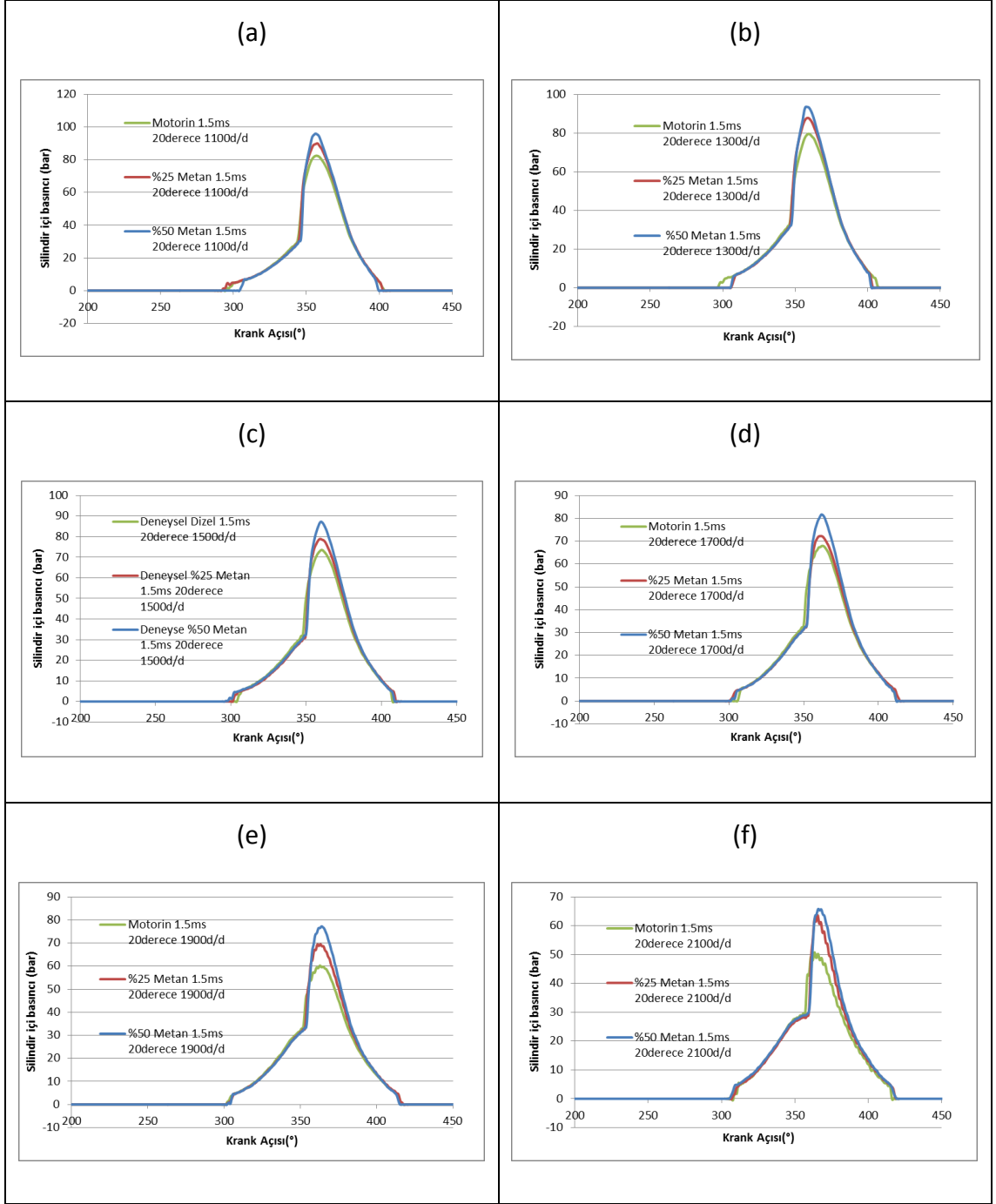
Şekil 4.70 ile 73 arasındaki grafiklerden görüleceği üzere tüm püskürtme avanslarında, metan ilaveli çift yakıtların silindir içi gaz basıncı, yalnız motorin yakıtının silindir içi gaz basıncına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Gaz yakıt kullanımında, motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha yüksek enerji açığa çıkmasını, gaz yakıtın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi gaz basıncı değerlerinin artmasını sağlamaktadır [69].



Şekil 4. 70 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

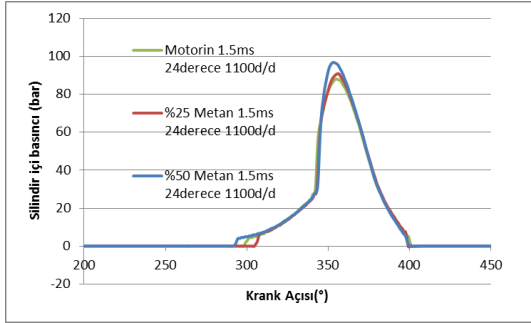
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



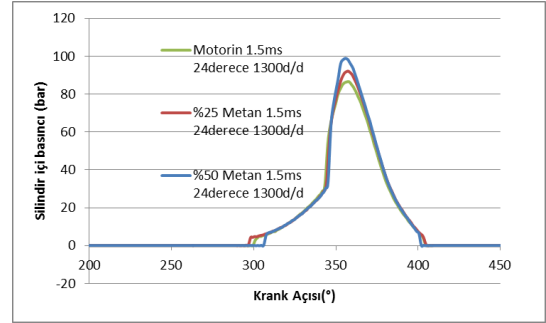
Sekil 4. 71 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

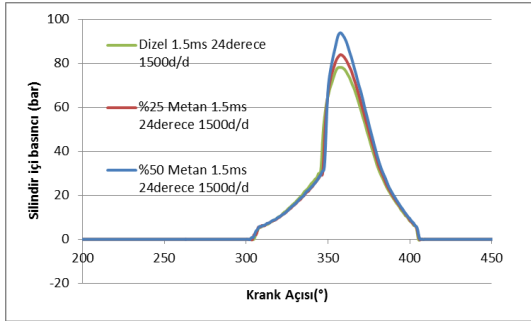
(a)



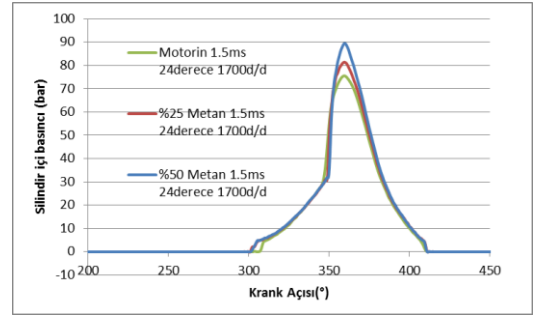
(b)



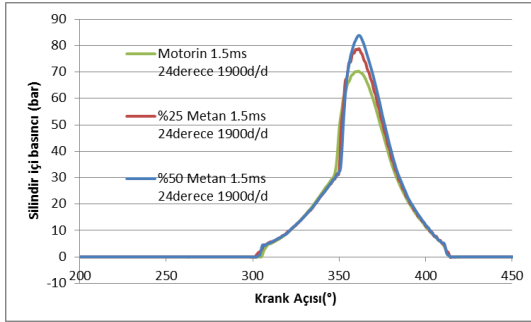
(c)



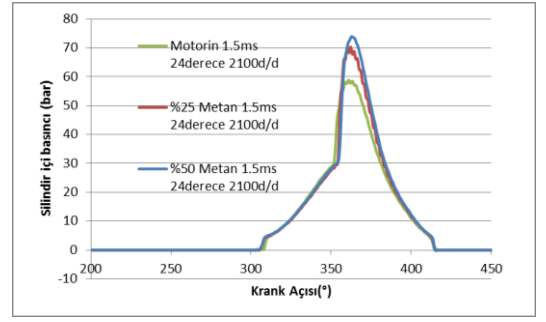
(d)

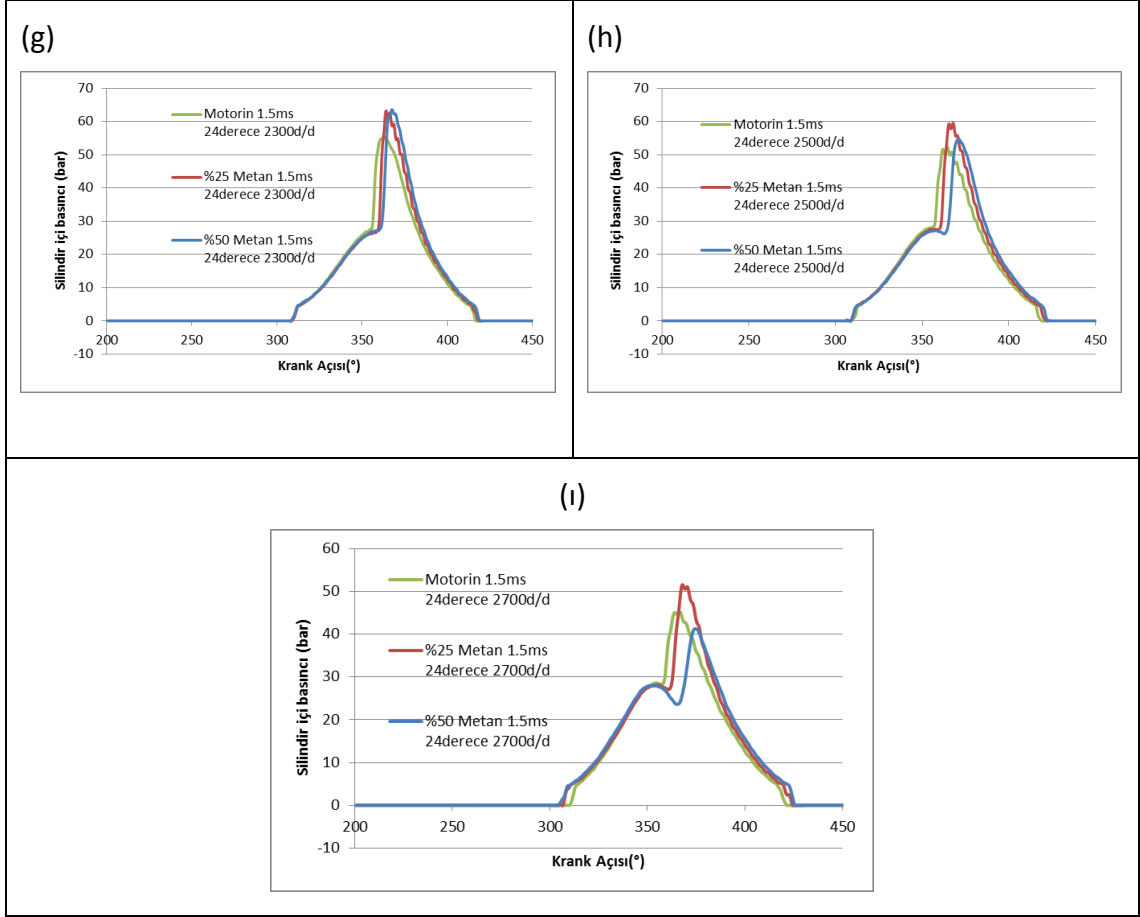


(e)



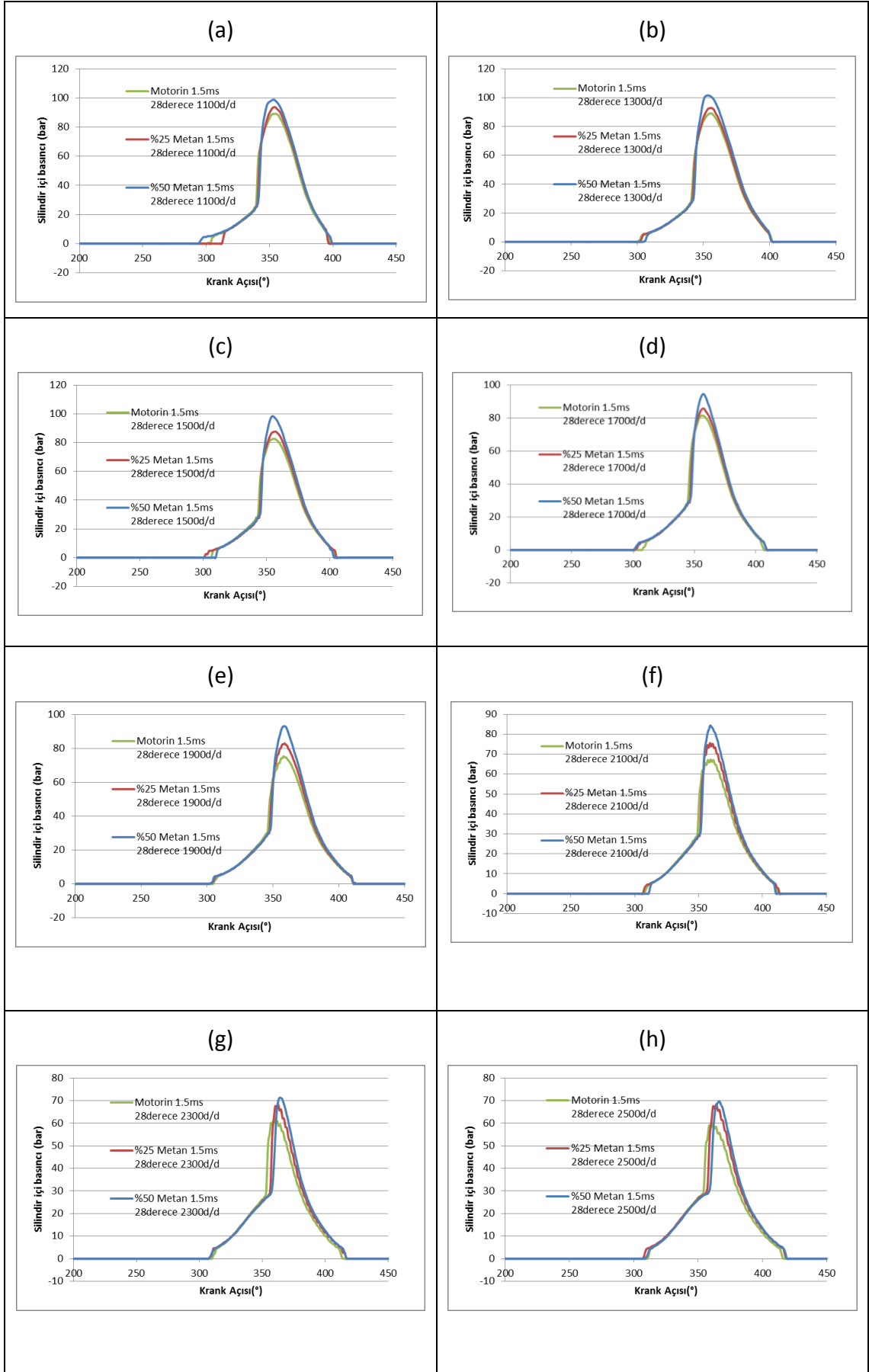
(f)

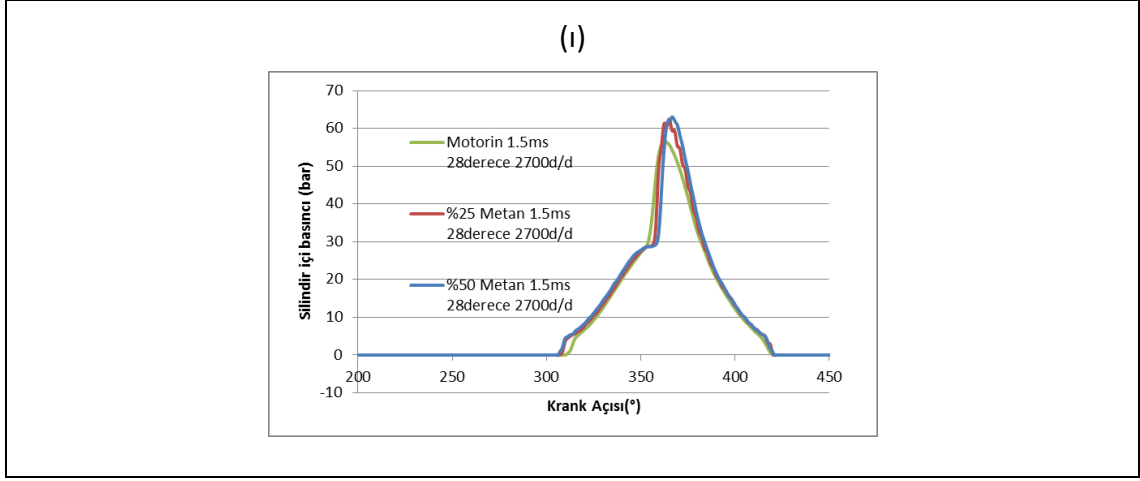




Şekil 4. 72 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (ı) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



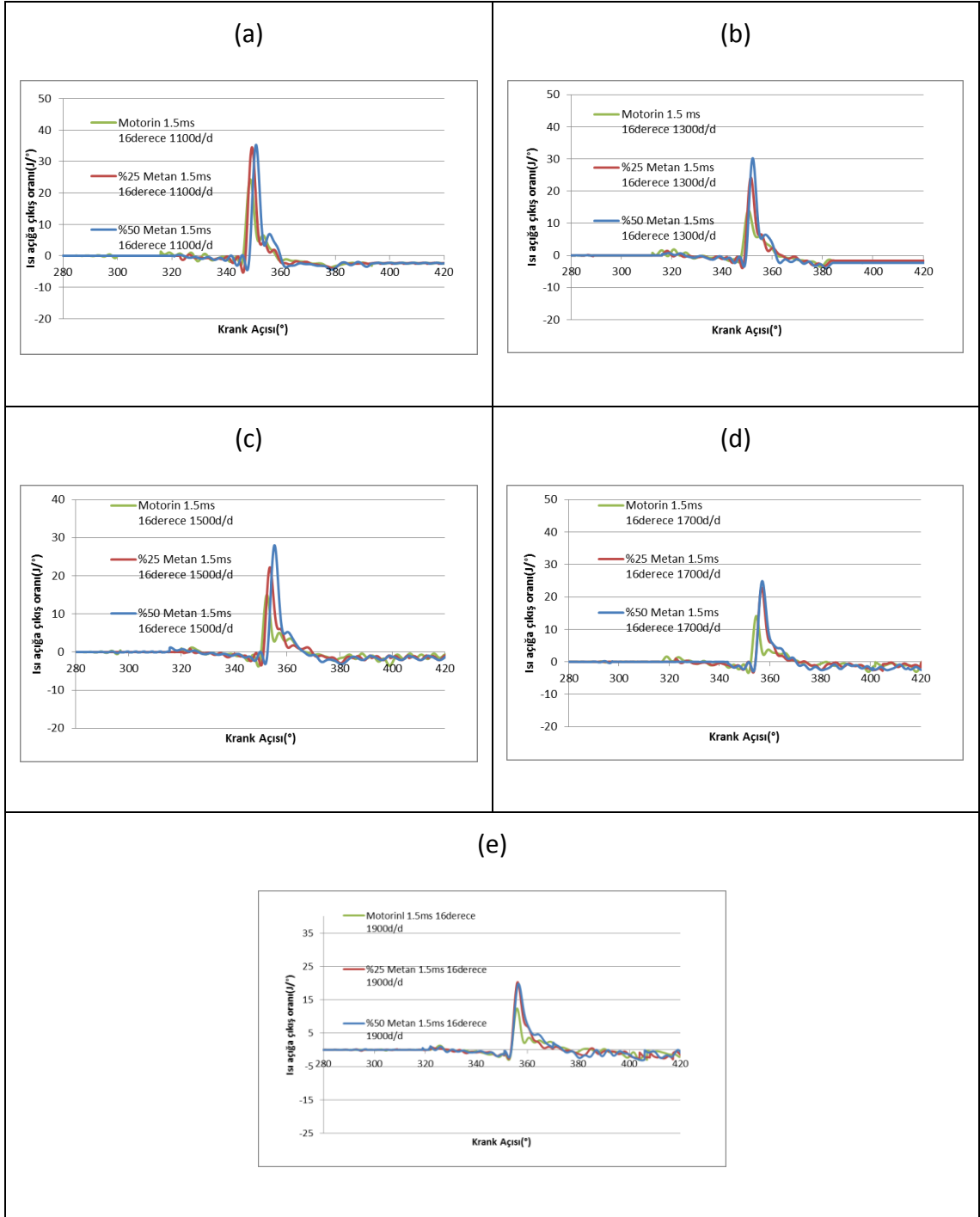


Sekil 4. 73 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (i) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

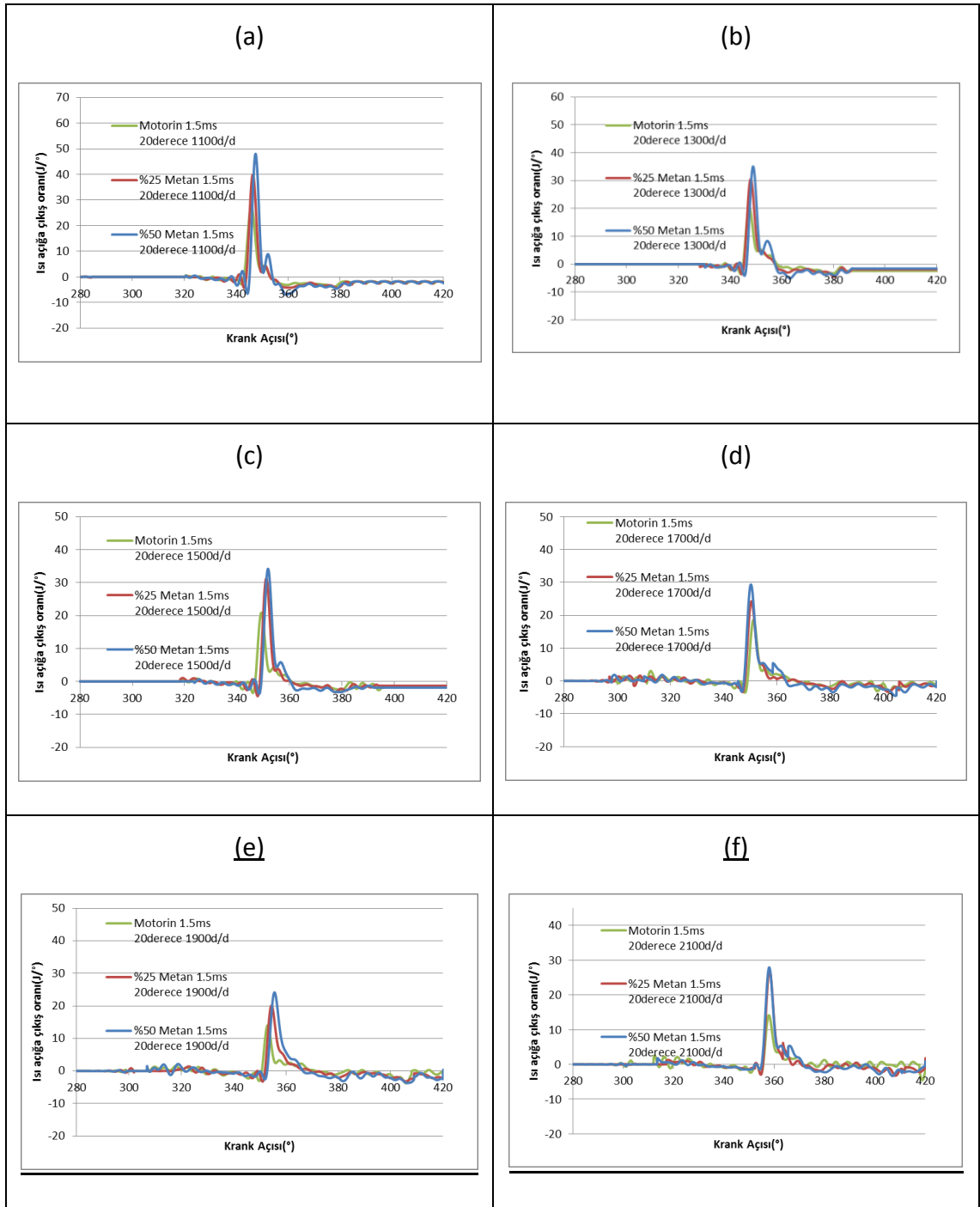
Şekil 4.74-77 arasında görüleceği üzere, düşük püskürtme avanslarında, metan ilaveli çift yakıtların ısı açığa çıkış oranının, yalnız motorin yakıtının ısı açığa çıkış oranına göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek püskürtme avansı ve düşük devirlerde ise yalnız motorin yakıtının ısı açığa çıkış oranı daha yüksektir.

Gaz yakıt/hava karışımı olan dolgunun dizel gönderilmesiyle yanma merkezinde tutuşarak alev cephesinin ilerlemesini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69].



Şekil 4. 74 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

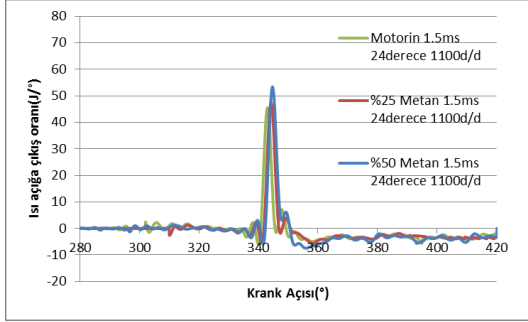
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



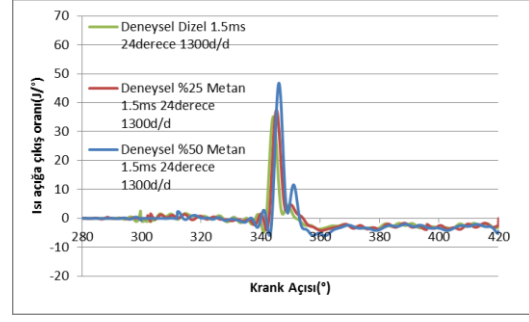
Şekil 4. 75 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

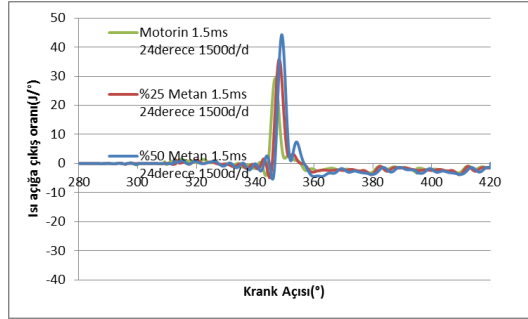
(a)



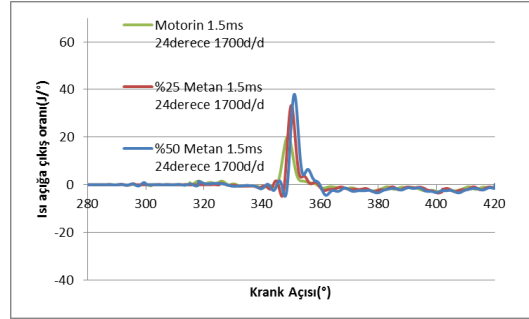
(b)



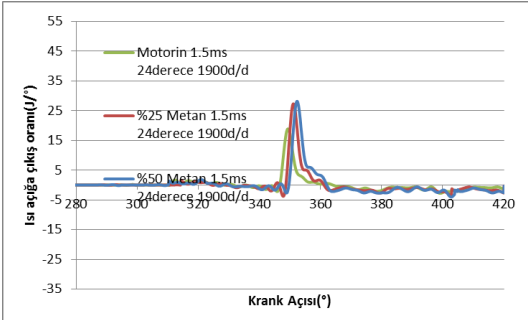
(c)



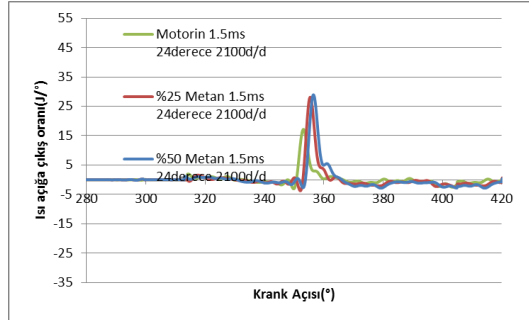
(d)

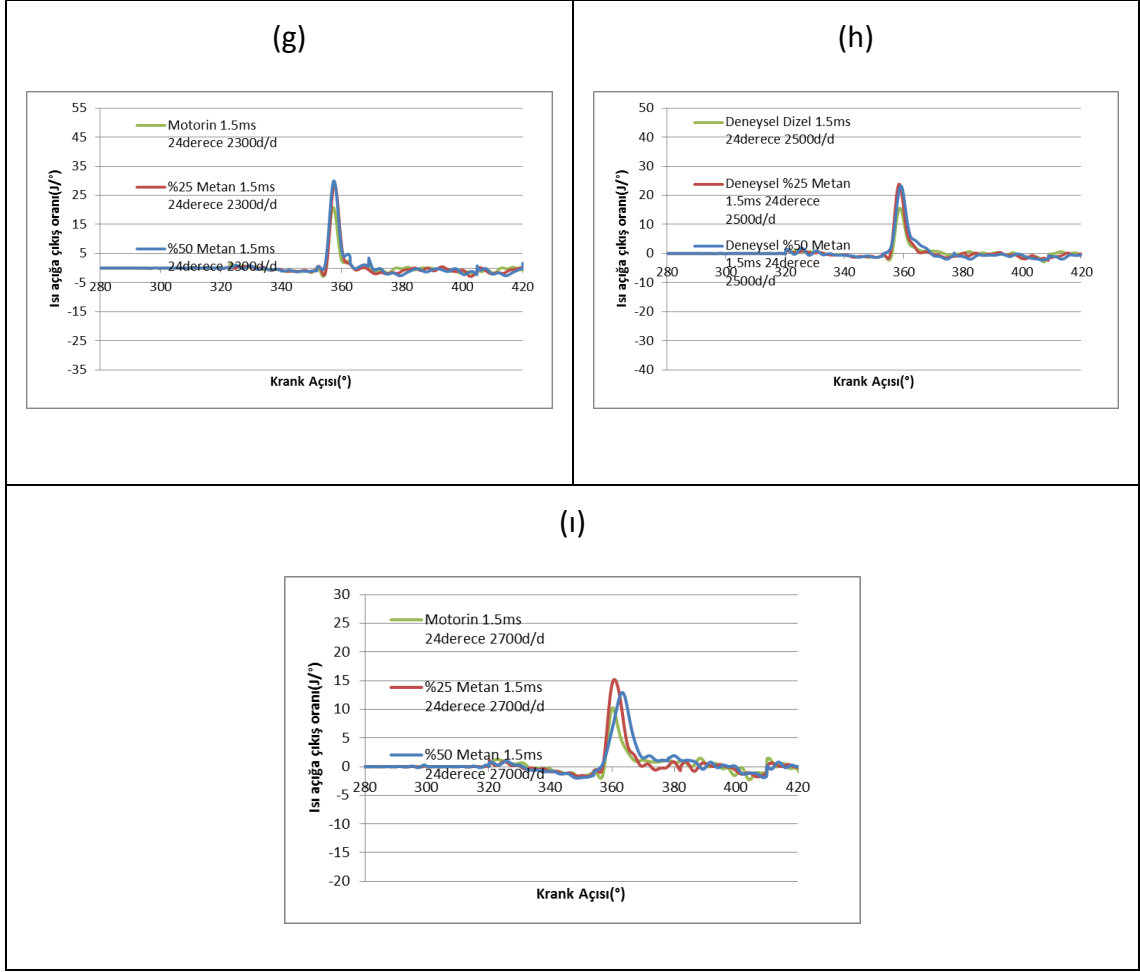


(e)



(f)

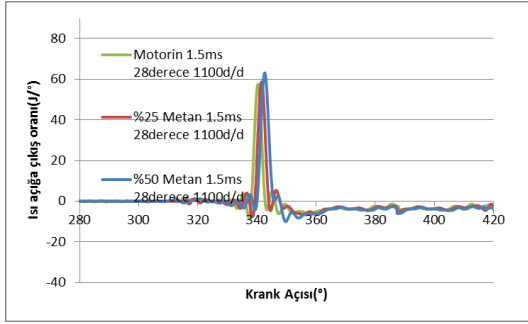




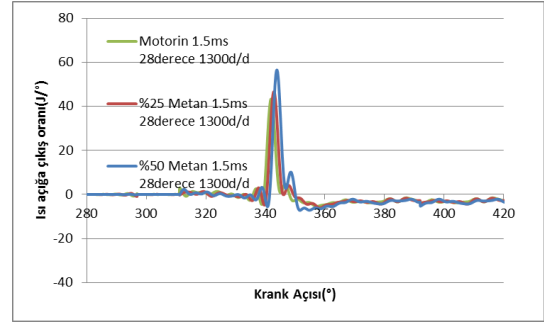
Şekil 4. 76 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

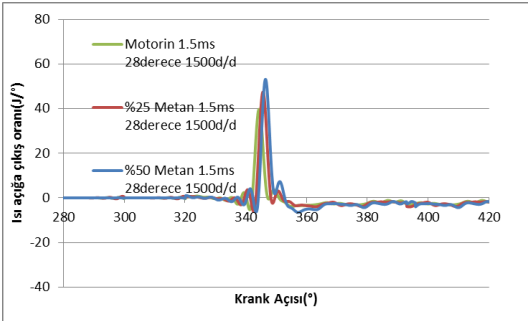
(a)



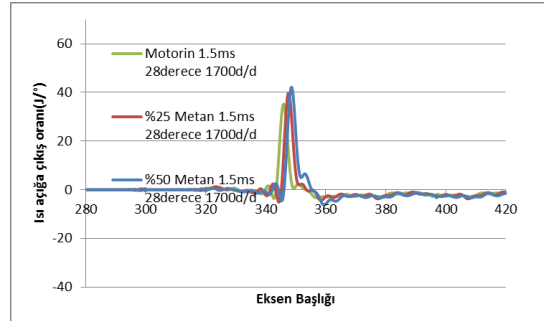
(b)



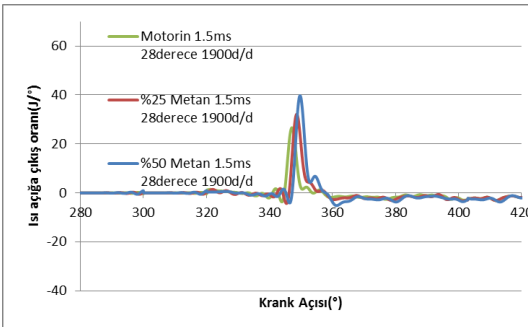
(c)



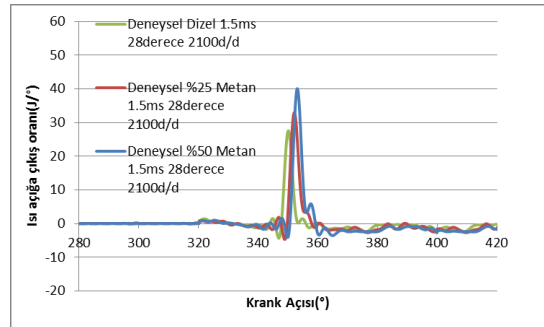
(d)

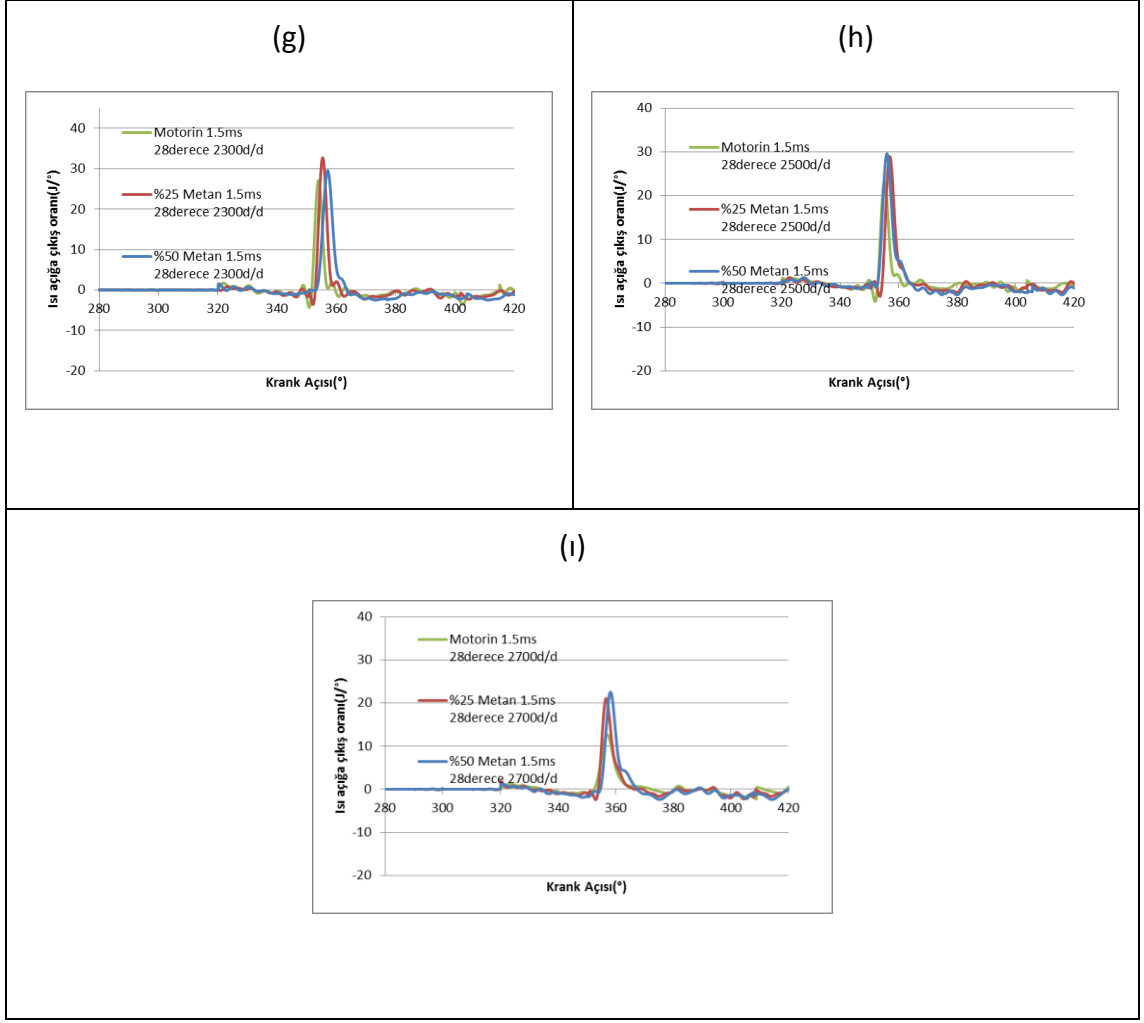


(e)



(f)





Şekil 4. 77 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

4.1.6.2 1.75ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları

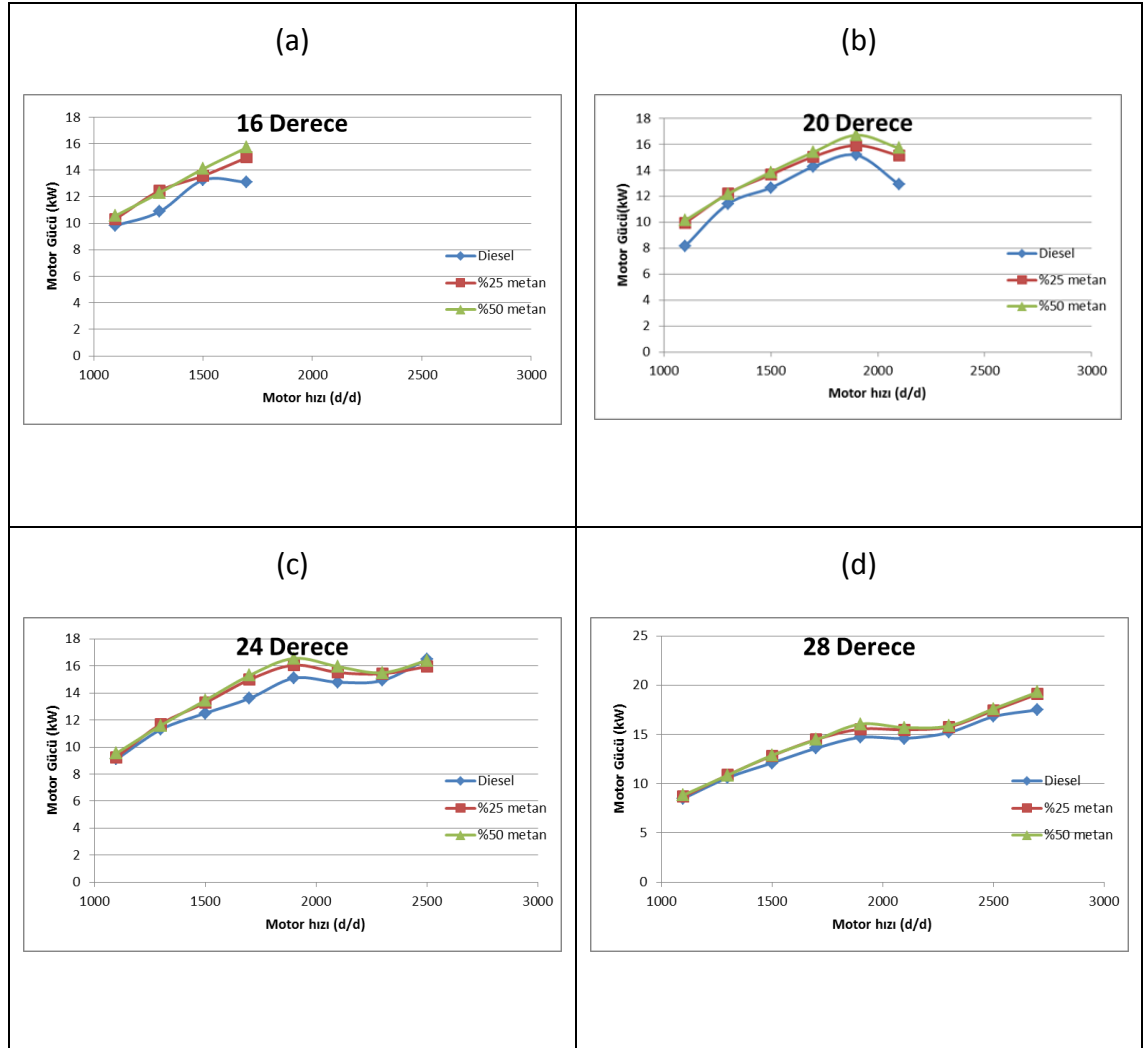
Şekil 4.78’de görüldüğü gibi, metan ilavesi ile motor gücünde tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde benzer karakteristik eğriler görülmüştür. Metan ilavesi ile motor gücünde yükselme gözlemlenmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,5 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,9 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %24,3 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,2 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10,3 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.79’da ise motor torku verilmiştir. Tüm püskürtme avansı ve çalışma devirlerinde benzer karakteristik eğriler ve motor torkunda yükselme gözlemlenmiştir. Maksimum tork artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,9 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,7 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,5 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,7 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8,9 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,4 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %12,2 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.80’de ise termik verim değerleri verilmiştir. Maksimum termik verim artışı, 16°

püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %6,8 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %16,5 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %34,5 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %80,4 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,2 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %39,9 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %22,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %44,6 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, %50 metan ilaveli şartta termik veriminin diğer yakıtlara oranla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.81’de özgül yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Maksimum özgül yakıt tüketimi değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %65,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19,1 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %25,7 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %44,6 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %29,2 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %31,4 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %20,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %30,1 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Yüksek püskürtme avansında metan ilavesinde yalnız motorine göre özgül yakıt tüketiminde yükseliş görülmektedir.

Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır. [63]

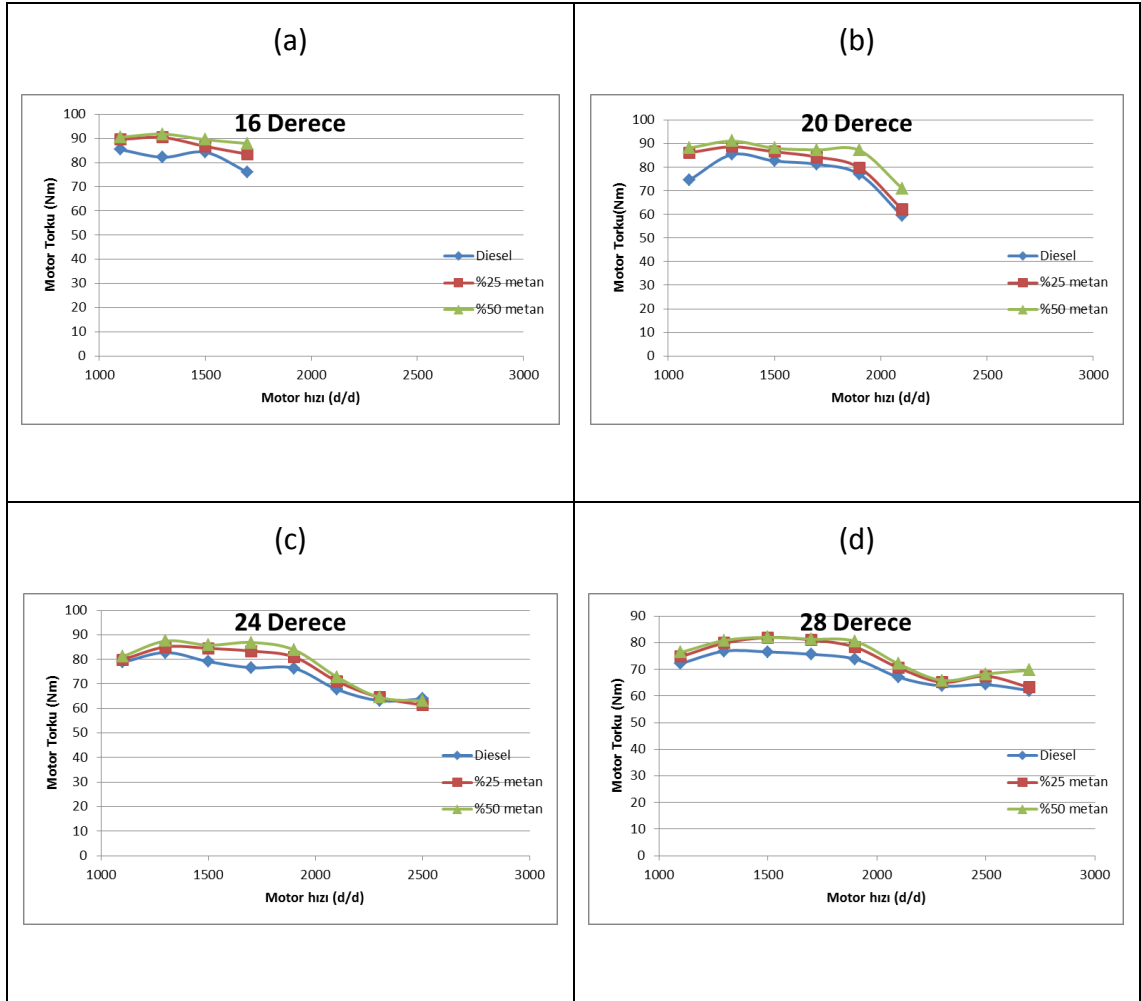
Gaz yakıt hava karışımında, gaz yakıt miktarı arttıkça hava fazlalık katsayısı aşırı fakirden zengine doğru yaklaşacağı için silindir içi sıcaklıklar artar ve özgül yakıt tüketimi düşer [74].

Ancak, özellikle düşük devirlerde ve %25 metan ilavesi koşullarında termik verim yalnız motorin yakıtı şartına göre bir miktar artmaktadır. Bunun nedeni, çift yakıtlı motorlarda gaz yakıt oranının artması termik verim ve yanma verimini düşürmektedir. Termik verimin düşüş nedeni, yanmamış gaz yakıt, düşük volümetrik verim ve yanma zamanının gaz yakıt değişiminden sonra tam optimize edilmemesidir [63].



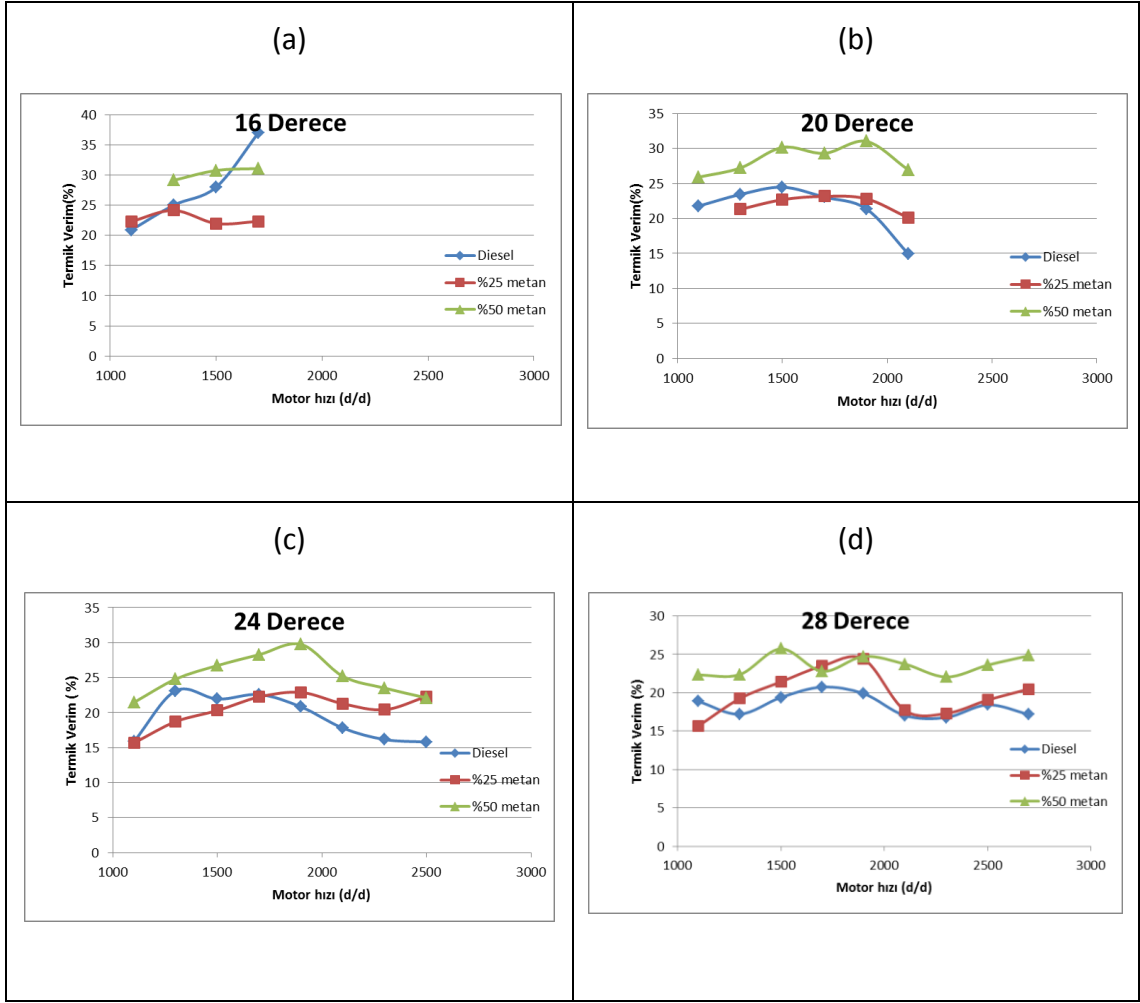
Şekil 4. 78 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



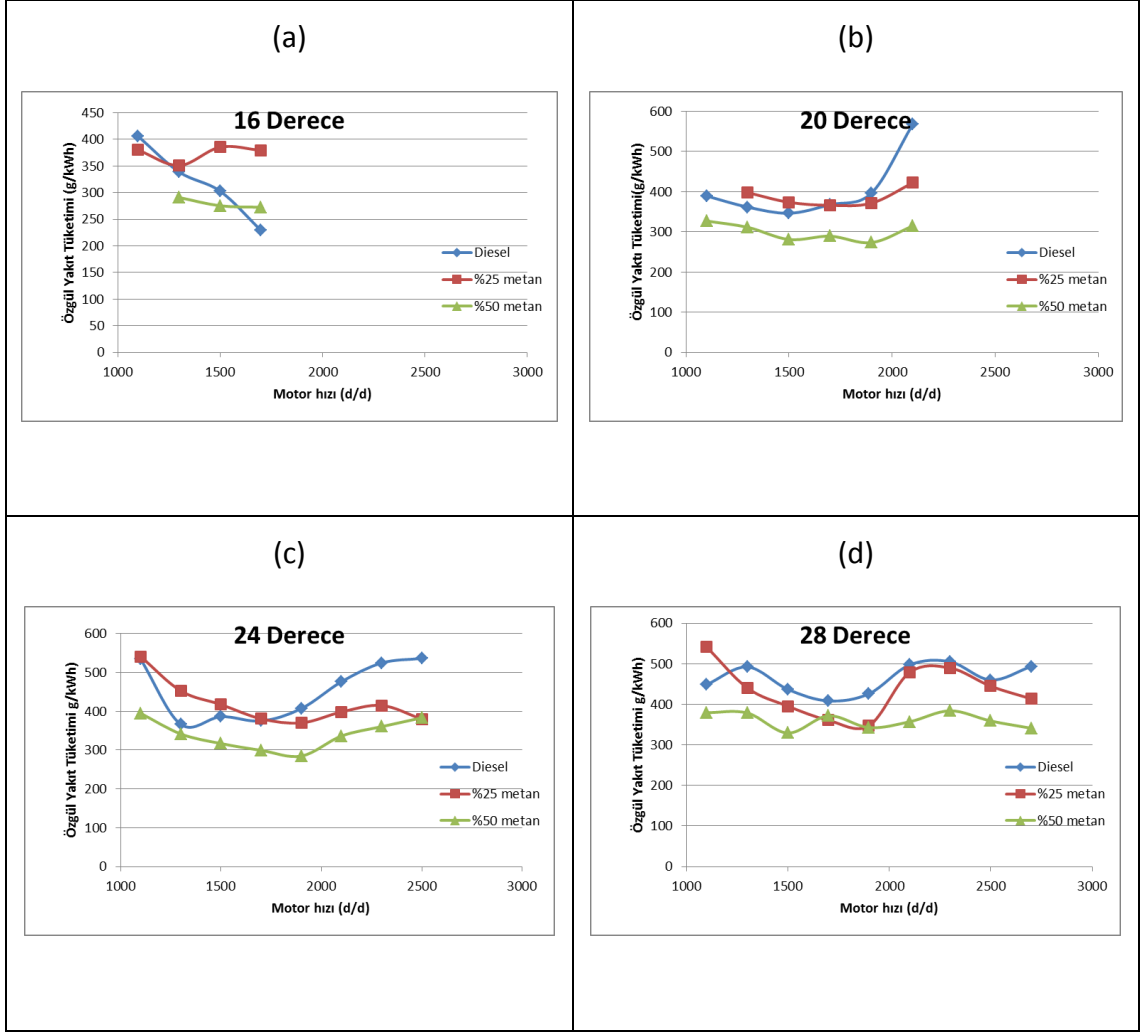
Şekil 4. 79 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 80 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Şekil 4. 81 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.82’de görüldüğü gibi, metan ilavesi ile özellikle düşük devir ve düşük püskürtme avansında karbon monoksit miktarlarında artış görülmektedir. Maksimum karbon monoksit emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %649 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %479 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %315 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %181 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %503 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta,

1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %348 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %156 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %127 artış meydana geldiği bulunmuştur. Deneyler tam yük şartında yapıldığı için, devir arttıkça motor gücünün de arttığı görülmektedir. Bu yüzden düşük devirlerde, yani düşük motor yüklerinde, hava fazlalık katsayısı artmakta ve yanma hızı düşmektedir. Düşük yanma hızı yanma veriminin düşmesine dolayısıyla CO emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. [69]

Şekil 4.83'te ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karbondioksit miktarında doğalgaz ilavesi ile düşük motor devri ve düşük motorin püskürtme avansında azalma görülmektedir. Maksimum karbondioksit emisyonu düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %9,4 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,6 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,1 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %20,3 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %23,6 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %24,6 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %25,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %35,3 düşüş meydana geldiği bulunmuştur.

Gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70]. Ancak diğer taraftan, fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70].

Şekil 4.84'te ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, bazen hidrokarbon miktarında düşüş meydana geldiği gözlemlenirken, bazen de hidrokarbon miktarında artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum hidrokarbon emisyonu artışı,

16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %320 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %2,8 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %144 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %247 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %67,9 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %182,1 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %166,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %370,8 artış meydana geldiği bulunmuştur. Gaz yakıtı oluşturan bileşiklerin yanmamış HC'leri oluşturma eğiliminin yüksek olmasından kaynaklıdır. [63]

Motor yükü arttıkça HC emisyon miktarı düşmektedir. Düşük motor yüklerinde yanma daha yavaş gerçekleşmektedir. Diğer taraftan, standart susturucu yerine katalist susturucu kullanıldığı tam motor yükü şartında, dizel-doğalgaz çift yakıtı kullanımındaki HC emisyonu dizel kullanımındakiyle aynı seviyeye, neredeyse 0'a gelmektedir. Oksidasyon katalizörü kullanılarak HC ve CO emisyonlarındaki artışlar azaltılabilmektedir [70]. Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmaya göre, oksidasyon katalisti HC emisyonları için düşük yüklerde düşük gaz sıcaklığı yüzünden daha az etkili iken yük arttıkça HC emisyonları neredeyse sıfıra indirmektedir.

Şekil 4.85'te ise NO_x emisyonları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre %50 metan ilaveli çift yakıt şartında NO_x değerlerinin, hem yalnız motorin, hem de %25 metan ilaveli çift yakıt şartı NO_x değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. %25 metan ilaveli durumda NO_x emisyonları, yalnız motorin ile çalışma şartına göre bazen artarken, bazen düşmektedir. Maksimum NO_x emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %20,3 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %76,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %35,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin

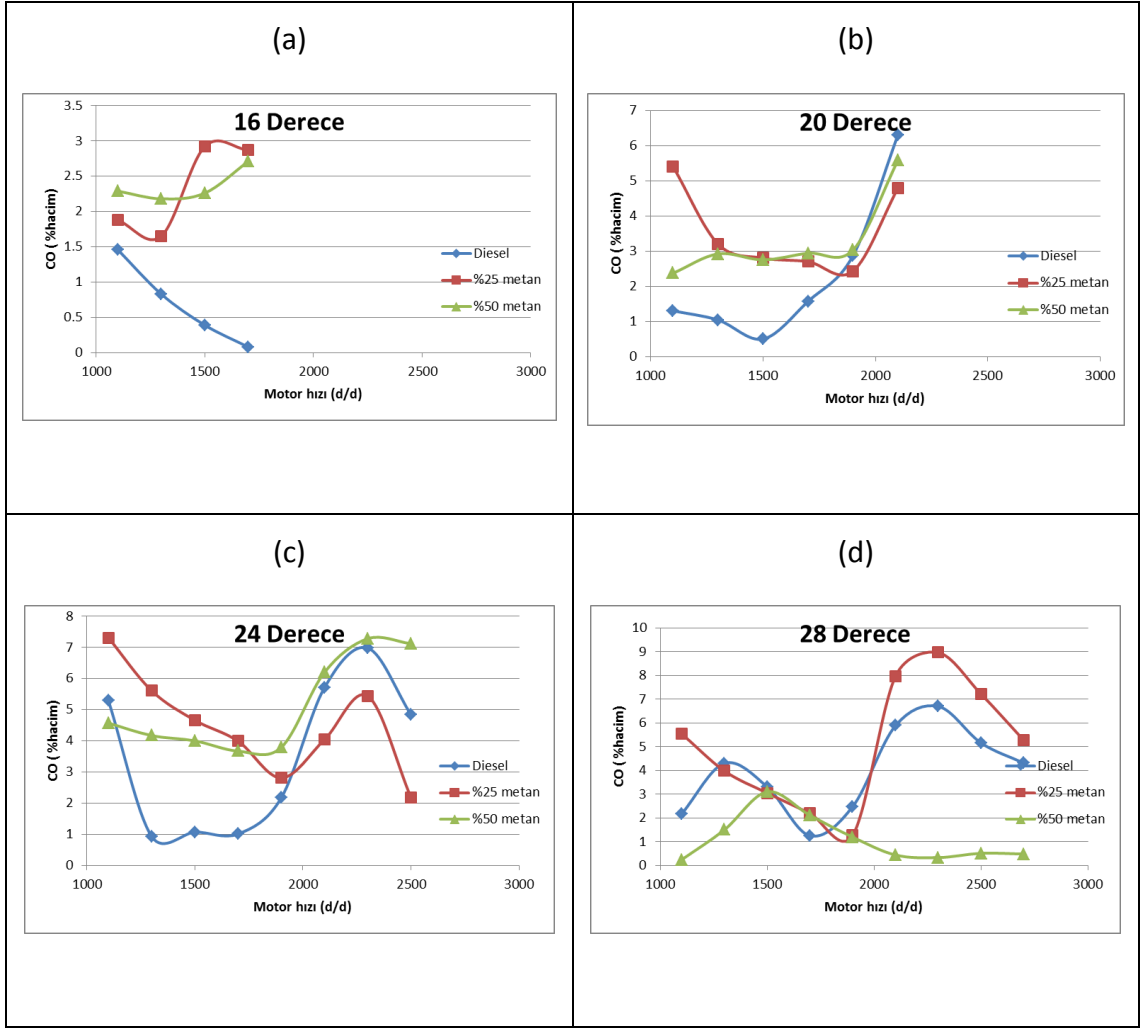
yakıtına göre %192,1 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %32,4 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %180,1 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %183 artış meydana geldiği bulunmuştur.

Gaz yakıtın ilavesiyle daha fazla ısı ortaya çıkmış olsa da, daha homojen hava-yakıt karışımının kullanılmış olması, lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasını engellemiş ve NO_x emisyonunu düşürmüştür. Öte yandan, silindir cidarları gaz yakıt kullanımı sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış, gaz yakıt tüm yanma odasına dağılarak daha yüksek ısı salınımının açığa çıkmasına ve NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur. Birbirine zıt olan bu parametreler sonucu NO_x emisyonlarında artış, düşüş veya ciddi bir değişiklik meydana gelmemesi gözlemlenebilir [75].

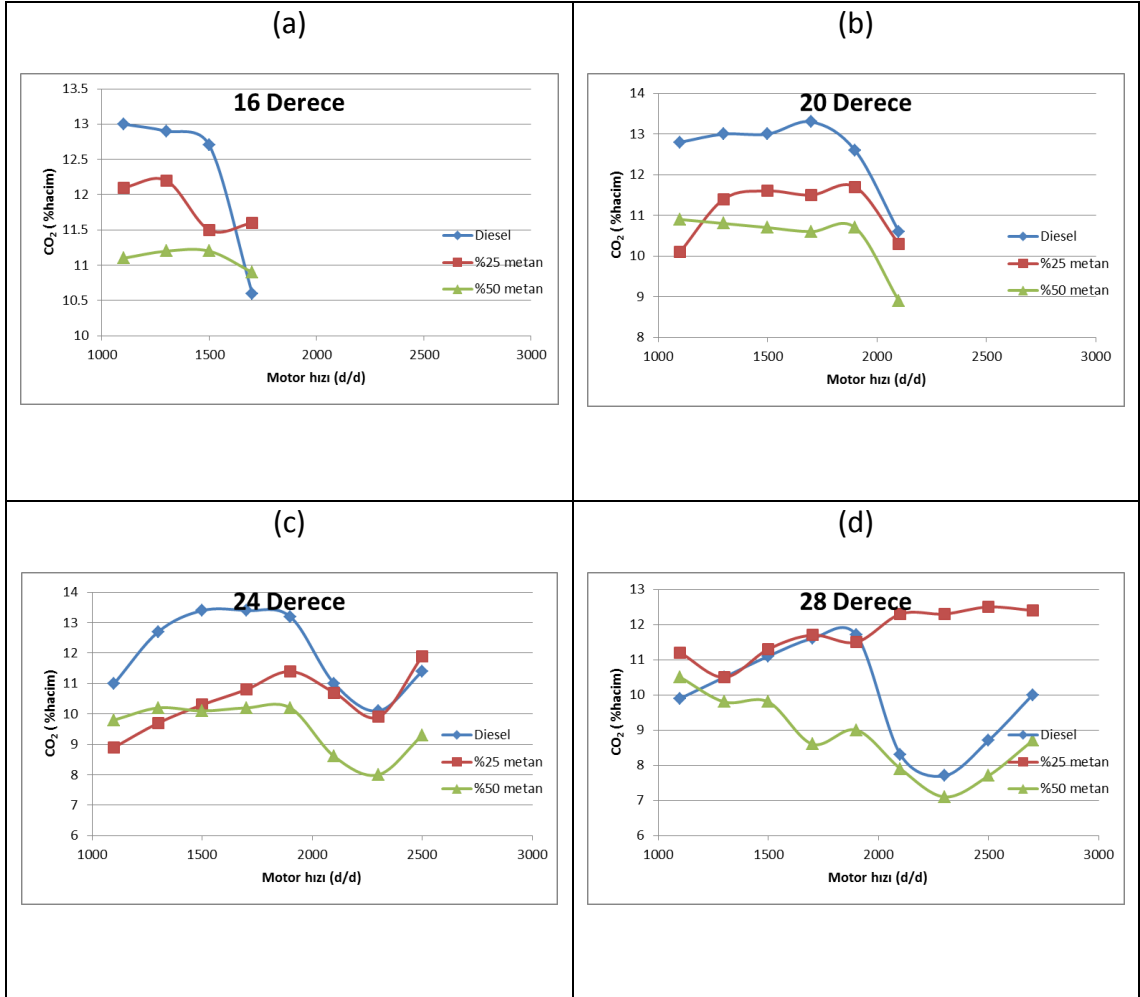
Şekil 4.86’te ise is emisyon değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre metan ilavesi ile genelde is değerlerinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Maksimum NO_x emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %70 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %95,7 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %77,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %91,9 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %95,7 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %62,9 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %93,7 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Gaz yakıt miktarı arttıkça, silindir içerisine gönderilen dizel yakıt miktarı azaldığı için, is emisyonları azalmaktadır. Ayrıca, ilave yakıt olarak kullanılan doğalgazın temel

komponenti olan metanın parafin ailesinin en düşük is emisyonu oluşturmaya eğilimli üyesi olması da is emisyonunun azalmasında etkilidir [62].

Şekil 4.87’te görüldüğü gibi, metan ilavesi ile egzoz çıkış sıcaklığında düşük devirlerde ve özellikle yüksek püskürtme avanslarında metan kullanımı ile yalnız motorin şartına göre kayda değer bir fark meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Yüksek devirlerde ve yüksek püskürtme avanslarında, artan metan oranı ile egzoz gazı sıcaklarında düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Maksimum egzoz çıkış sıcaklığı düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,7 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 21000 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,9 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,1 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %81,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %19 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %31 düşüş meydana geldiği bulunmuştur.

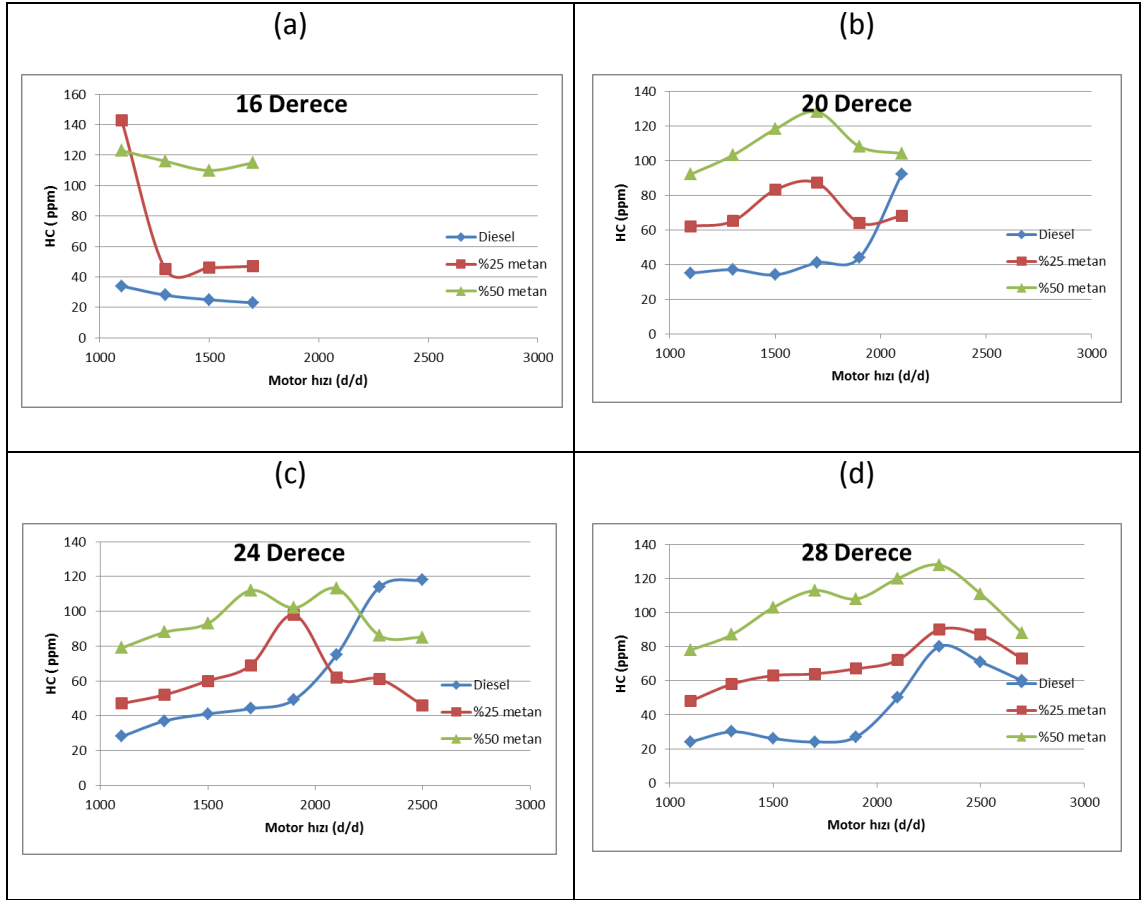


Şekil 4. 82 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği
 (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
 (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



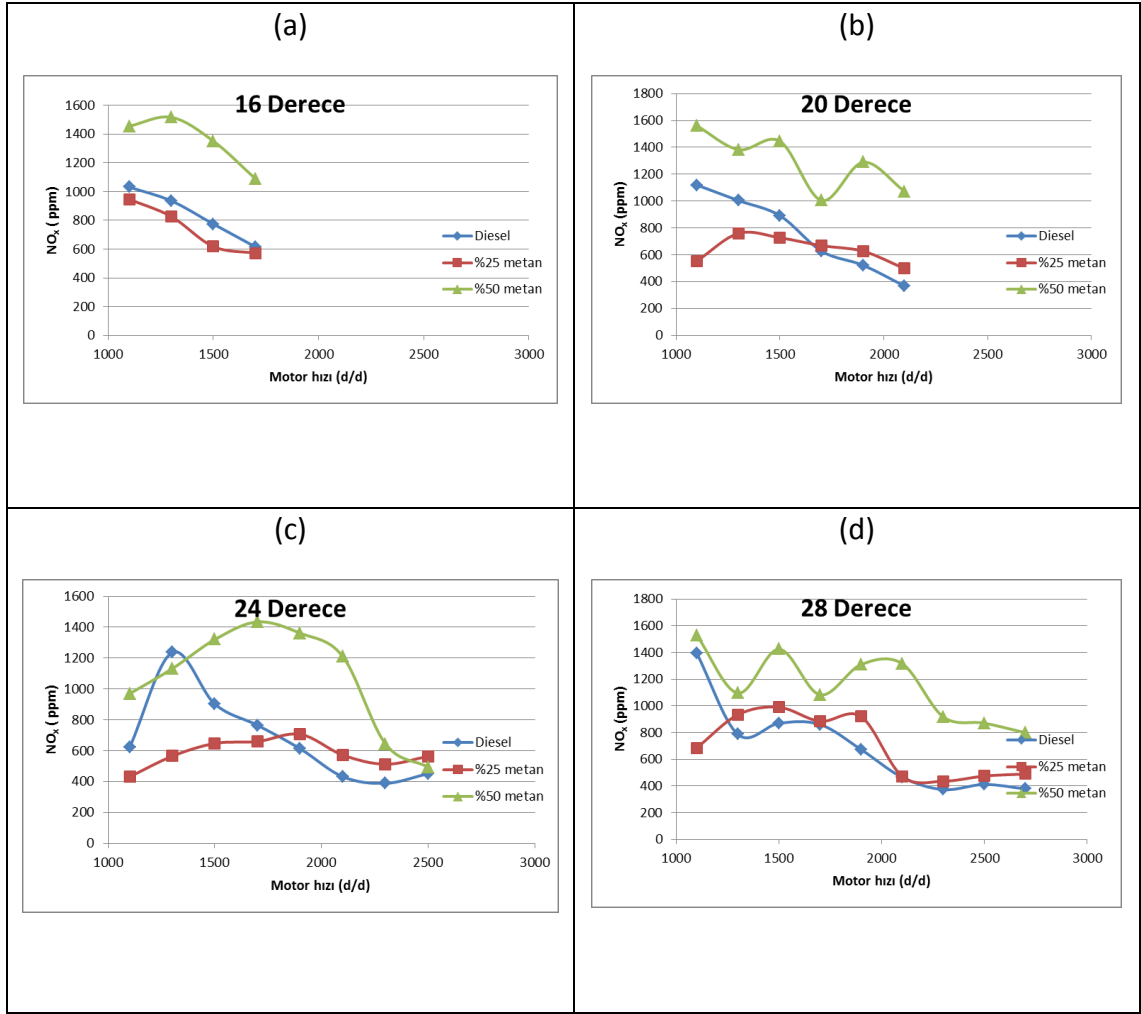
Şekil 4. 83 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi



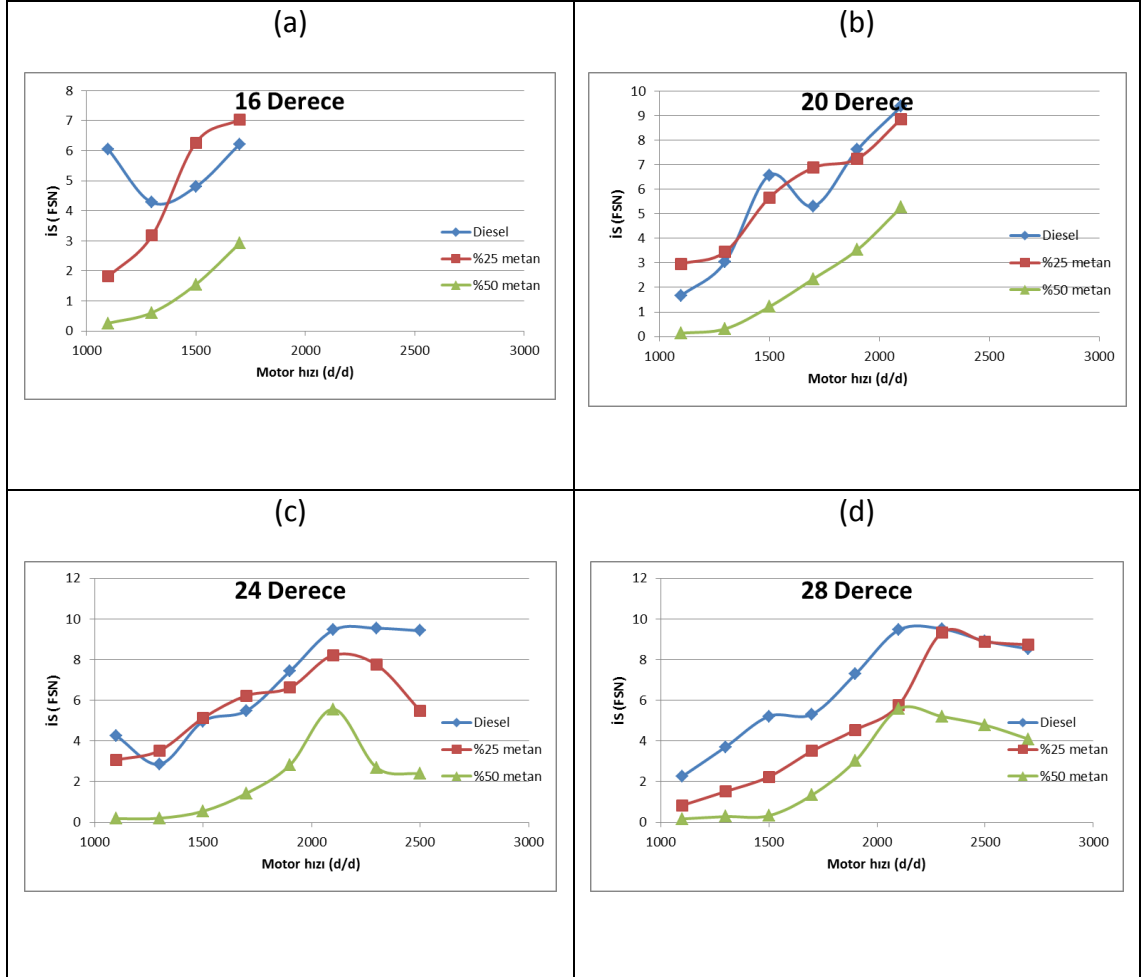
Şekil 4. 84 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi



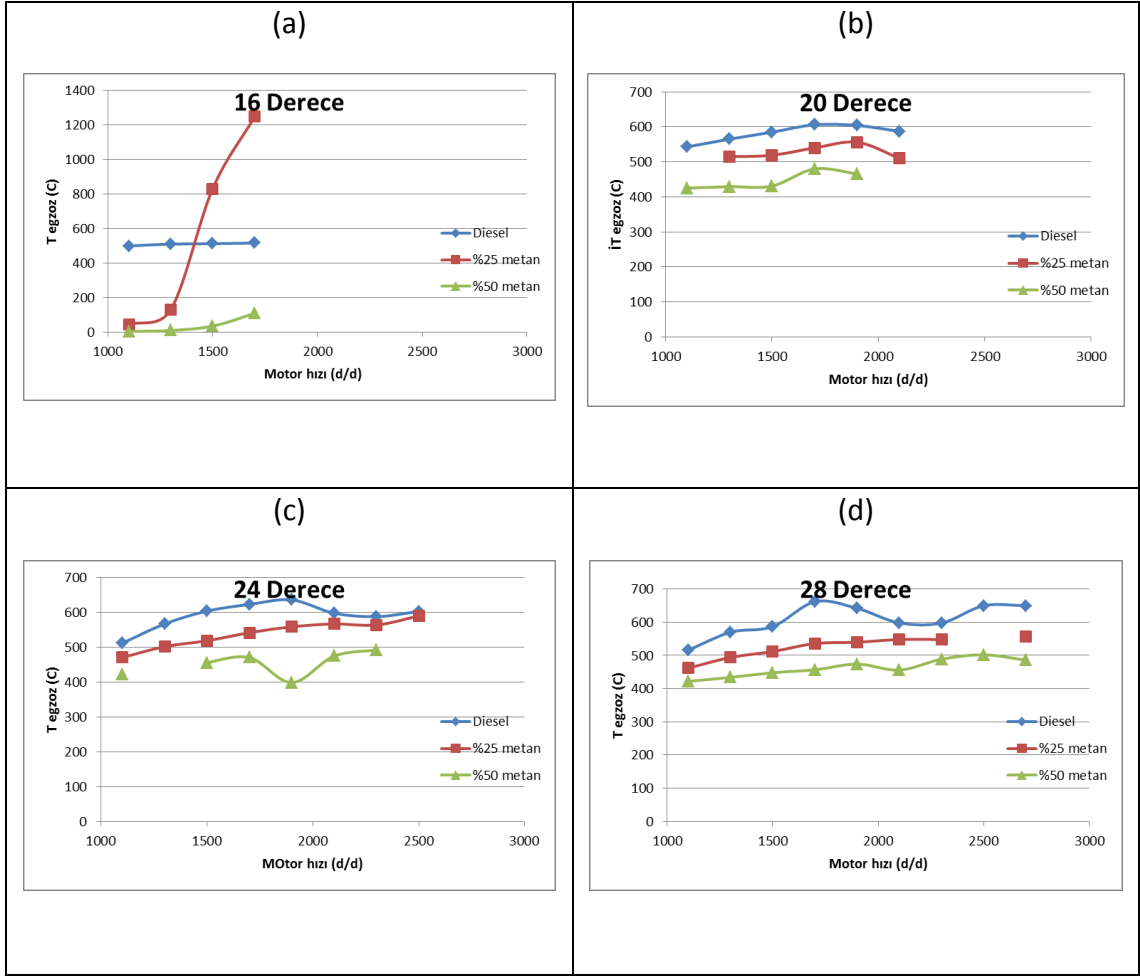
Şekil 4. 85 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi



Şekil 4. 86 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi

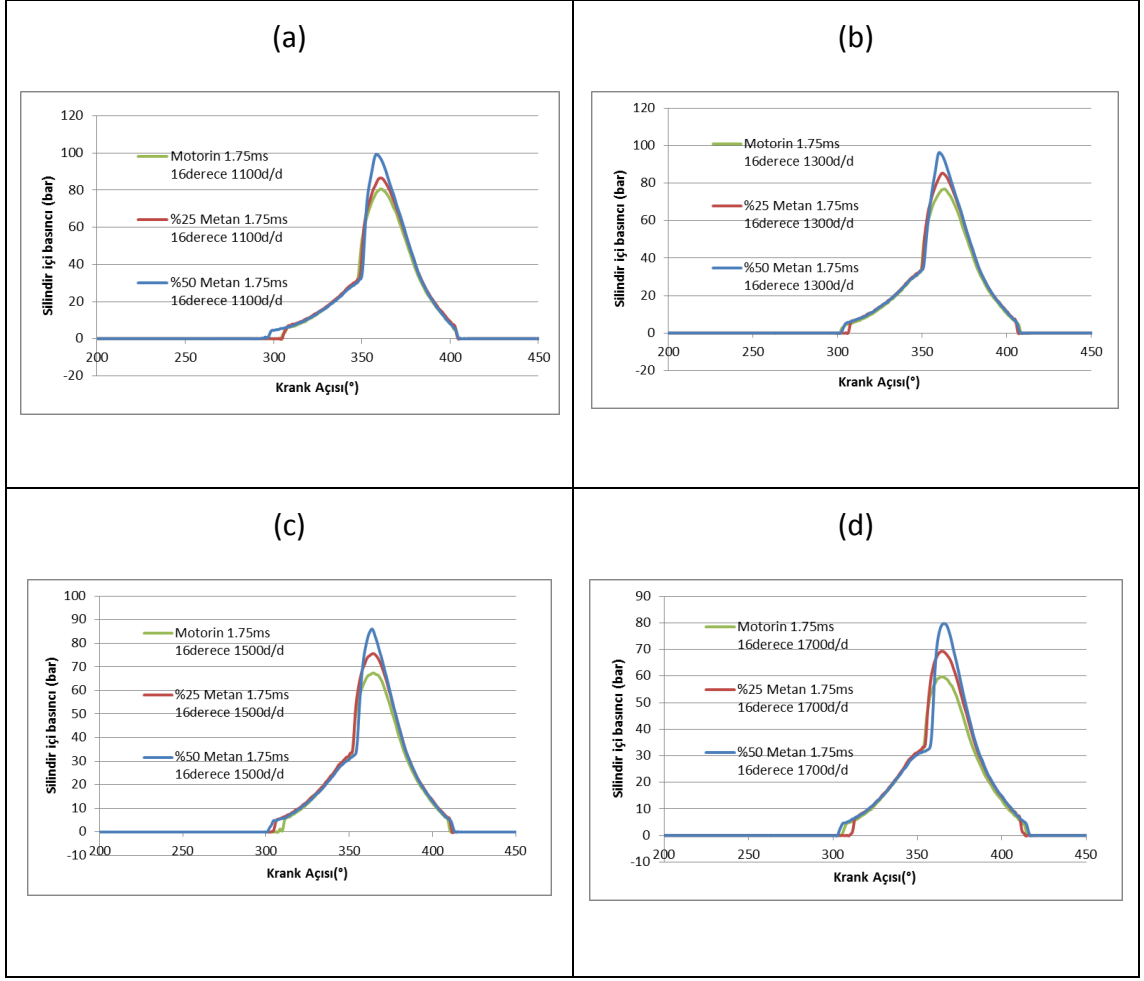


Şekil 4. 87 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi

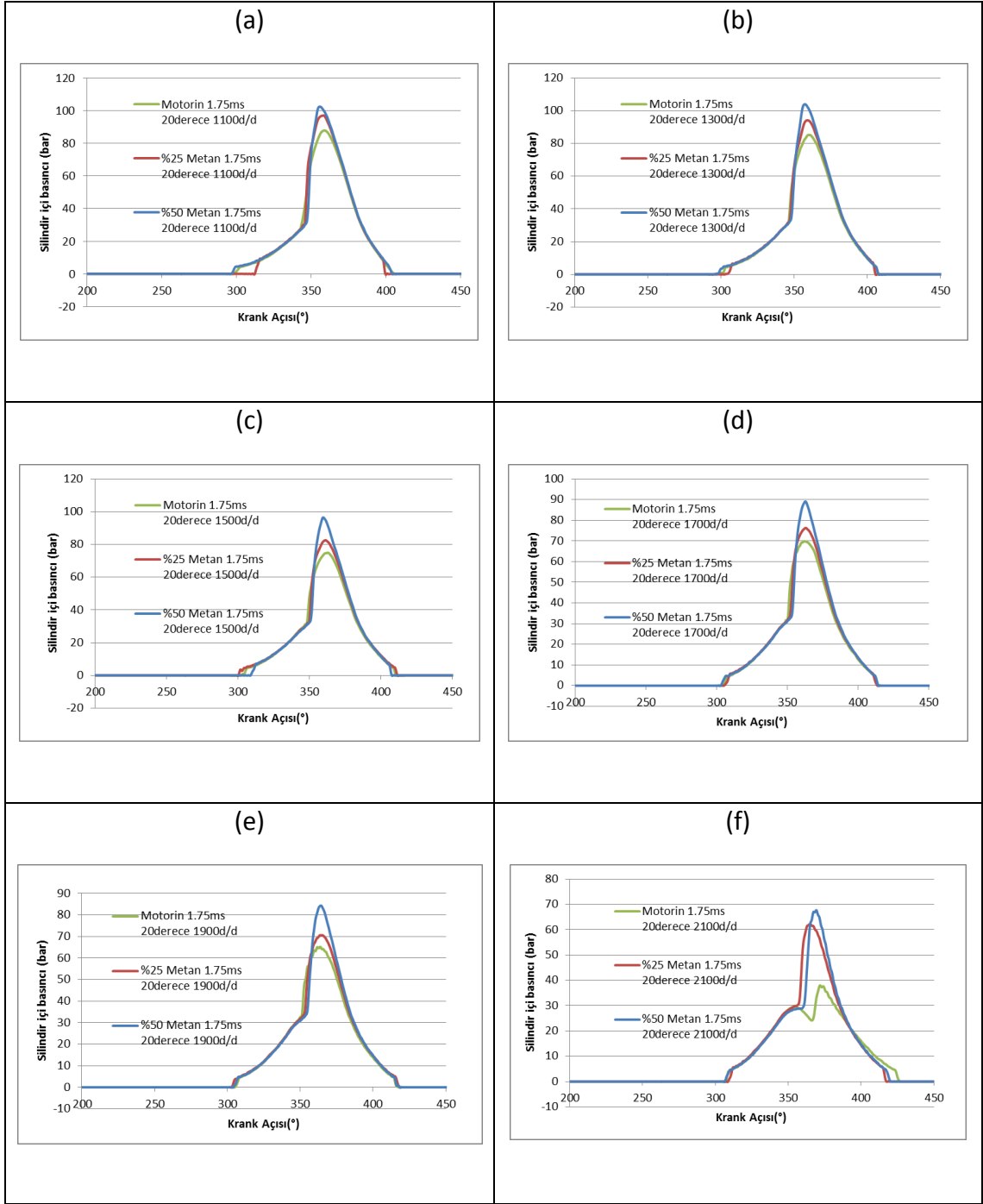
Şekil 4.88-91 arasında görüleceği üzere, 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, metan ilaveli çift yakıtın maksimum silindir içi gaz basıncı değerinin, yalnız motorin maksimum silindir içi gaz basıncı değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Motor yükü artıkcı silindir içi pik basınç artmaktadır. Homojen dolgulu biyogaz hava karışımı oluştucu için, kontrolüz yanma fazında daha fazla yakıt bir anda yanmakta böylece yanma üst ölü noktaya daha çok yaklaşmaktadır. Aynı zamanda sabit hacimde yanma prosesinde ideale yakın yanma gerçekleşmektedir [67]. Mansor vd. [68] elde ettiğı sonuçlara göre, CH₄'ün yüksek olduğı oranlarda silindiri içi maksimum basınç değeri yalnız dizelin kullanıldığı durumdan daha yüksektir.



Şekil 4. 88 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

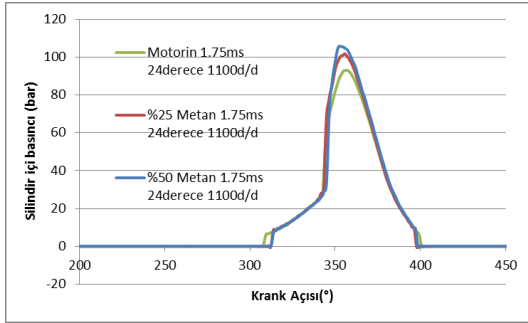
- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



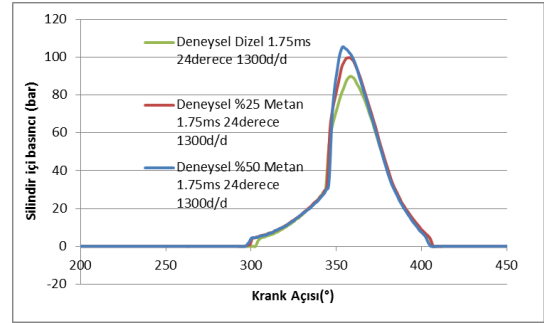
Şekil 4. 89 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

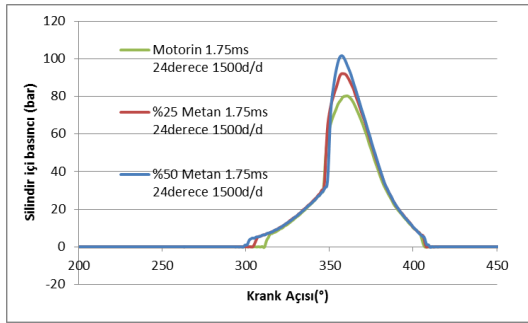
(a)



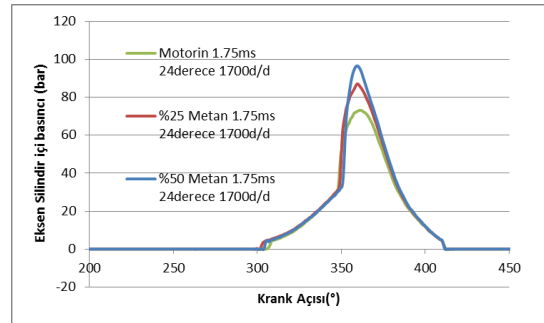
(b)



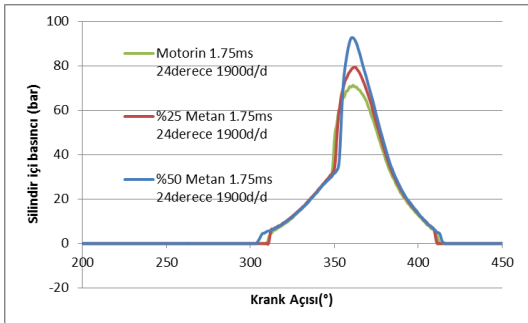
(c)



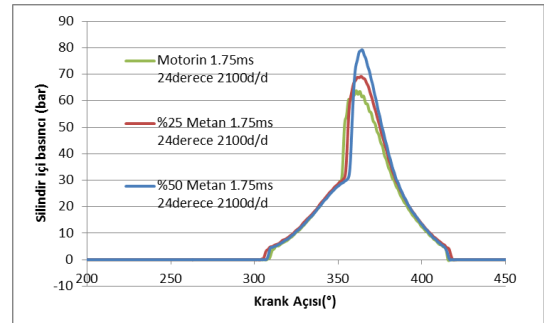
(d)

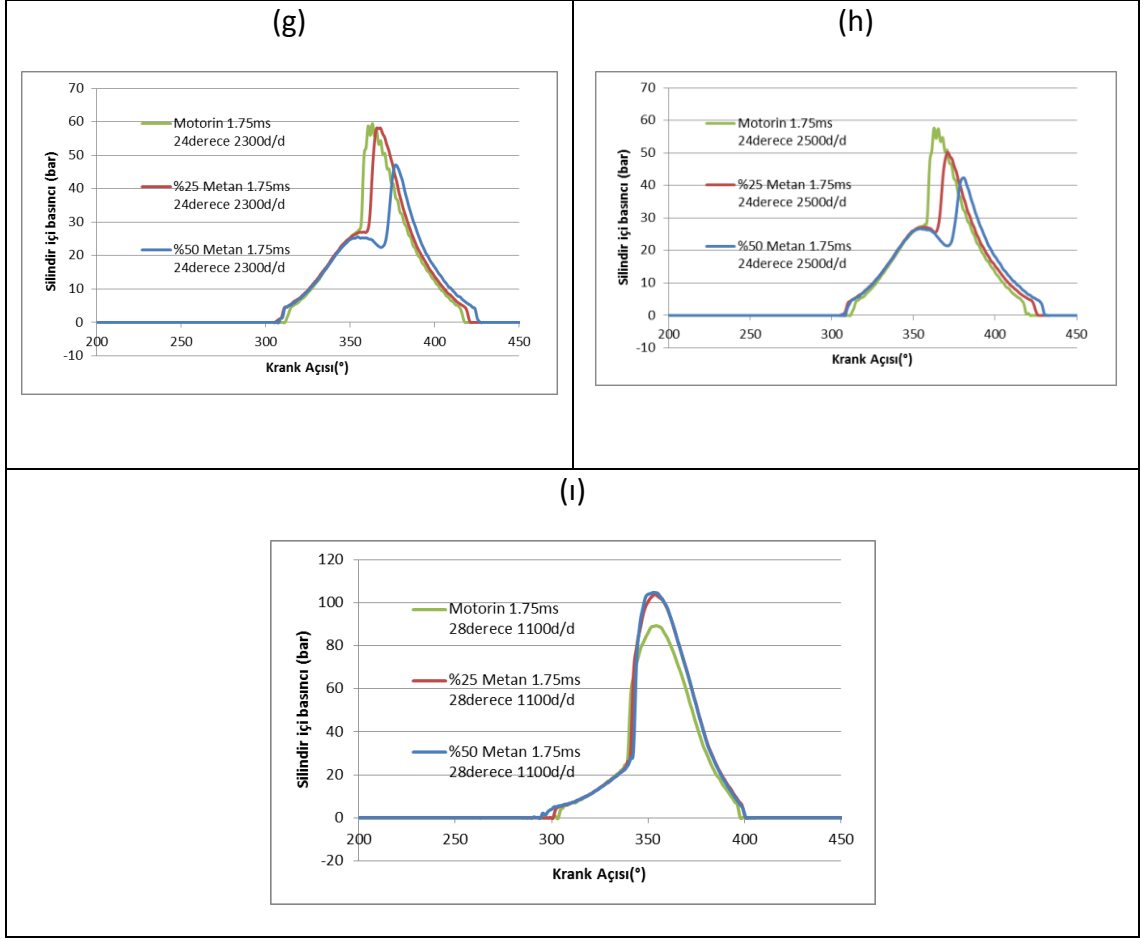


(e)



(f)

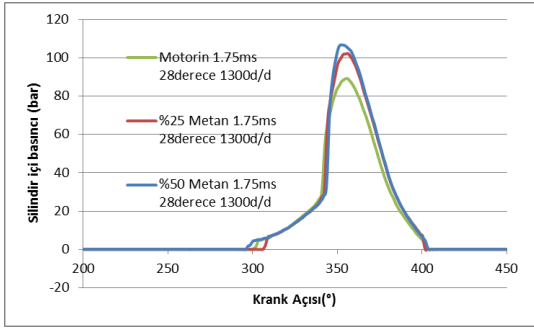




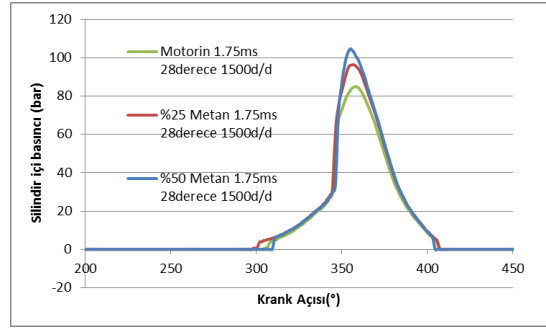
Şekil 4. 90 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (i) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

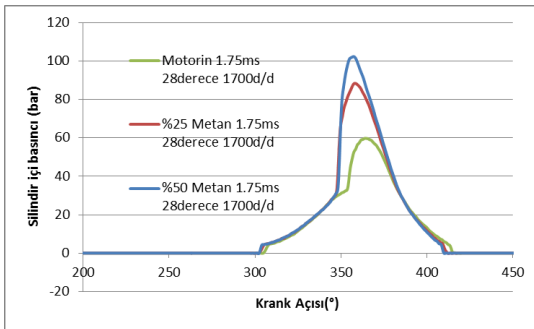
(a)



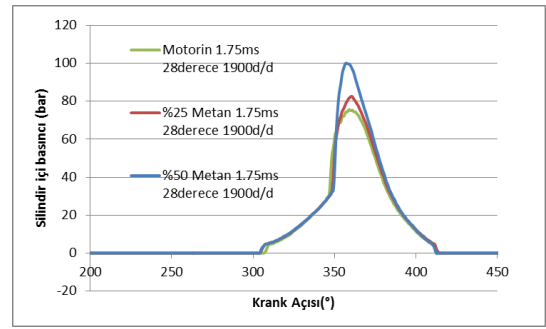
(b)



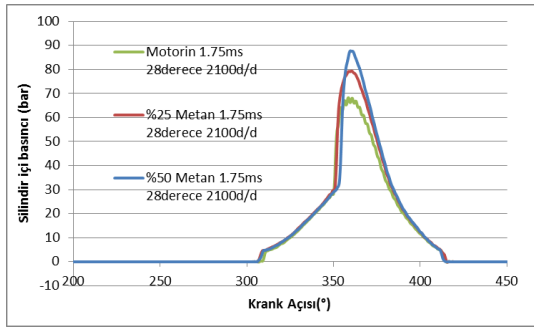
(c)



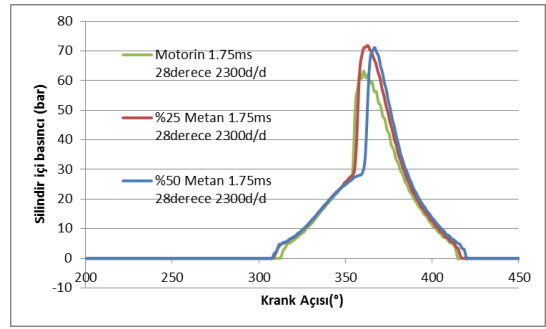
(d)

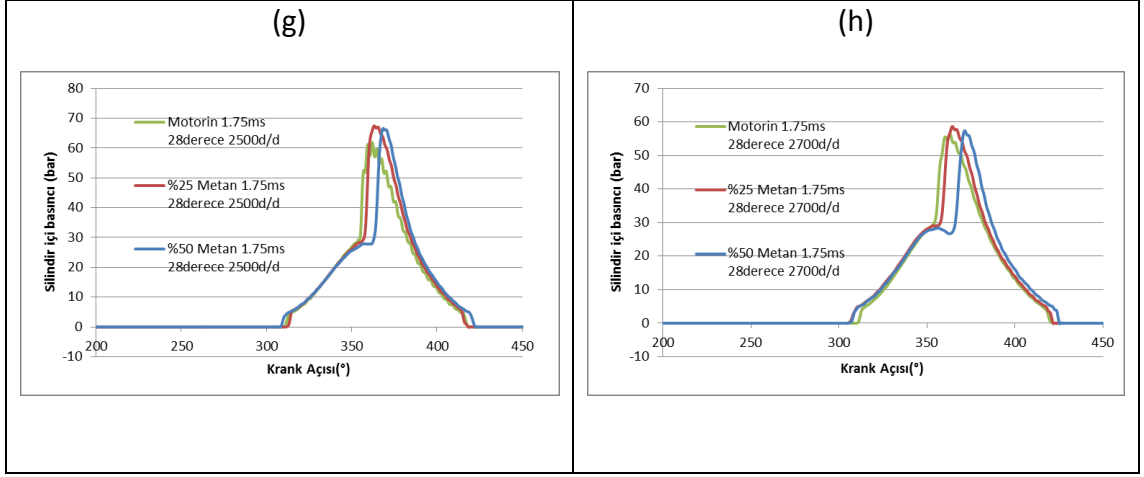


(e)



(f)

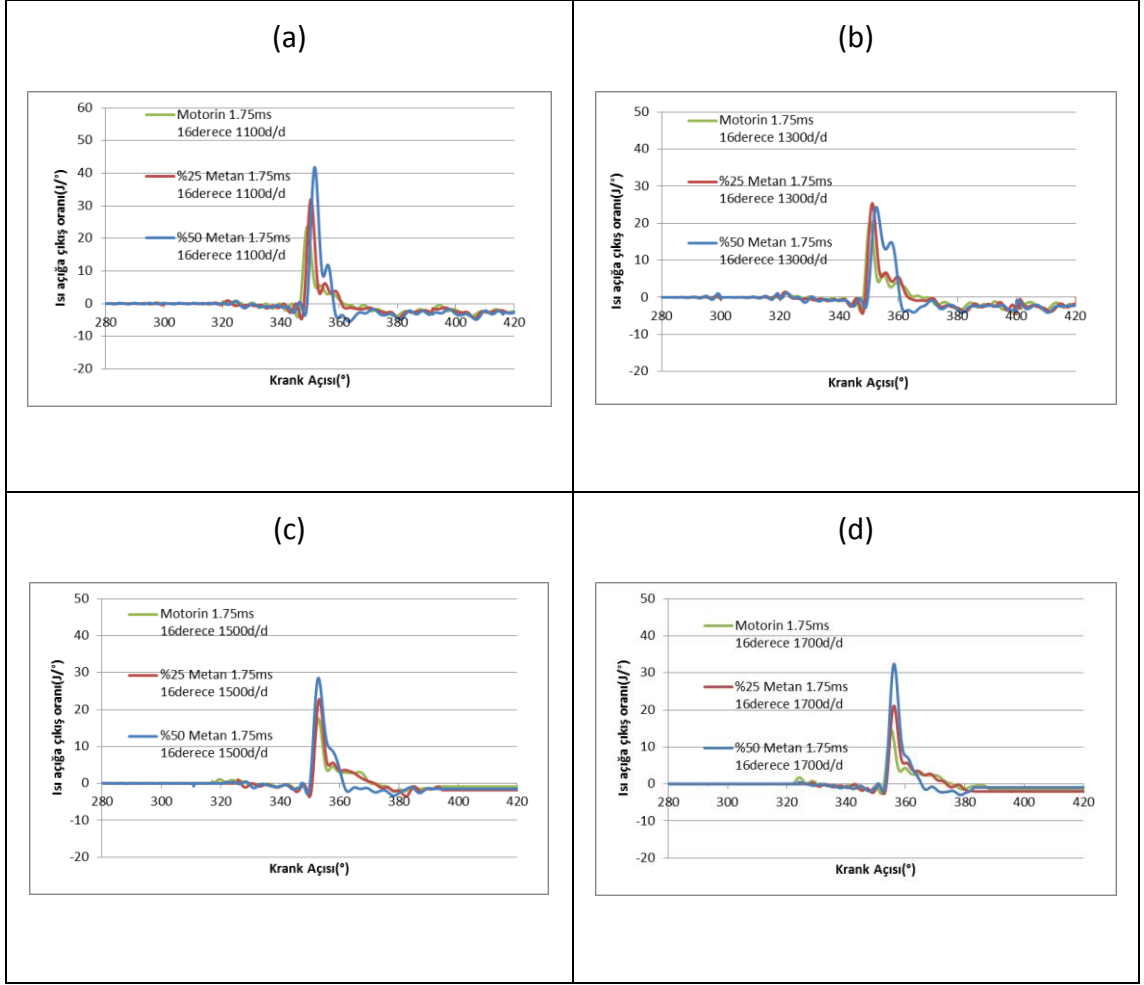




Şekil 4. 91 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

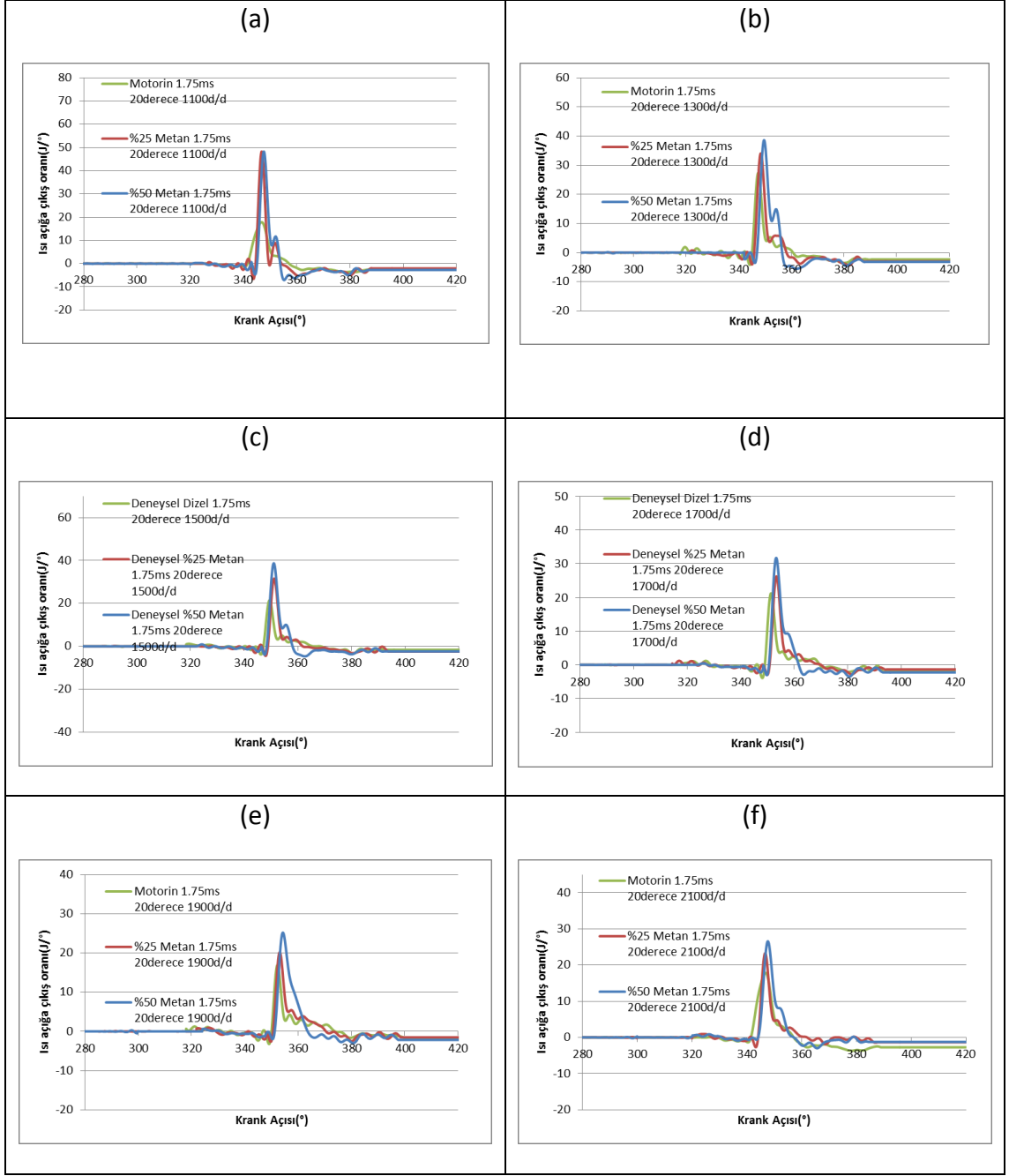
- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

Şekil 4.92-95 arasında görüleceği üzere, 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, doğalgaz ilaveli doğalgaz-motorin çift yakıtlarının maksimum ısı açığa çıkış oranının, yalnız motorin şartında ısı açığa çıkış oranına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Gaz yakıt/hava karışımı olan dolgunun dizel gönderilmesiyle yanma merkezinde tutuşarak alev cephesinin ilerlemesini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69].



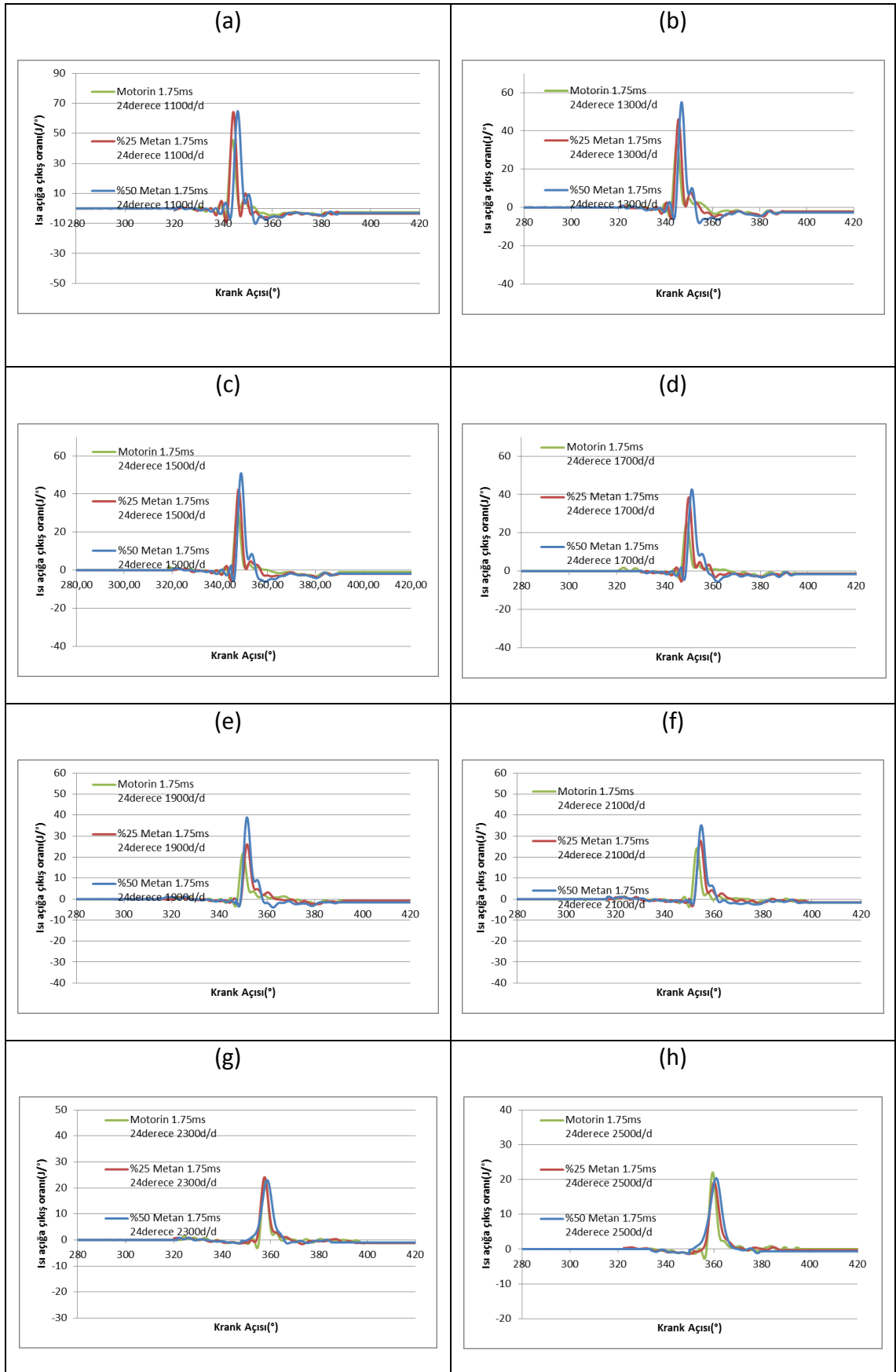
Şekil 4. 92 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



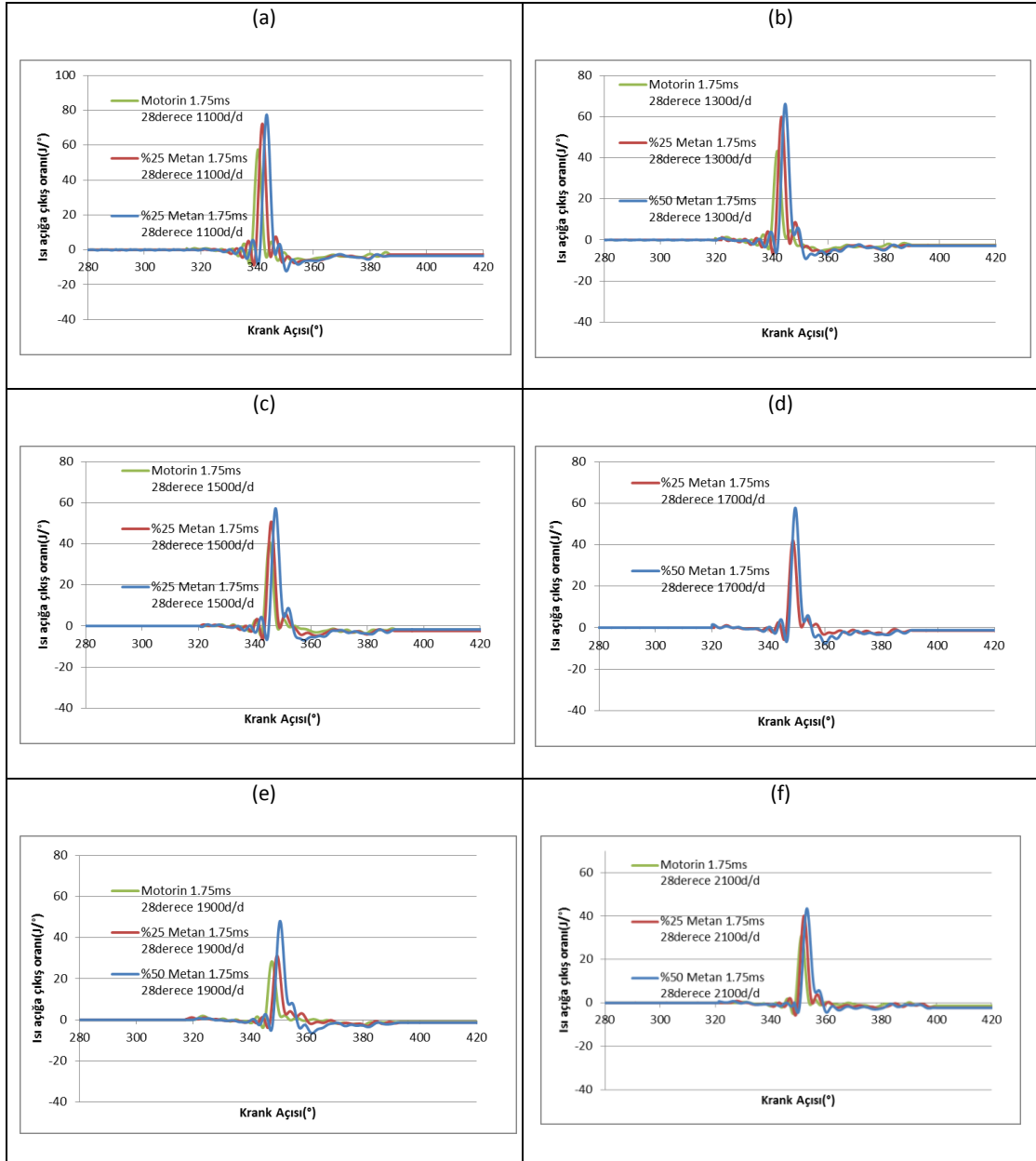
Şekil 4. 93 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

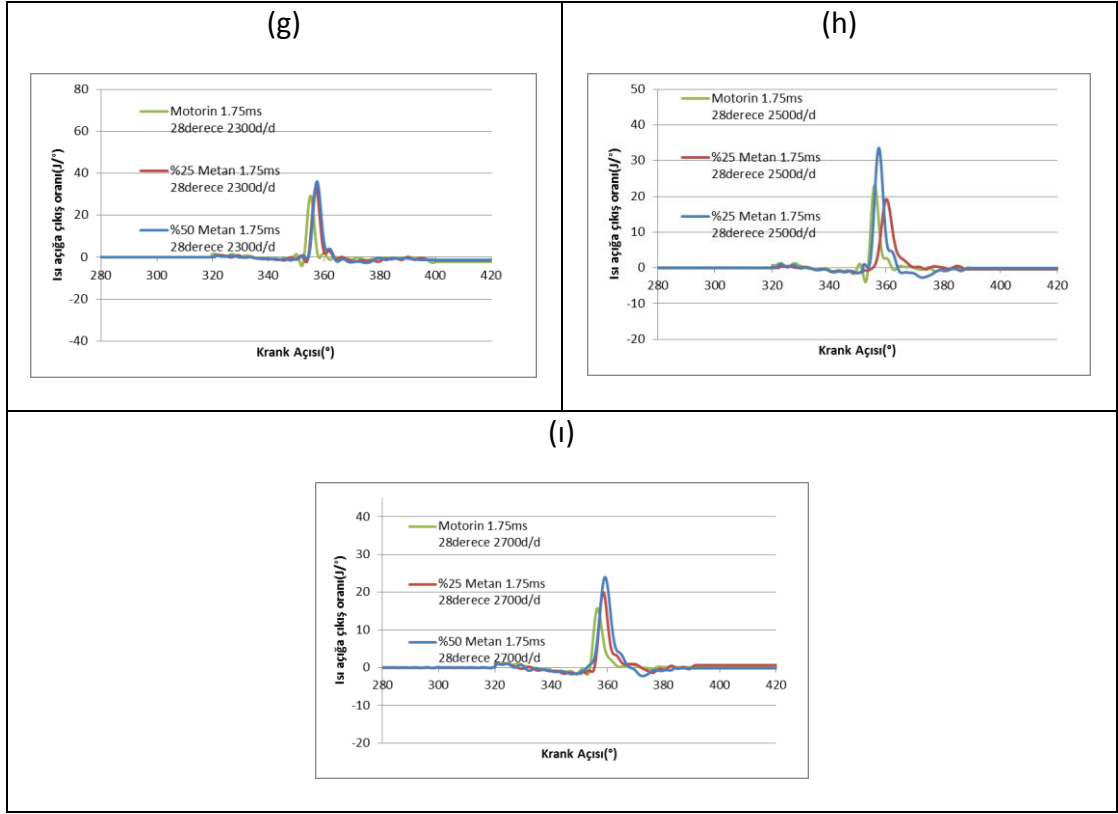
- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi, (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



Şekil 4. 94 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi





Şekil 4. 95 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

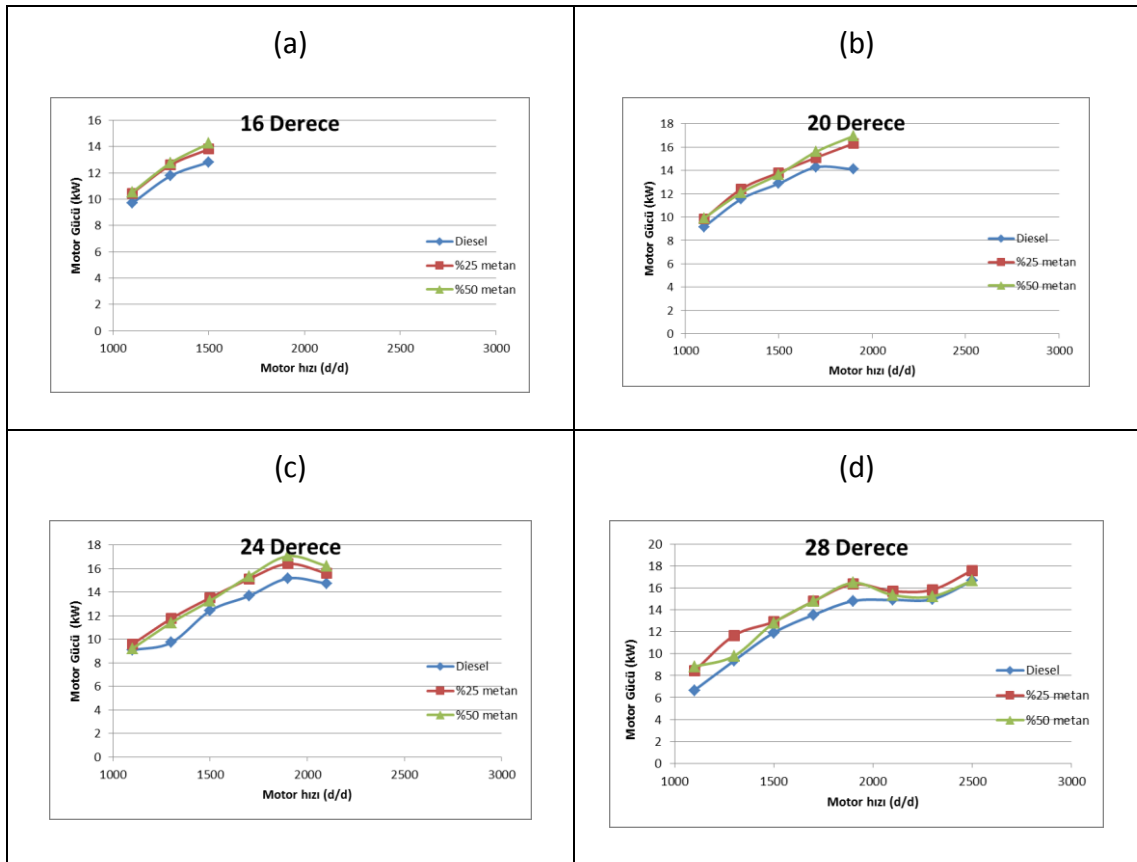
4.1.6.3 2ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Metan-Motorin Sonuçları

Şekil 4.96’da görüldüğü gibi, metan ilavesi ile motor gücünde tüm püskürme avansı ve çalışma devirlerinde artış meydana gelmiştir. Maksimum güç artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,8 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında

yalnız motorin yakıtına göre %11,1 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %15,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %20,2 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17,4 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %32,4 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.97’de ise motor torku verilmiştir. Yine elde edilen sonuçlardan, motor torkunda metan ilavesi ile bir artış meydana gelmediği gibi, eğriler benzer karakteristik özellikler göstermiştir. Şekil 4.96’da ise termik verim değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, farklı püskürtme avanslarında ve farklı motor devirlerinde, metan ilavesi ile termik verimde artış olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum termik verim artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,8 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48,9 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %59 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %21,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %81,6 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %51,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %94,4 artış meydana geldiği bulunmuştur. Şekil 4.99’da ise özgül yakıt tüketim değerleri verilmiştir. Maksimum özgül yakıt tüketimi düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %7,2 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %32,8 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına

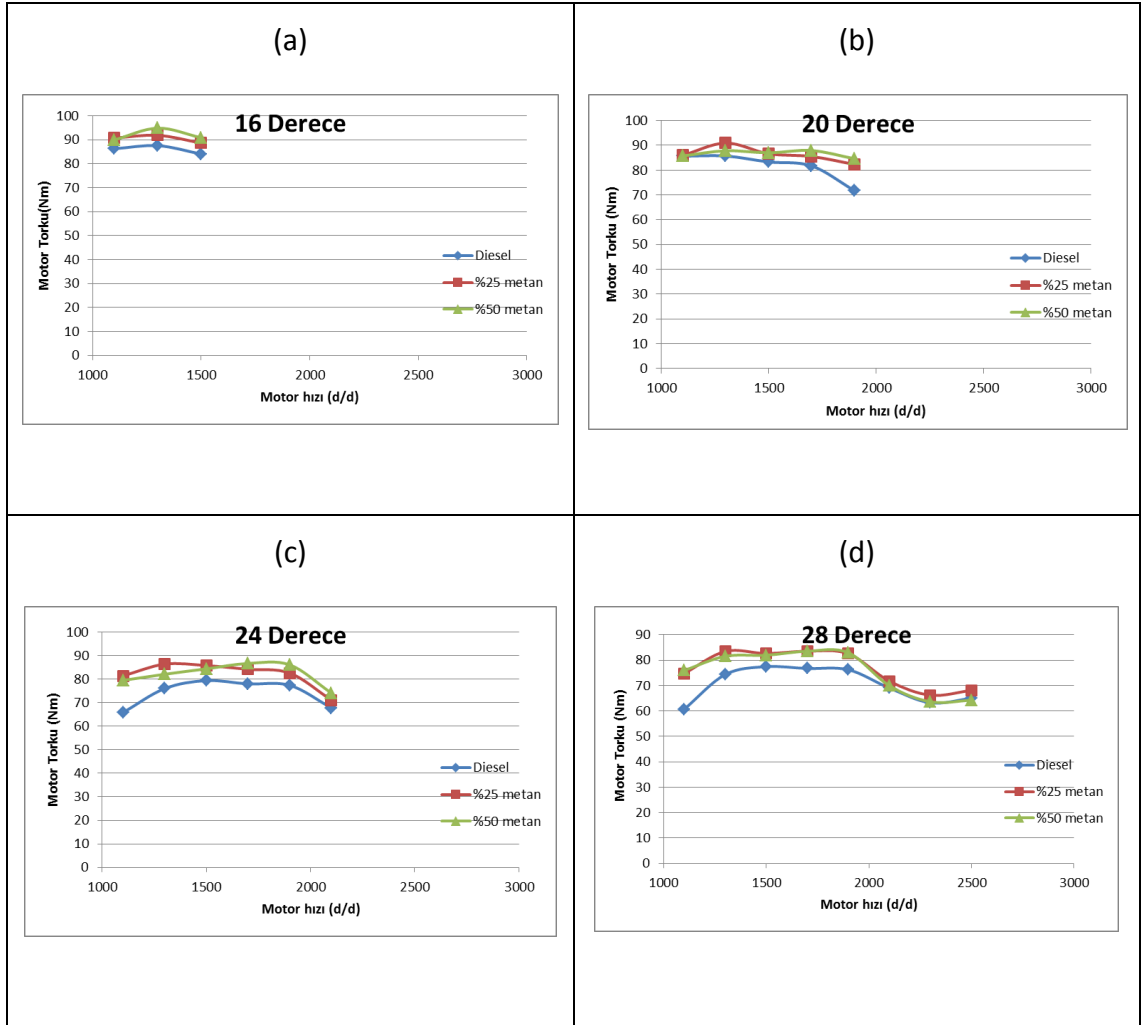
göre %17,8 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %37,1 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %17,4 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %44,9 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %34 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48,6 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre %50 doğalgaz ilaveli metan-motorin çift yakıtında, özgül yakıt tüketimi değerlerinin diğer çalışılan yakıt türlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır [63]. Gaz yakıt miktarının artması ile daha verimli bir kontrolsüz yanma fazı gerçekleşir ve termik verim artar, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi düşmektedir [74].



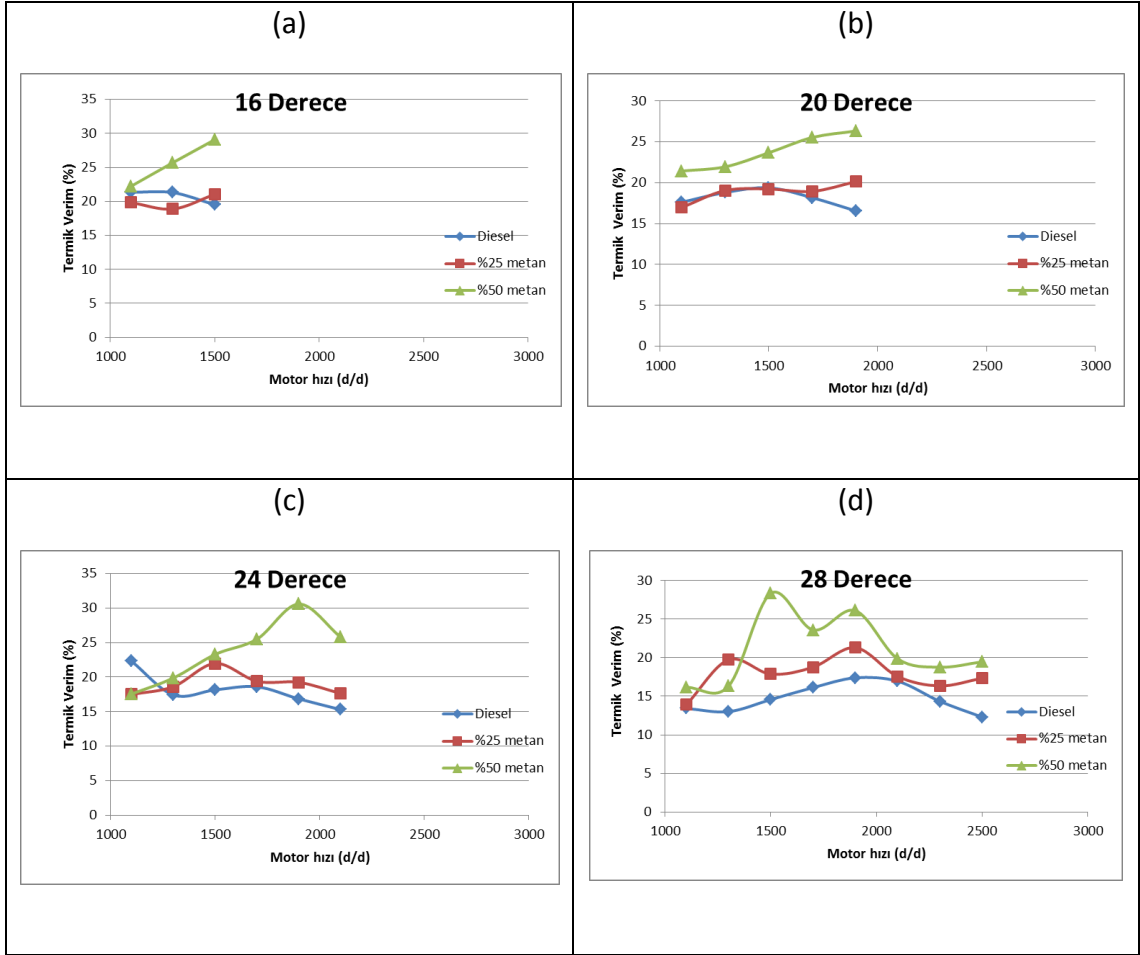
Şekil 4. 96 Farklı püskürtme avanslarında motor gücü karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
(b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
(c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi
(d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun güç karakteristiği eğrisi



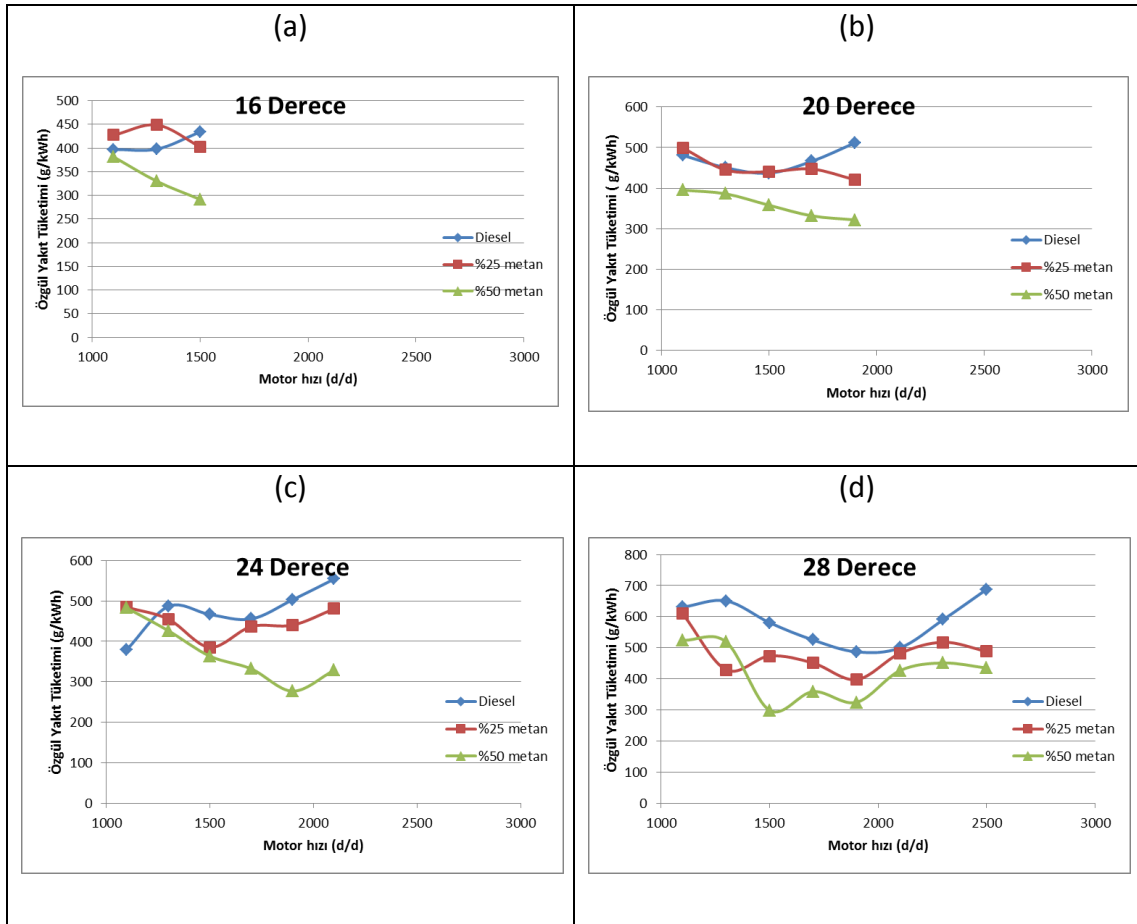
Şekil 4. 97 Farklı püskürtme avanslarında motor torku karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
(b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
(c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi
(d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun tork karakteristiği eğrisi



Şekil 4. 98 Farklı püskürtme avanslarında termik verim karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun termik verim eğrisi



Şekil 4. 99 Farklı püskürtme avanslarında özgül yakıt tüketimi karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun özgül yakıt tüketimi eğrisi

Şekil 4.100'de, metan ilavesi ile özellikle düşük motor hızlarında ve düşük püskürtme avanslarında karbon monoksit emisyonlarında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Maksimum CO emisyonu artışı, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %88,7 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %82,5 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %268,1 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %262,6 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %200,8 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %311,3 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız

motorin yakıtına göre %41,5 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,5 artış meydana geldiği bulunmuştur.

CO formasyonu yanmamış gaz yakıt ulaşılabilirliği, karışım teşkili, yakıt dekompozisyonu ve oksidasyonuna bağlı olarak açığa çıkar. Düşük yüklerde dolgu sıcaklığının düşüklüğü veya aşırı fakir karışımın oluşması yanma verimini olumsuz olarak etkilediği için, CO emisyonları artmaktadır [70].

Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, motor yükü arttıkça CO emisyonu azalmaktadır, ama yine de dizel-gaz yakıt (doğalgaz) kullanımında açığa çıkan CO miktarı, sadece dizel kullanıldığı durumlara göre çok yüksektir. Özellikle düşük yüklerde, sıcaklık çok artmadığı için efektif yanma sağlanamamakta ve emisyon artmaktadır.

Şekil 4.101'da ise karbondioksit miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, karbondioksit miktarında metan ilavesi ile farklı motor devir ve farklı motorin püskürtme avansında azalma görülmektedir.

Gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

Şekil 4.102'de ise hidrokarbon miktarları verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, metan ilavesi ile düşük devir ve düşük püskürtme avansında hidrokarbon miktarında düşüş görülmektedir.

Kullanılan metanın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından ve supap bindirmesi esnasında bir kısmının dışarı kaçmasından dolayı tam yanma gerçekleşmemektedir. Bu nedenle HC emisyonlarında ciddi oranda artış görülmektedir. [74] Fakir karışım da alev sönme bölgeleri arttığı için özellikle silindir cidarlarına temas eden bölgelerde eksik yanma meydana gelmekte ve bu da HC emisyonlarını arttırmaktadır. Küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle yanması zorlaştığı için HC emisyonu artmaktadır [74].

Şekil 4.103'de ise NO_x emisyonları verilmiştir. Maksimum NO_x emisyonu değişimi, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız

motorin yakıtına göre %37,6 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %176,1 artış meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26,7 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %264,7 artış meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %22,6 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %418,2 artış meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %28,2 artış meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %267,7 artış meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre %50 metan ilaveli çift yakıt şartında, NO_x değerleri hem yalnız motorin, hem de %25 metan ilaveli çift yakıt şartında, NO_x değerlerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

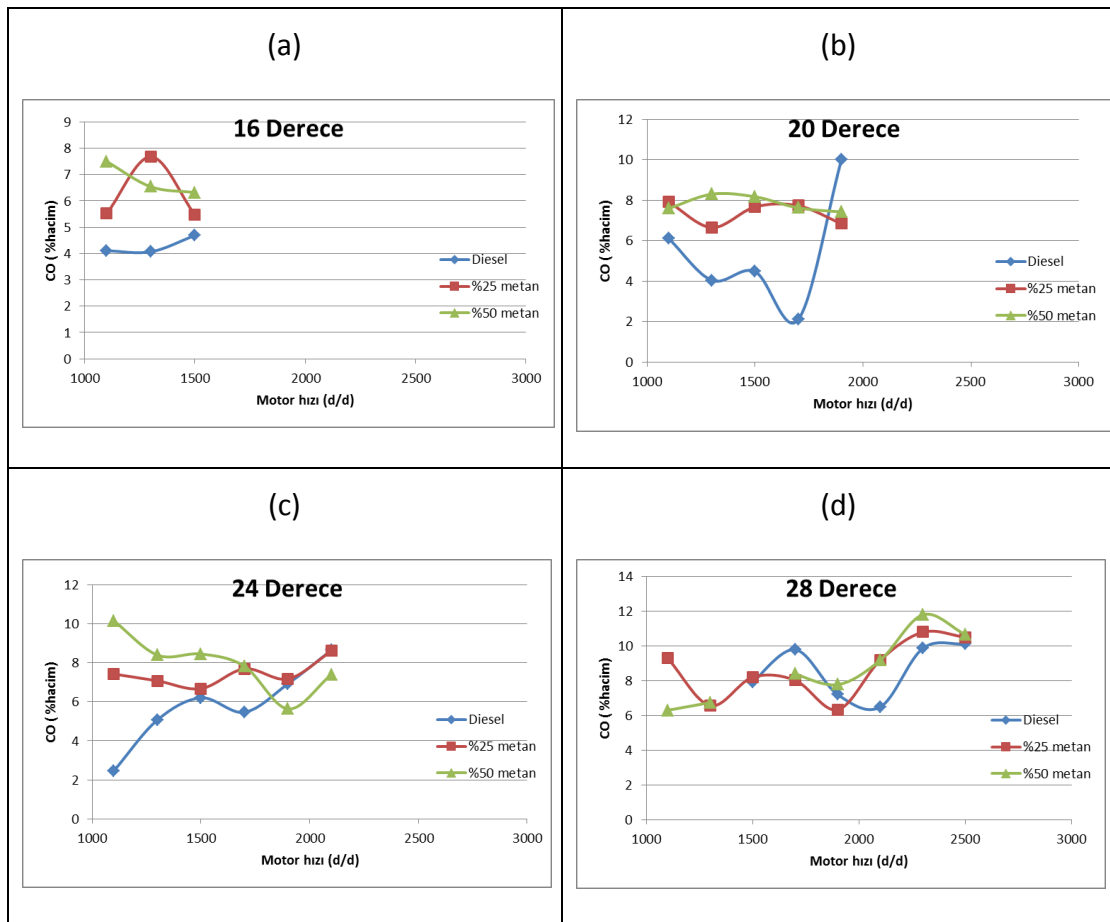
Gaz yakıt ilavesiyle, artan alev sıcaklığından dolayı ise NO formasyonu yükselmektedir. Yalnızca metan karışimli gaz yakıt kullanımında motorine göre yüksek alev sıcaklığı nedeniyle daha fazla NO oluşmaktadır. NO formasyonu hava fazlalık katsayısına bağlı değişim göstermektedir. Özellikle stokiyometrik şartlarda en yüksek NO değeri oluşmaktadır. Ancak, dizel motorlar fakir yakıtla çalıştığı için emisyon sonuçları yine hava fazlalık katsayısına bağlı değişmektedir [68].

Şekil 4.104'de ise is emisyon değerleri verilmiştir. Maksimum is emisyonu düşüşü, 16° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %16 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %41,7 düşüş meydana geldiği; 20° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %14,1 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %76,9 düşüş meydana geldiği; 24° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %12 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %51,2 düşüş meydana geldiği; 28° püskürtme avansında; %25 metan ilaveli şartta, 1500 d/d motor hızında yalnız

motorin yakıtına göre %23,6 düşüş meydana geldiği; %50 metan ilaveli şartta, 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %38,3 düşüş meydana geldiği bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre metan ilavesi ile genelde is değerlerinde düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir.

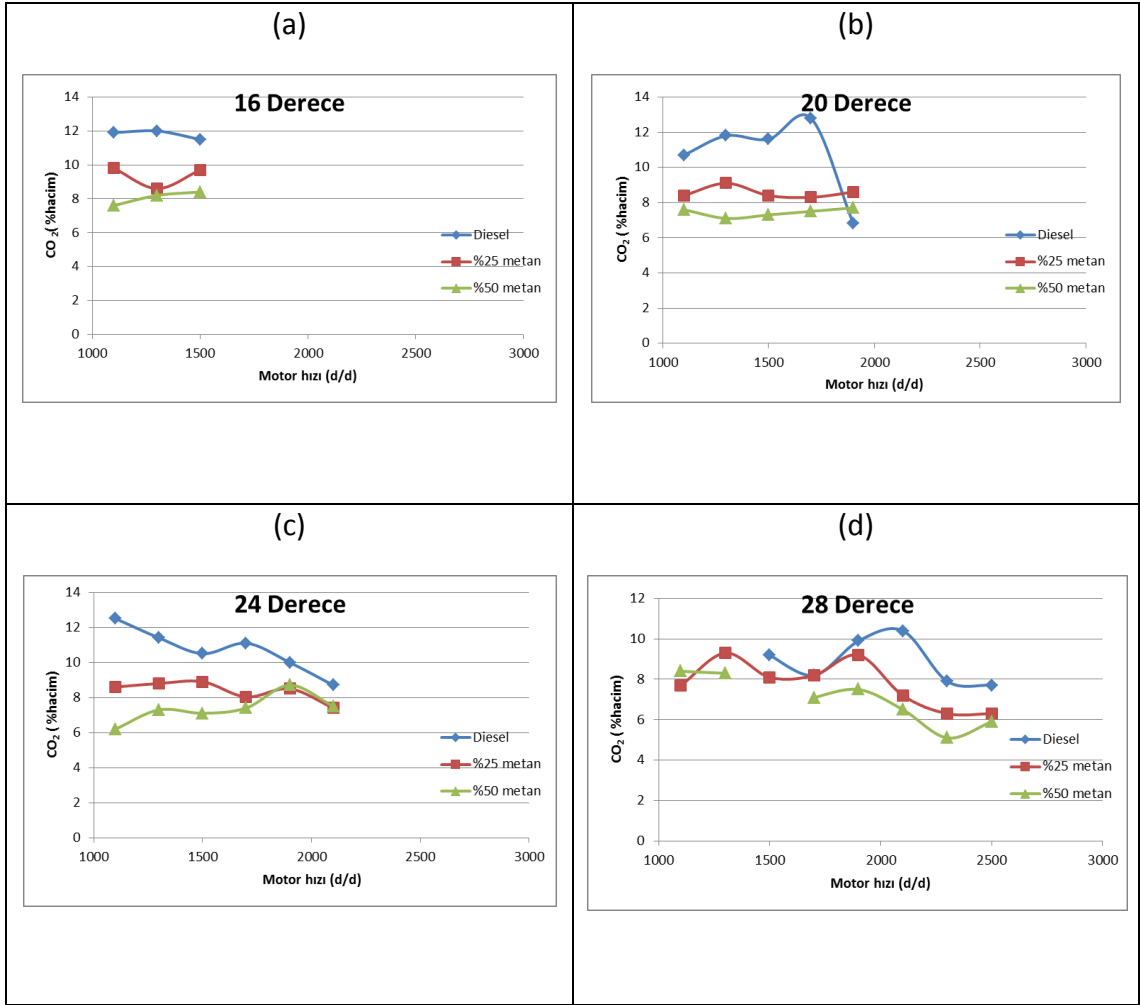
Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH₄'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH₄ miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].

Şekil 4.103'te görüldüğü gibi, metan ilavesi ile egzoz çıkış sıcaklığında tüm devirlerde ve tüm püskürtme avanslarında metan kullanımı ile yalnız motorin şartına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.



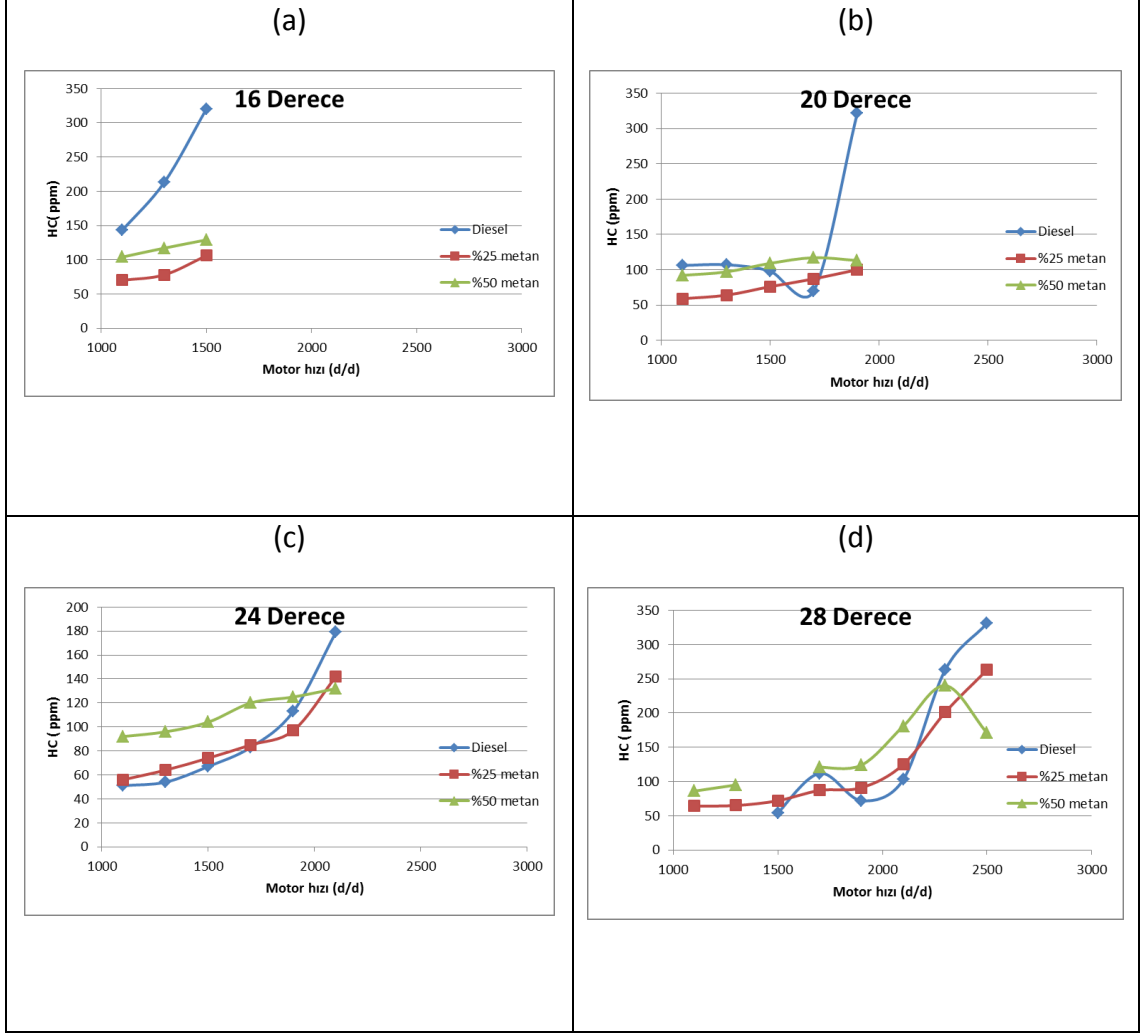
Şekil 4. 100 Farklı püskürtme avanslarında CO emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
(b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
(c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi
(d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO emisyonu eğrisi



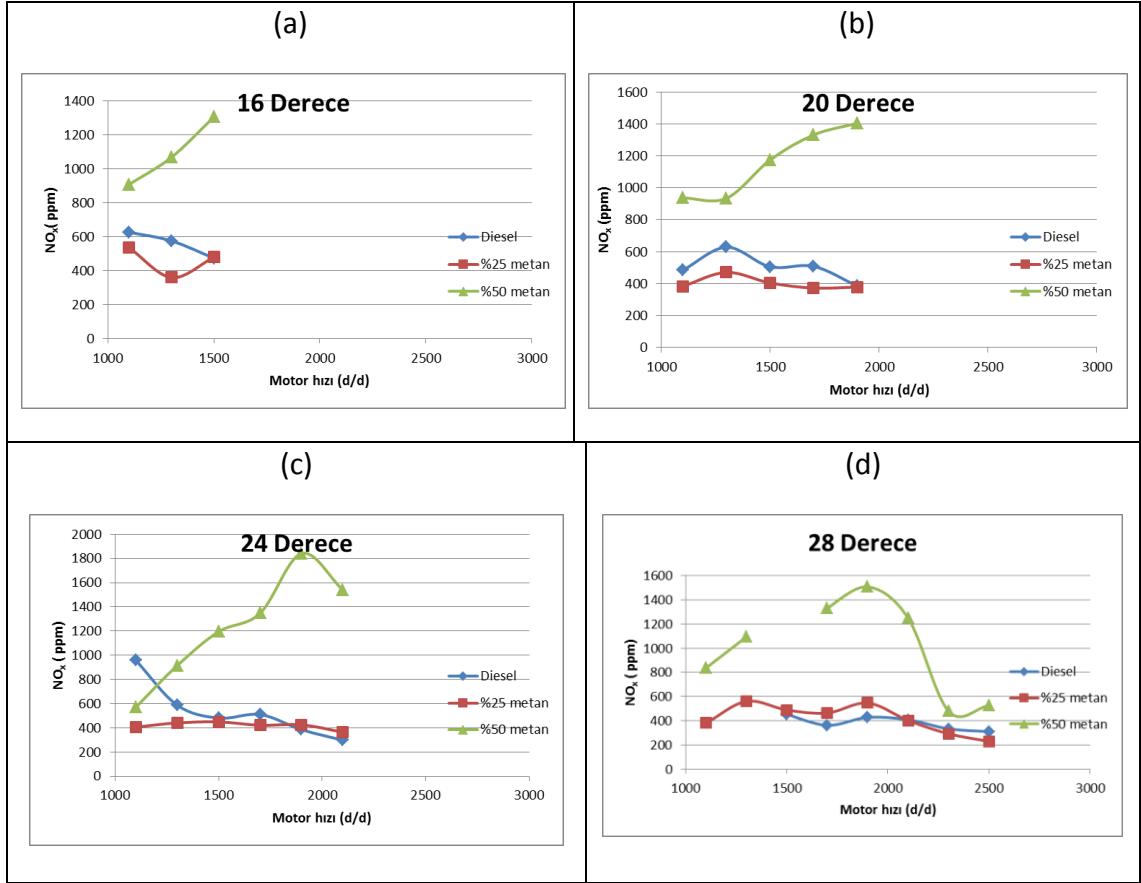
Şekil 4. 101 Farklı püskürtme avanslarında CO2 emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
(b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
(c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi
(d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun CO2 emisyonu eğrisi

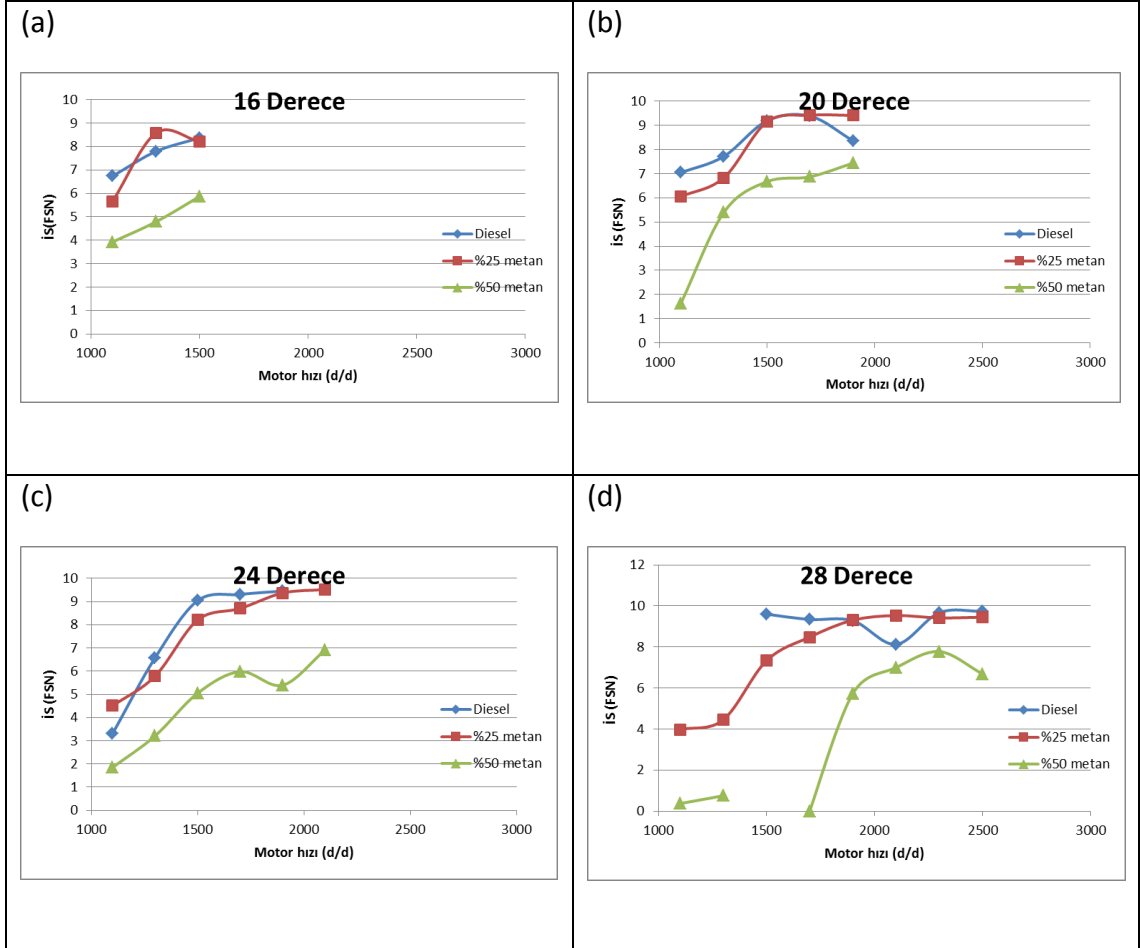


Şekil 4. 102 Farklı püskürtme avanslarında HC emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun HC emisyonu eğrisi

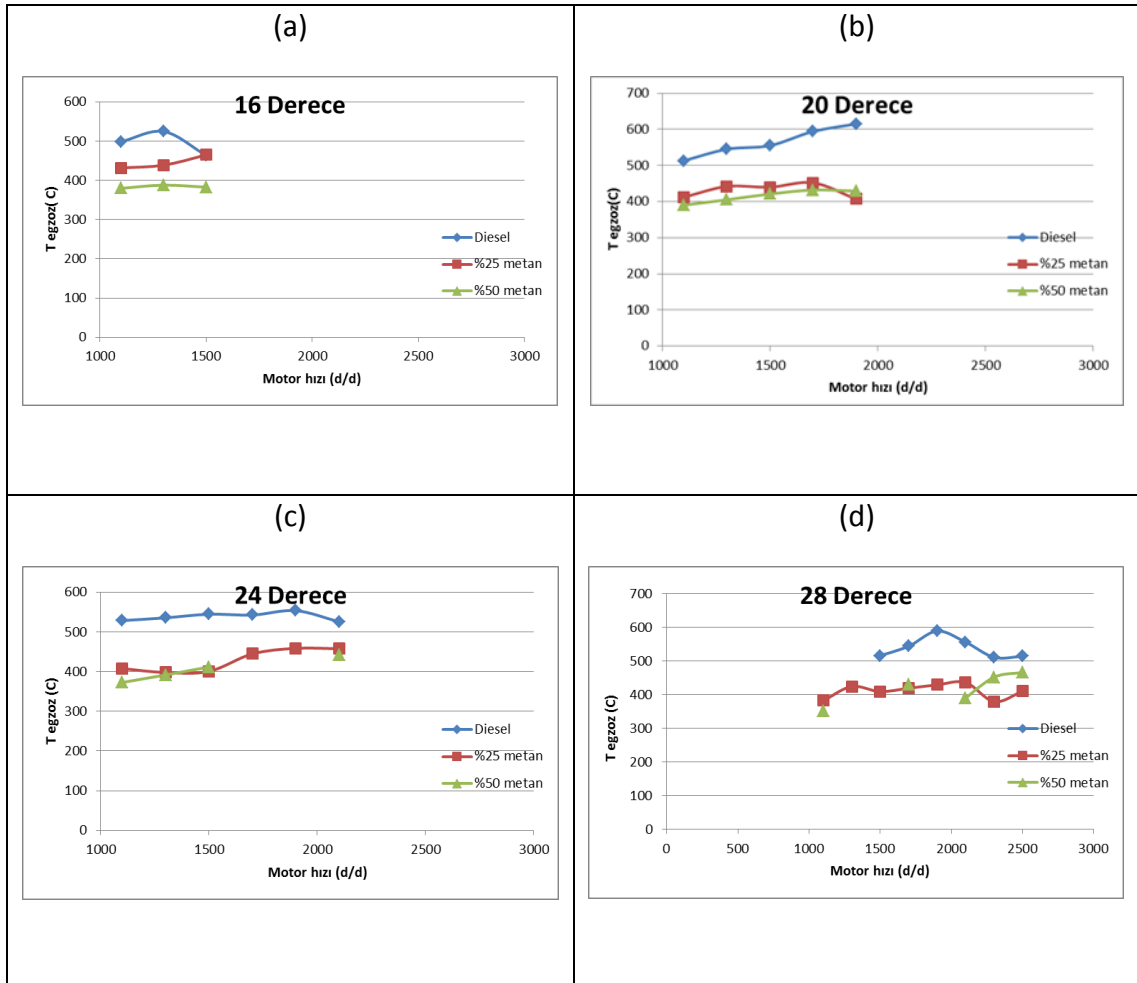


Şekil 4. 103 Farklı püskürtme avanslarında NOx emisyonu karakteristiği
(a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
(b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
(c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi
(d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun NOx emisyonu eğrisi



Şekil 4. 104 Farklı püskürtme avanslarında is emisyonu karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun is emisyonu eğrisi

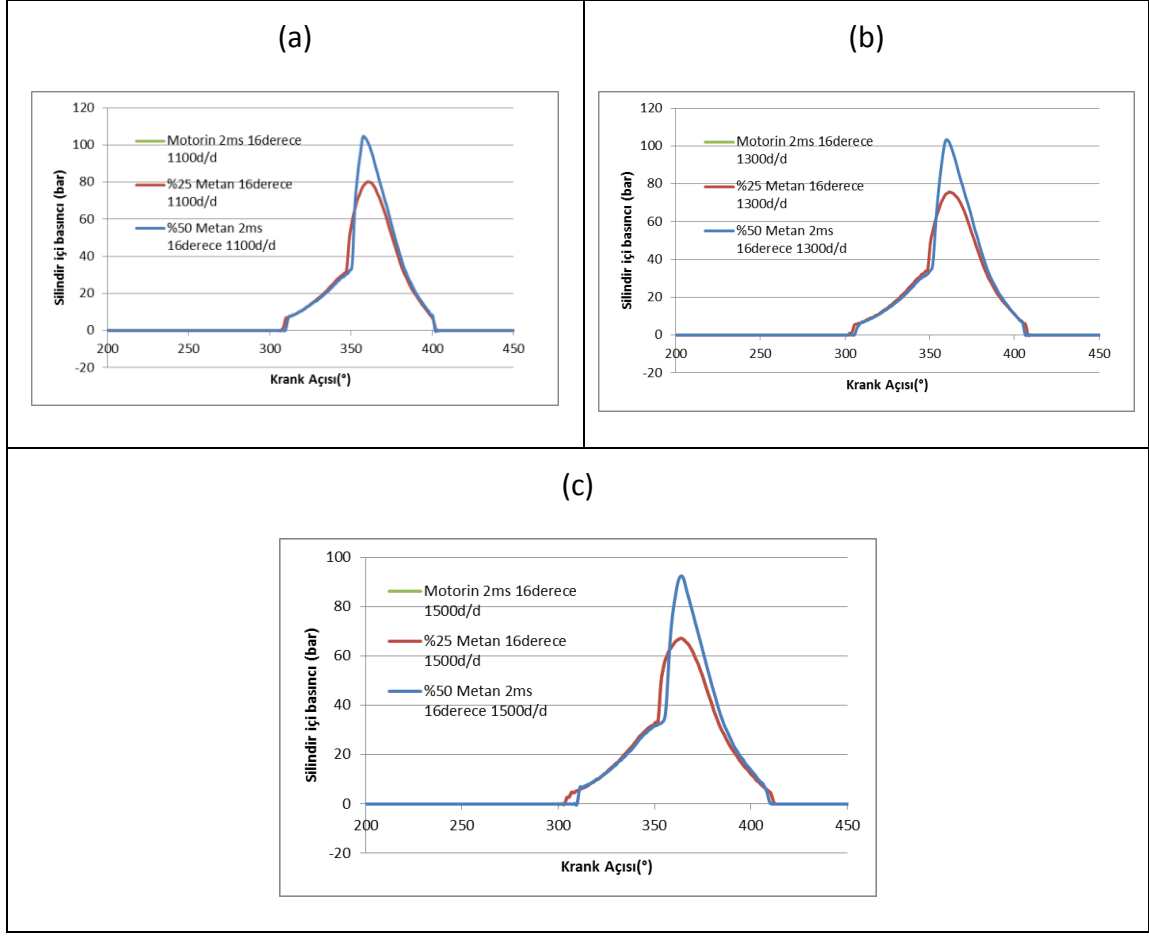


Şekil 4. 105 Farklı püskürtme avanslarında egzoz gaz sıcaklığı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun egzoz sıcaklığı eğrisi

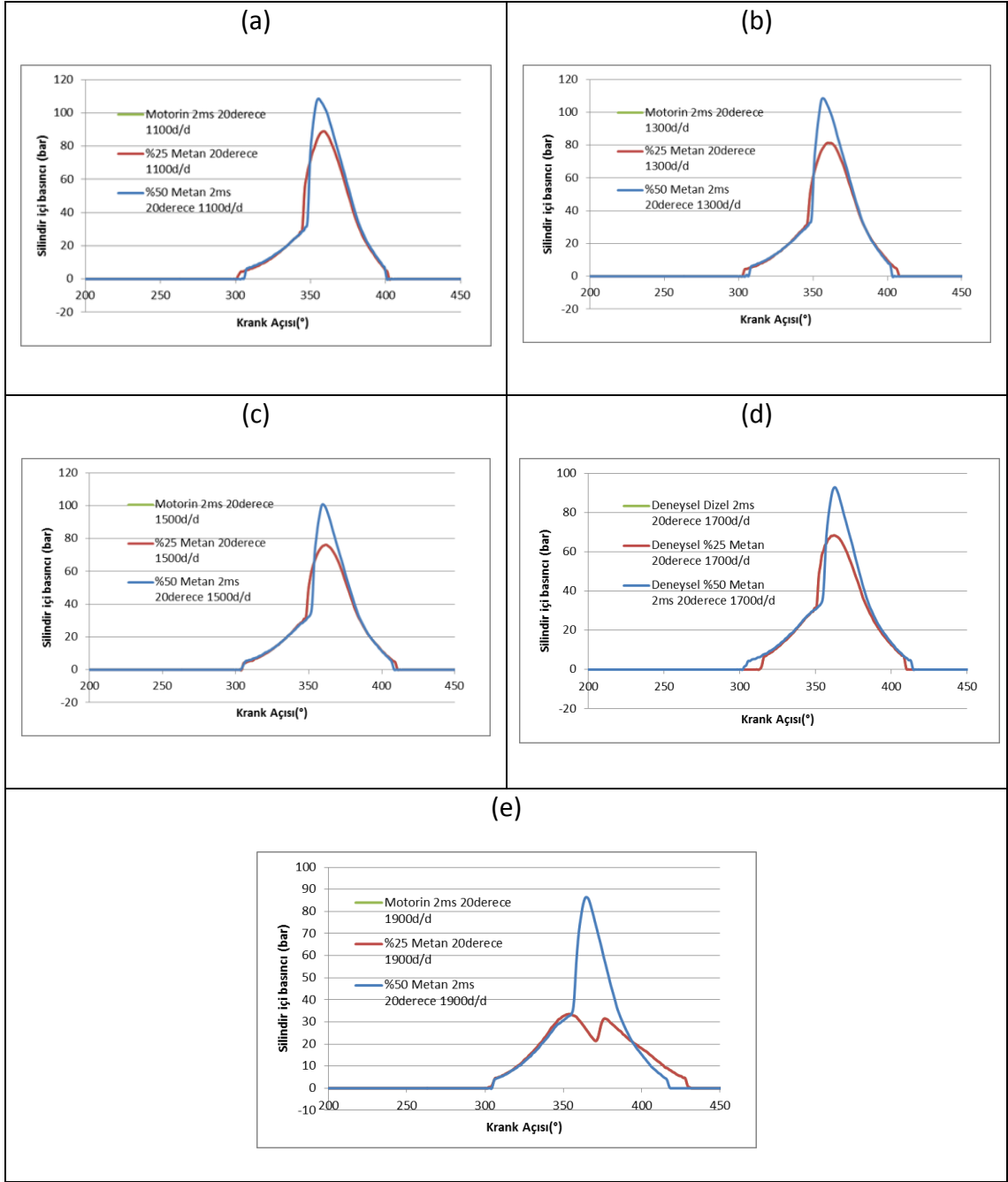
Şekil 4.106 ila 109 arasında görüleceği üzere 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, metan ilaveli çift yakıt şartında, silindir içi gaz basıncının yalnız motorin silindir içi gaz basıncına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Gaz yakıt olarak kullanılan CH_4 oranı arttıkça tutuşma gecikmesi artmaktadır. CH_4 'ün düşük setan sayısına sahip olması bu durumu açıklamaktadır. Dolayısıyla, CH_4 oranı arttıkça pik basınç artmakta ve ısı açığa çıkış oranı yükselmektedir. İçeri alınan gazın artmasıyla birlikte ve gazın çok hızlı yanmasından kaynaklanan ani basınç ve sıcaklık artışı ortaya çıkmaktadır. Gaz yakıt ön karışımli olarak kontrolsüz yanma fazında hazır olarak bulunduğu ve yanmanın başlamasıyla hızlı bir şekilde yandığından pik silindir için basıncı ve pik ısı açığa çıkış oranı artmaktadır [75].



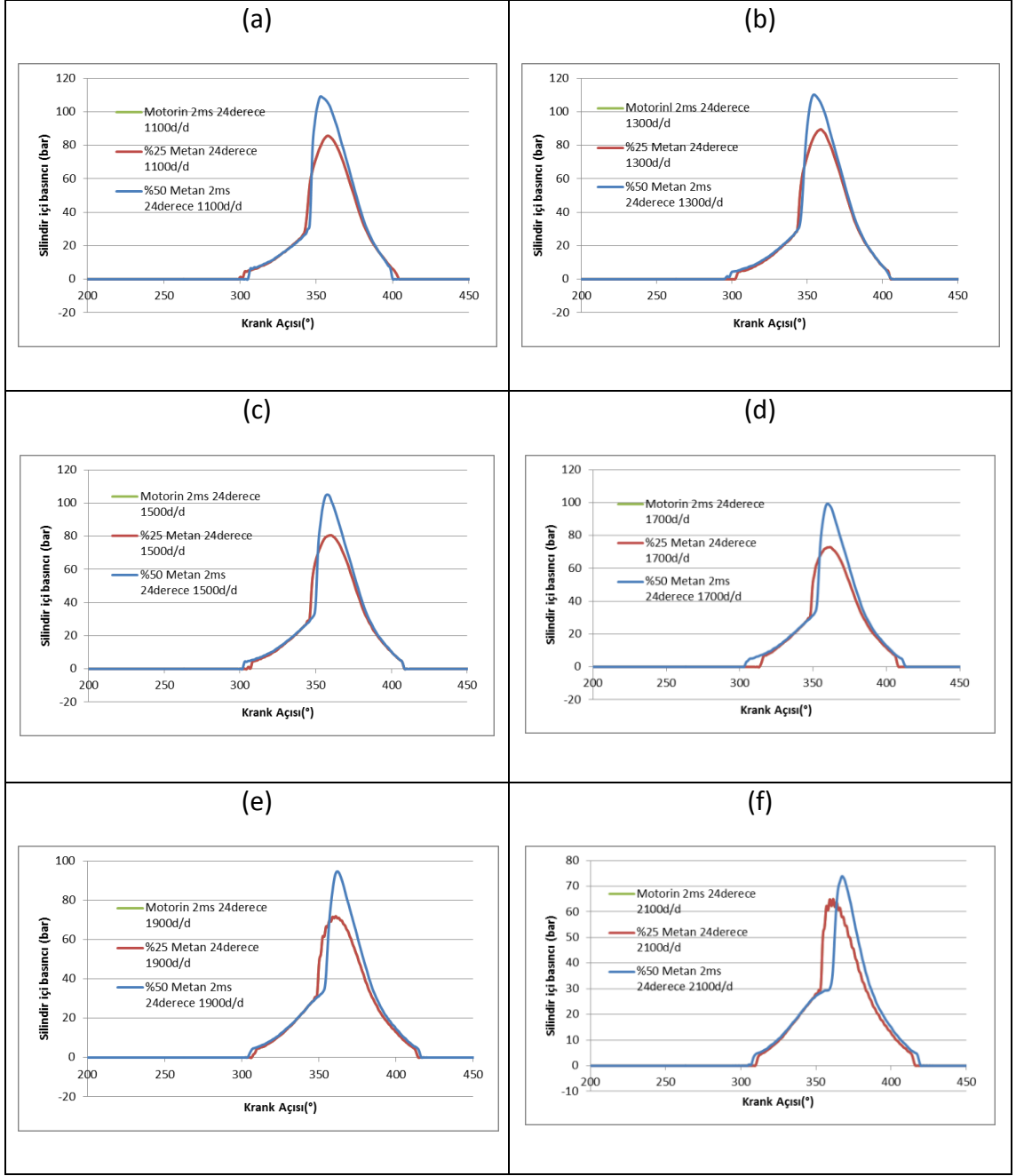
Şekil 4. 106 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



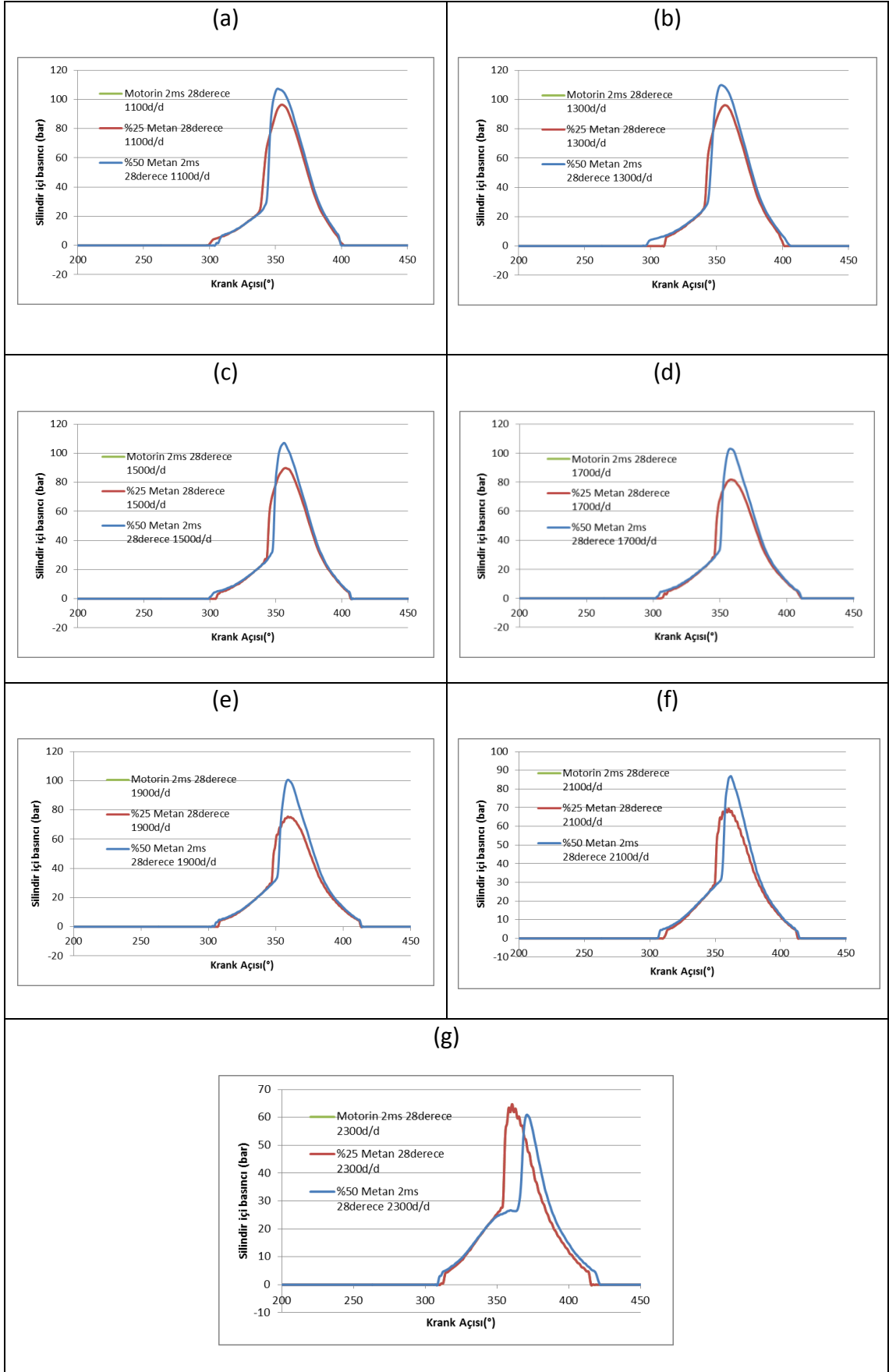
Şekil 4. 107 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi



Şekil 4. 108 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

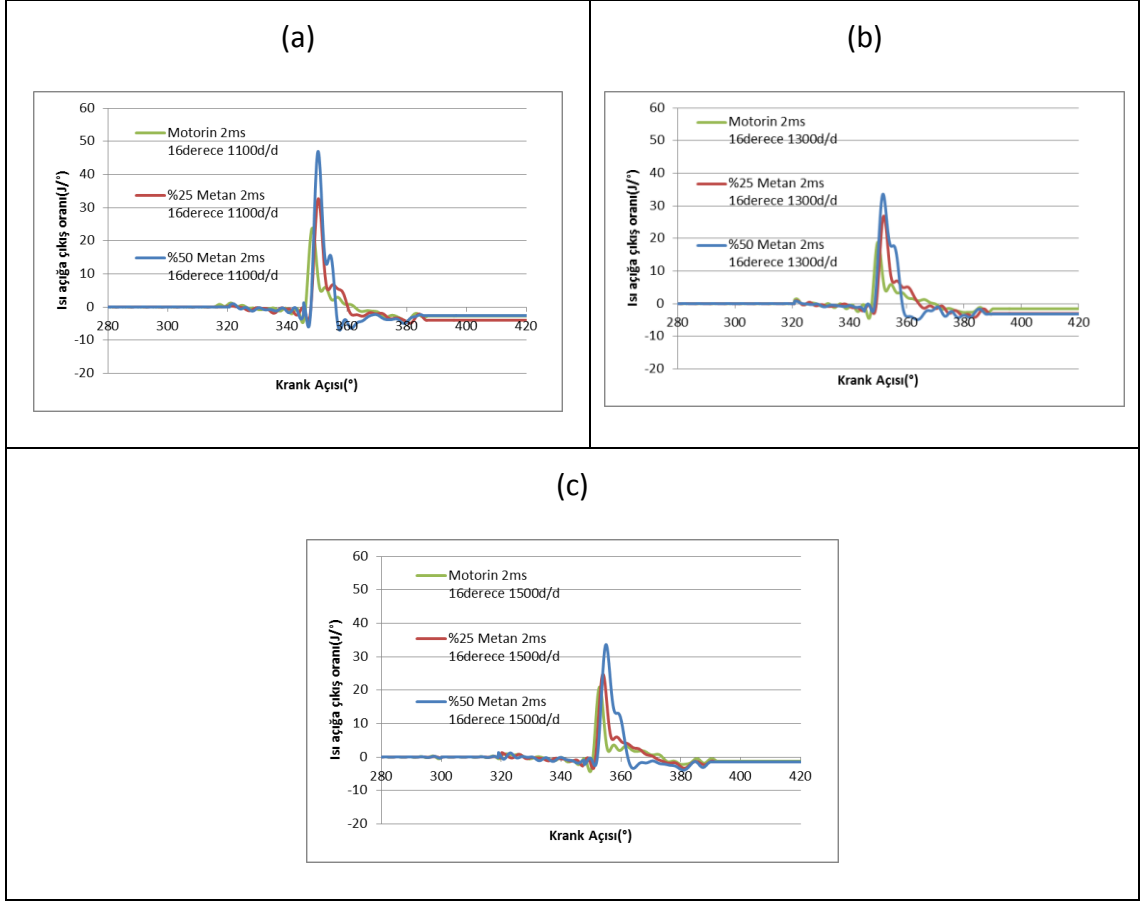


Şekil 4. 109 Farklı püskürtme avanslarında silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basınç eğrisi

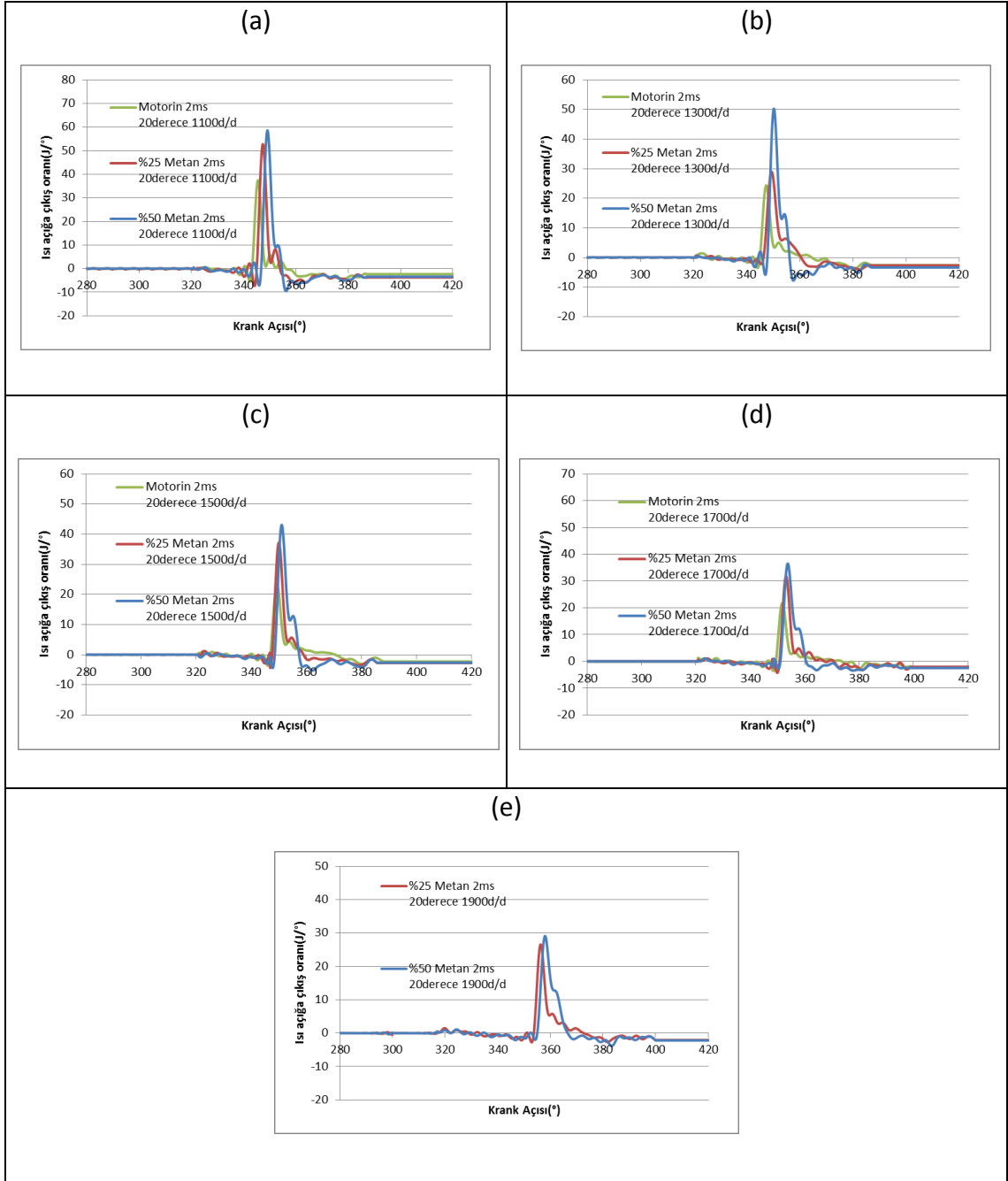
Şekil 4.110 ila 113 arasında görüleceği üzere, 16-20-24 ve 28 derece motorin püskürtme avanslarında, metan ilaveli çift yakıt şartında, maksimum ısı açığa çıkış oranının yalnız motorin ısı açığa çıkış oranına göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Gaz yakıt/hava karışımı olan dolgunun dizel gönderilmesiyle yanma merkezinde tutuşarak alev cephesinin ilerlemesini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69].



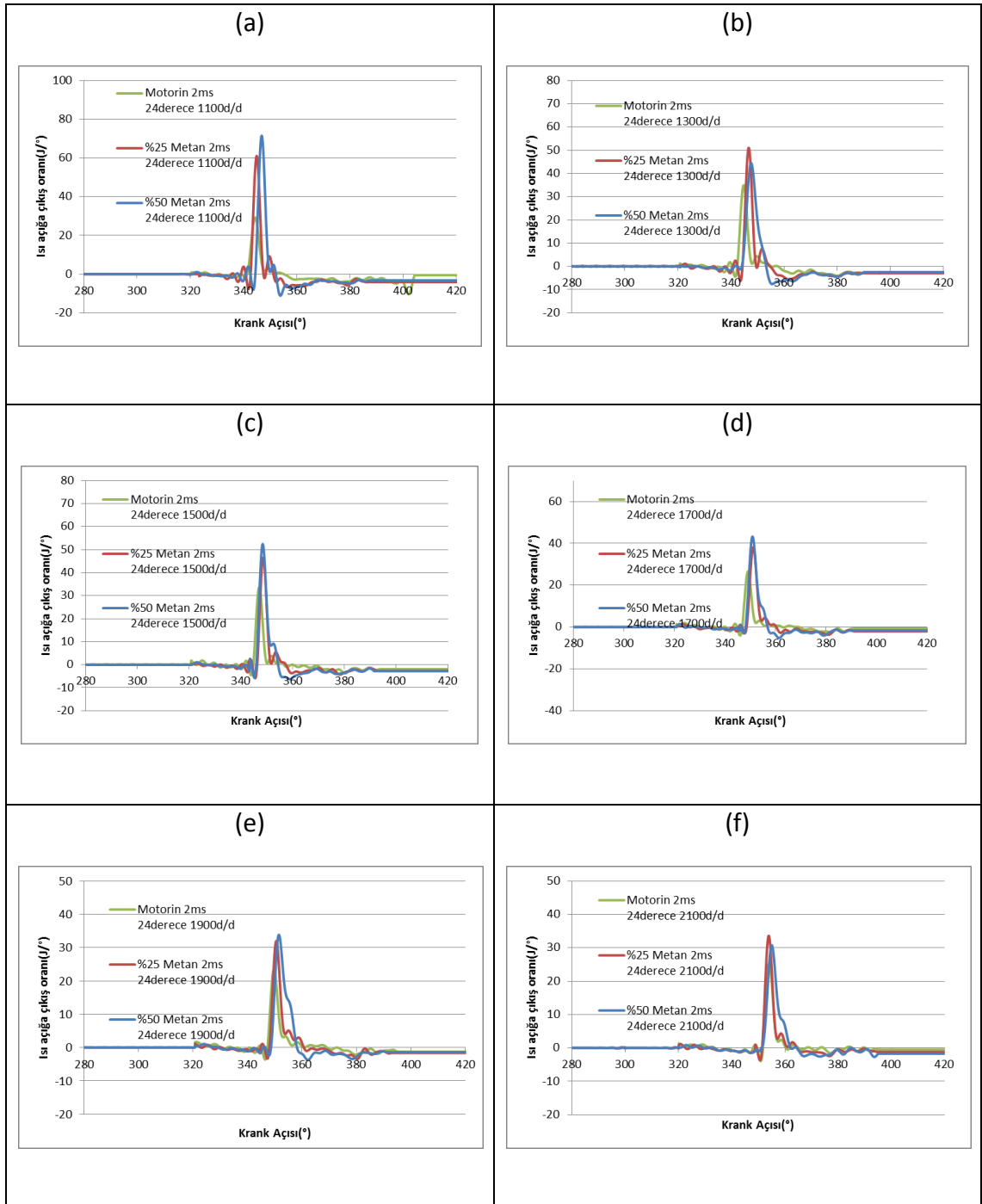
Şekil 4. 110 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 16° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



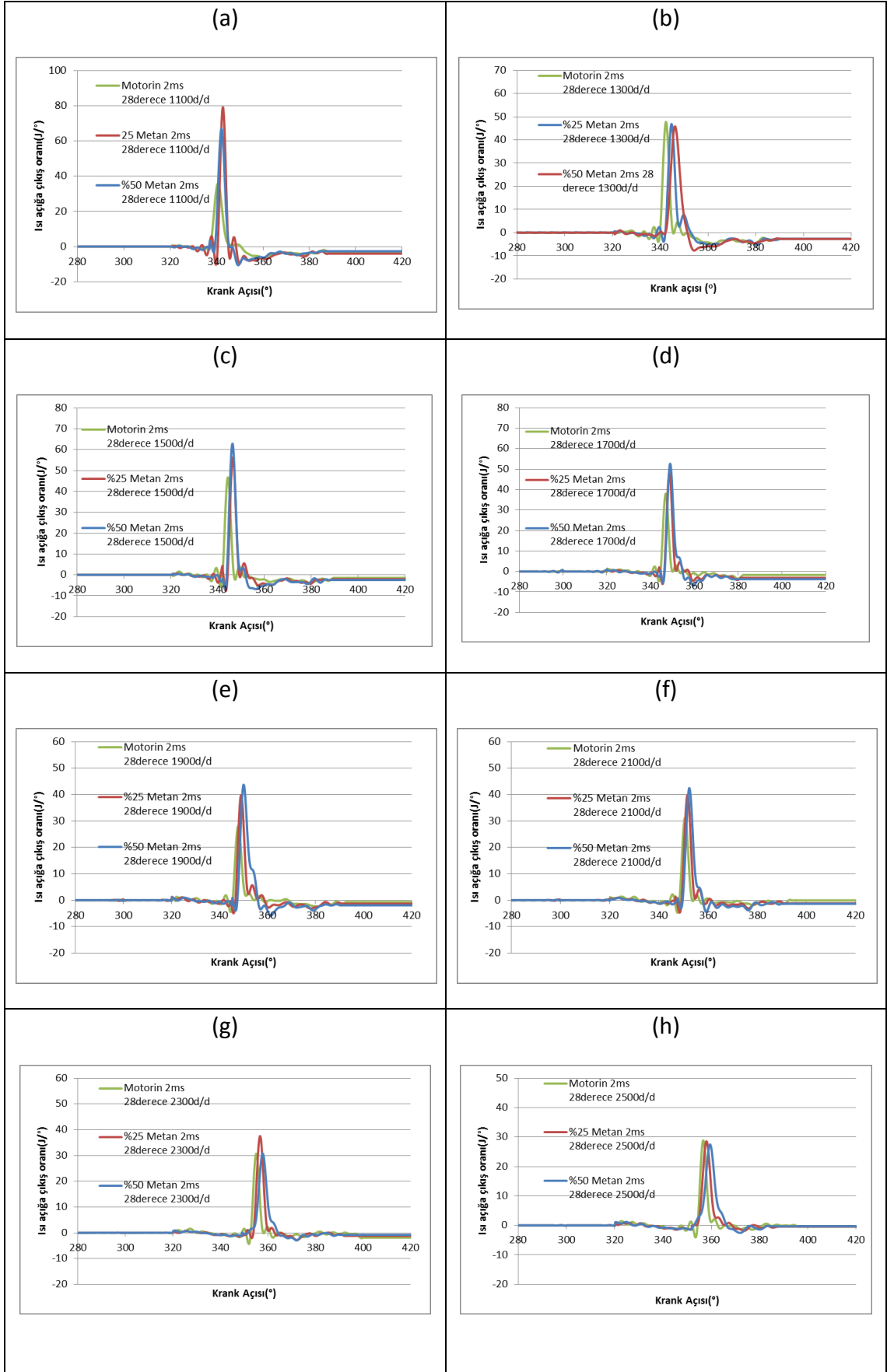
Şekil 4. 111 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 20° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi,



Şekil 4. 112 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 24° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi



Şekil 4. 113 Farklı püskürtme avanslarında ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi,
- (h) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, metan-motorin çift yakıtlı çalışma şartında, yalnız motorin yakıtına göre motor gücünde artış meydana geldiği, termik verimde genel olarak bir miktar düşüş meydana geldiği; is emisyonlarında artan metan miktarı ile ciddi miktarda iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. NOx emisyonları ise, metan ilavesi ile genel olarak tüm çalışma şartlarında artmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Motor gücü değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,14 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 10,9 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 12,76 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,15 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 13,9 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 14,4 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 15,5 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 16,8 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 17,2 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,94 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 14,2 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 13,89 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 15,4 kW değerine ulaştığı görülmüştür.
- Motor gücü değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 10,87 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 12,45 kW değerine ulaştığı; 16° püskürtme

avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 13,1 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 15,71 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 8,16 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 9,95 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 10,14 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 13,6 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 14,99 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 15,1 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 16,56 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 14,6 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 15,48 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 17,5 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 19,3 kW değerine ulaştığı görülmüştür.

- Motor gücü değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,7 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 10,46 kW değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 12,82 kW değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 14,24 kW değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 14,1 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 16,3 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 16,95 kW değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,71 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 11,75 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 11,4 kW değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,66 kW değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 8,43 kW, %50 doğalgaz ilaveli durumda 8,82 kW değerine ulaştığı görülmüştür.
- Termik verim değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %23,80 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %26,41 değerine ulaştığı; 16°

püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %26,81 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %29,07 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %20,87 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %23,64 değerine ulaştığı, 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %23 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %29,82 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %19,8 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %23,53 , %50 doğalgaz ilaveli durumda %27,83 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %18,19 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %24,72 , %50 doğalgaz ilaveli durumda %27,60 değerine ulaştığı görülmüştür.

- Termik verim değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %20,89 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %22,30 değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %25,01 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %29,13 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %14,93 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %20,09 , %50 doğalgaz ilaveli durumda %26,95 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %22,59 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %22,26 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %15,8 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %22,11 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %19,89 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %24,38 değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %17,17 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %24,83 değerine ulaştığı görülmüştür.

- Termik verim değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %19,52 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %21,04, %50 doğalgaz ilaveli durumda %29,07 değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %16,56 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %20,13, %50 doğalgaz ilaveli durumda %26,33 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %18,15 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %21,97 değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %16,84 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %30,57 değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %13,43 değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda %19,74 değerine ulaştığı, %28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında %17,4 değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda %26,11 değerine ulaştığı görülmüştür.
- NO_x değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 697 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 872 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1140 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1306 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 854 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1127 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 653 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1262 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 472 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 702 ppm değerine ulaştığı; ; 24° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 734 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1402 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 2700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 636 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli

durumda 956 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1239 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.

- NO_x değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 775 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 618 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 616 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1090 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 367 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 497 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1072 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 432 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 572 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1210 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 673 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 920 ppm değerine ulaştığı, 28° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 465 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1316 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.
- NO_x değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 575 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 359 ppm değerine ulaştığı; 16° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 473 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1306 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 508 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 372 ppm değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 385 ppm değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1404 ppm değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 297 ppm değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 364 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1539 ppm değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 362 ppm değerinde iken,

%25 doğalgaz ilaveli durumda 464 ppm, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1331 ppm değerine ulaştığı görülmüştür.

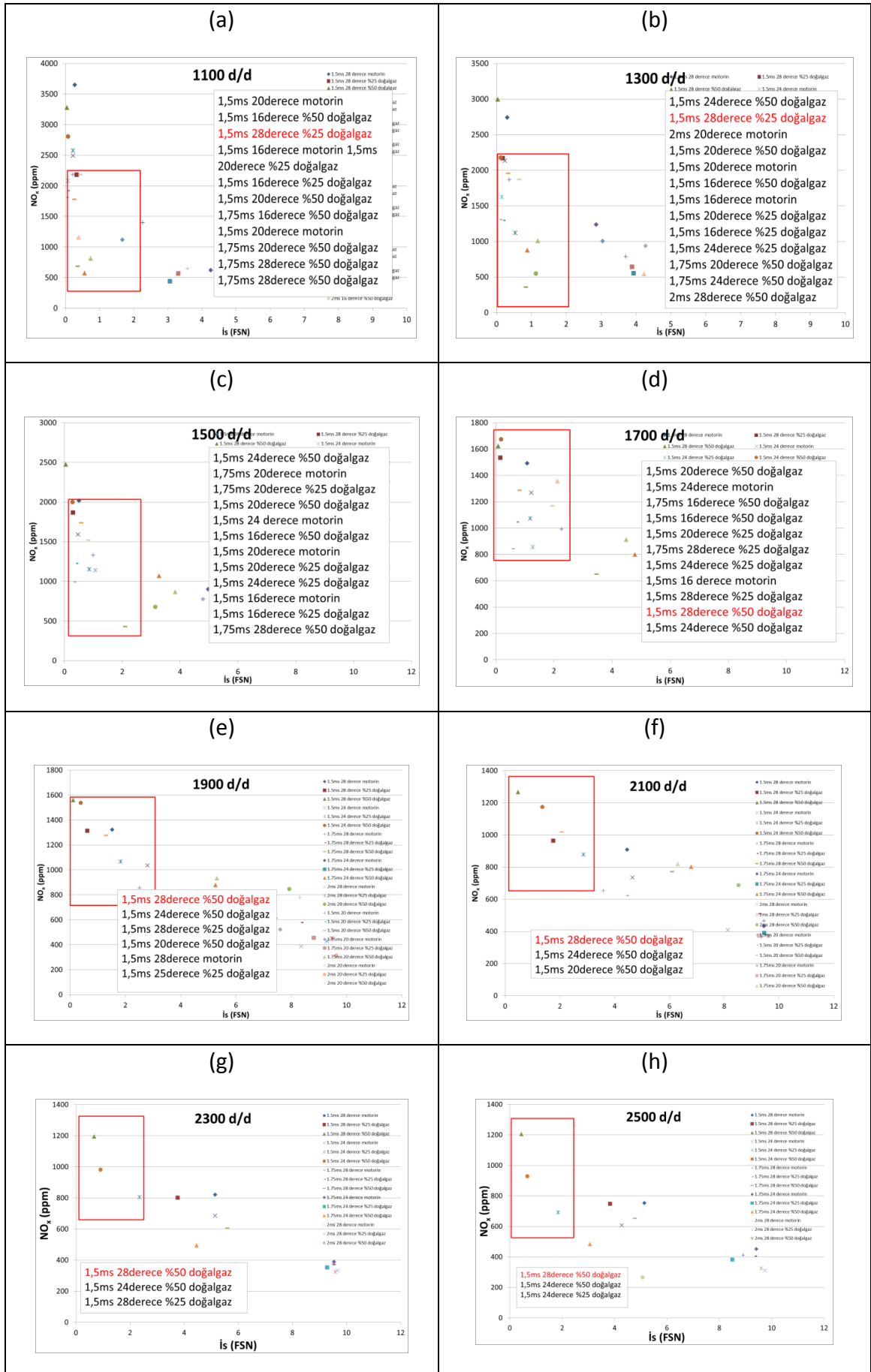
- İş değeri, 1.5ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 0,155 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,617 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 4,788 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1700d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,512 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,816 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,532 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 0,467 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,248 FSN değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,8 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,467 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 2100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 4,455 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1,37 FSN ,%50 doğalgaz ilaveli durumda 0,354 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.
- İş değeri, 1.75ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,039 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 1,81 FSN , %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,261 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 1,672 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 2,962 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,135 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 2500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,417 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 5,495 FSN değerine ulaştığı; 24° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 4,255 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,181 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 2,259 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 0,838 FSN değerine ulaştığı; 28° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında,

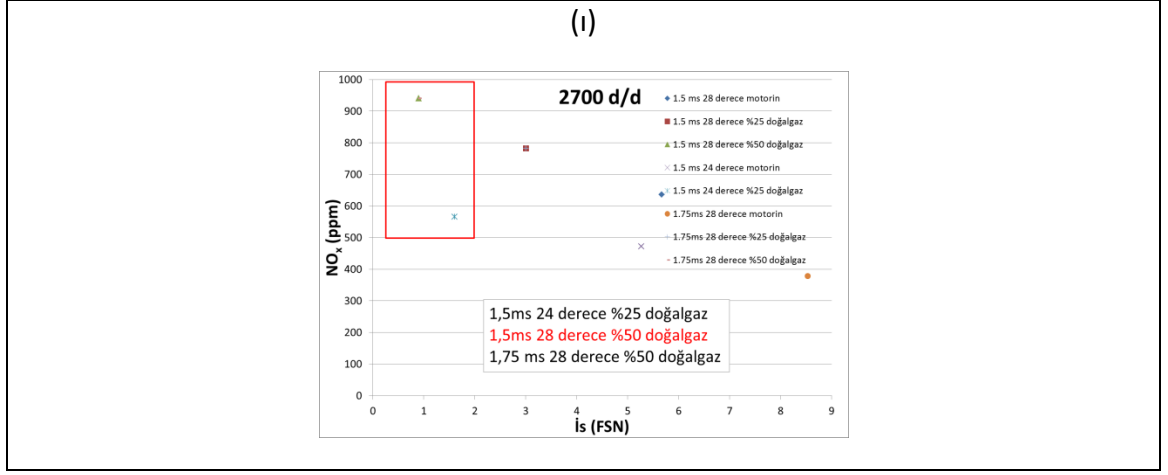
yalnız motorin kullanımında 5,213 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 0,329 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.

- İS değeri, 2ms yakıt püskürtme şartında, 16° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,741 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 5,662 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 3,931 FSN değerine ulaştığı; 20° püskürtme avansında, 1100d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 7,042 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 6,05 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 1,627 FSN değerine ulaştığı ; 24° püskürtme avansında, 1300d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 6,579 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 5,79 FSN, %50 doğalgaz ilaveli durumda 3,21 FSN değerine ulaştığı ; 28° püskürtme avansında, 1500d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,602 FSN değerinde iken, %25 doğalgaz ilaveli durumda 7,334 FSN , 28° püskürtme avansında, 1900d/d motor hızında, yalnız motorin kullanımında 9,284 FSN değerinde iken, %50 doğalgaz ilaveli durumda 5,734 FSN değerine ulaştığı görülmüştür.

4.1.6.4 NO_x-İS Açısından ve Termik Verim-Güç Açısından En İyi Sonuçların Belirlenmesi

Aşağıda görüleceği üzere, 1100 d/d ile 2700 d/d arasındaki farklı motor hızlarında, farklı doğalgaz enerji içeriklerinde (%0, %25 ve %50 doğalgaz), farklı püskürtme avanslarında (16, 20, 24 ve 28°) ve farklı püskürtme sürelerindeki (1.5ms, 1.75ms ve 2ms) NO_x ve İS sonuçları açısından elde edilen sonuçlardan en uygun olanları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, NO_x açısından 2200 ppm değerinin aşılmadığı sonuçlar belirlenirken, İS açısından 2 FSN değerinin aşılmadığı sonuçlar belirlenmiştir.

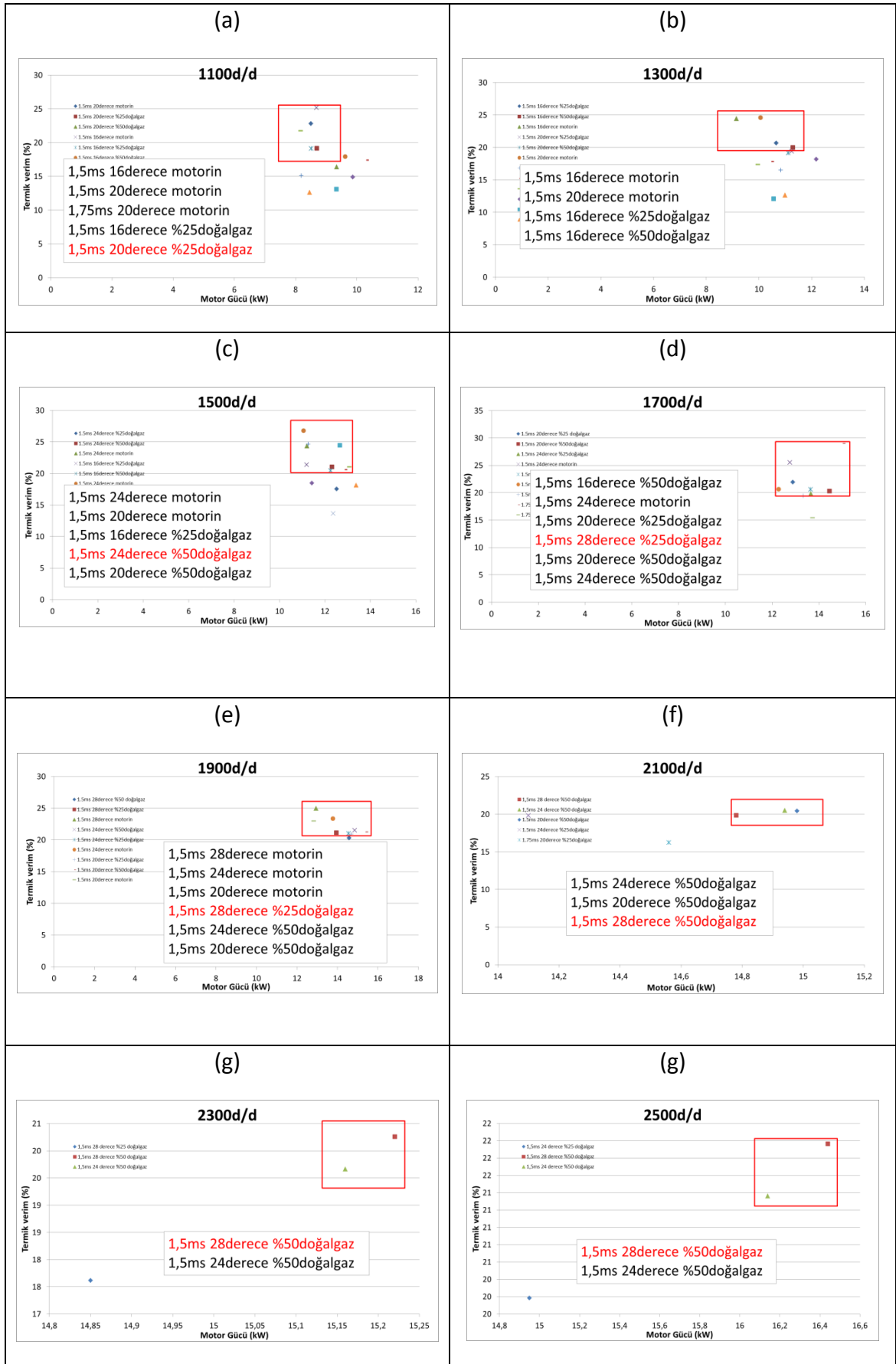


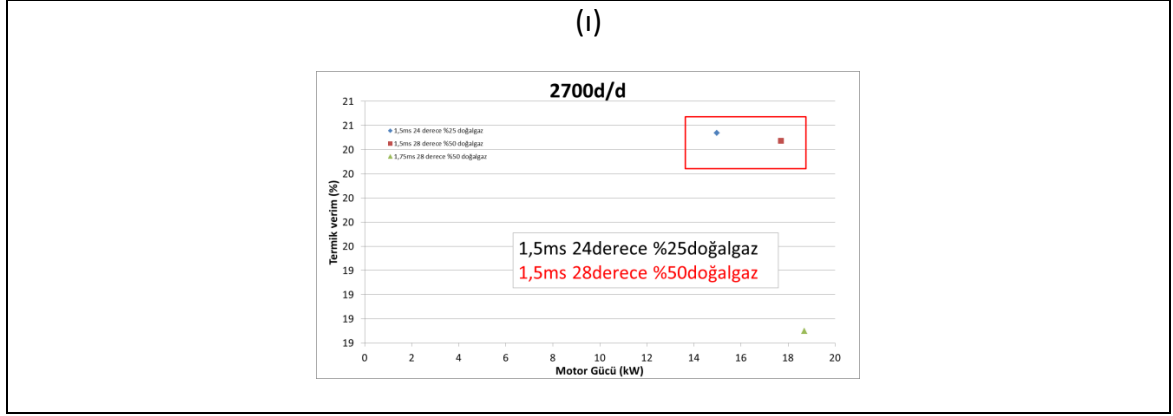


Sekil 4. 114 Farklı motor hızlarında ve motor çalışma şartlarında NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler

- (a) 1100d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (b) 1300d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (c) 1500d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (d) 1700d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (e) 1900d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (f) 2100d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (g) 2300d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (h) 2500d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler
- (i) 2700d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, NO_x ve is emisyonları açısından elde edilen değerler

Her devir için, NO_x ve is açısından belirlenen çalışma koşulları, aşağıda görüleceği üzere güç ve termik verim açısından yeniden incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, mümkün olduğunca termik verim açısından en yüksek değerler alınmaya çalışılmıştır. Diğer taraftan, güç açısından da ciddi bir düşüş meydana gelmeyecek çalışma şartları belirlenmeye çalışılmıştır.





Sekil 4. 115 Farklı motor hızlarında ve motor çalışma şartlarında termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler

- (a) 1100d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (b) 1300d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (c) 1500d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (d) 1700d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (e) 1900d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (f) 2100d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (g) 2300d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (h) 2500d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler
- (i) 2700d/d motor hızında, farklı motor çalışma şartlarında, termik verim ve güç değerleri açısından elde edilen değerler.

Elde edilen sonuçlardan, hem is ve NO_x emisyonları açısından, hem de termik verim ve güç parametreleri açısından, farklı motor hızlarının genelinde, 1.5ms püskürtme süresi, 28 derece püskürtme avansı ve %50 doğalgaz enerji içeriği en uygun çalışma parametresi olarak belirlenmiştir.

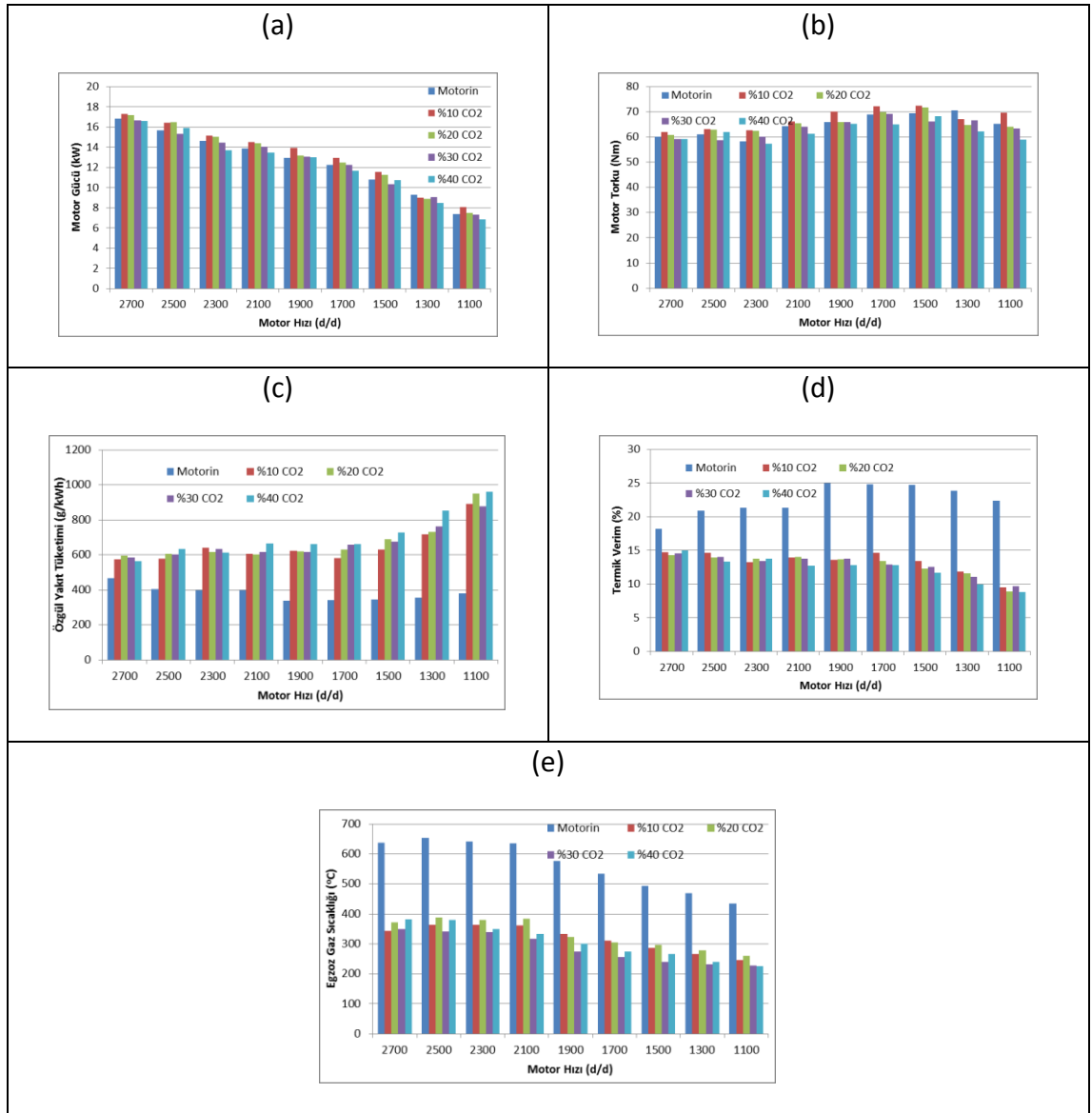
4.1.6.5 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Biyogaz (%25 enerji)- Motorin Sonuçları

Şekil 4.112’da biyogaz – motorin ve yalnız motorin şartı için grafikler verilmiştir. Motor gücü %10 ve %20 CO₂ içeriğine sahip biyogaz ilavesinde (sırasıyla hacimsel olarak %90 ve %80 metan) artış gösterirken, %30 ve %40 CO₂ içeriğine sahip biyogazda (sırasıyla %70 ve %60 metan) düşüş göstermiştir. Motor torku değeri ise özellikle yüksek motor devirlerinde CO₂ katkılı yakıtlarda yalnız motorin yakıtına göre artış göstermiştir. Özgül

yakıt tüketimi ise CO₂ oranı artışı ile tüm devir şartlarında artış göstermiştir. Termik verim ise CO₂ ilavesi ile düşüş göstermiştir.

Çift yakıt kullanıldığında dizele göre daha düşük termik verim elde edilmektedir. Nedeni, kalorifik değerin kullanılan gaz yakıtta daha düşük olması olarak gösterilmektedir. Art gazlar, yanmayan gaz yakıt, düşük yanma sıcaklığı ve düşük alev ilerleme hızı termik verimin düşmesine sebep olmaktadır [73].

Shan vd. [66] yapmış olduğu çalışmada, EGR oranı arttıkça termik verimin azaldığı görülmektedir. CO₂ gazı da inert gaz olduğu ve silindir içini seyreltici etkisi olduğu göz önünde bulundurulursa, elde edilen sonuçların benzer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 116 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde motor performans karakteristiği

- (a) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında motor gücü grafiği
- (b) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında motor torku grafiği
- (c) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi grafiği
- (d) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında termik verim grafiği
- (e) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı grafiği

Emisyon grafikleri Şekil 4.116'da verilmiştir. Karbon monoksit emisyonu miktarı, CO₂ ilavesi ile yalnız motorin yakıtına göre bazı devirlerde artış gösterirken, bazı devirlerde düşüş göstermiştir. Özellikle yüksek devir şartlarında, yalnız motorin şartlarına göre azalma göstermiştir.

Gaz yakıt oranı arttıkça, havayla daha homojen şekilde karışan gaz yakıt, yanma odasına daha iyi ve homojen şekilde dağılmaktadır. Bu sayede oksitlenme daha verimli şekilde gerçekleştiğinden CO emisyonu azalmaktadır [75]. Diğer taraftan, CO metanın eksik yanmasından dolayı açığa çıkan ara ürünlerden birisidir. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak alev hızının değişkenlik göstermesi ve fakir karışımda düşmesi, eksik yanma sonucu açığa çıkan CO emisyonlarının artışıyla açıklamaktadır [68].

Hidrokarbon miktarında ise düşük devirlerde CO₂ ilaveli yakıtla çalışma şartında açığa çıkan hidrokarbon emisyonu miktarı, yalnız motorin miktarının çok üstünde değerlere sahiptir.

Biyogazın ilave yakıt olarak kullanıldığında silindir içinden kaçan gaz yakıt ve yağlama yağının yanmasından dolayı HC emisyonları oluşmaktadır. Biyogazın içeriğindeki CO₂ etkisiyle silindir içi sıcaklıklar olumsuz etkilenmektedir. Kullanılan gaz yakıtın artışıyla volümetrik verimin düşmesi ve lokal oksijen oranının azalması sebebiyle daha zengin karışım oluşmaktadır. Bu nedenle lokal yanma bölgelerinde HC miktarı artmaktadır [67].

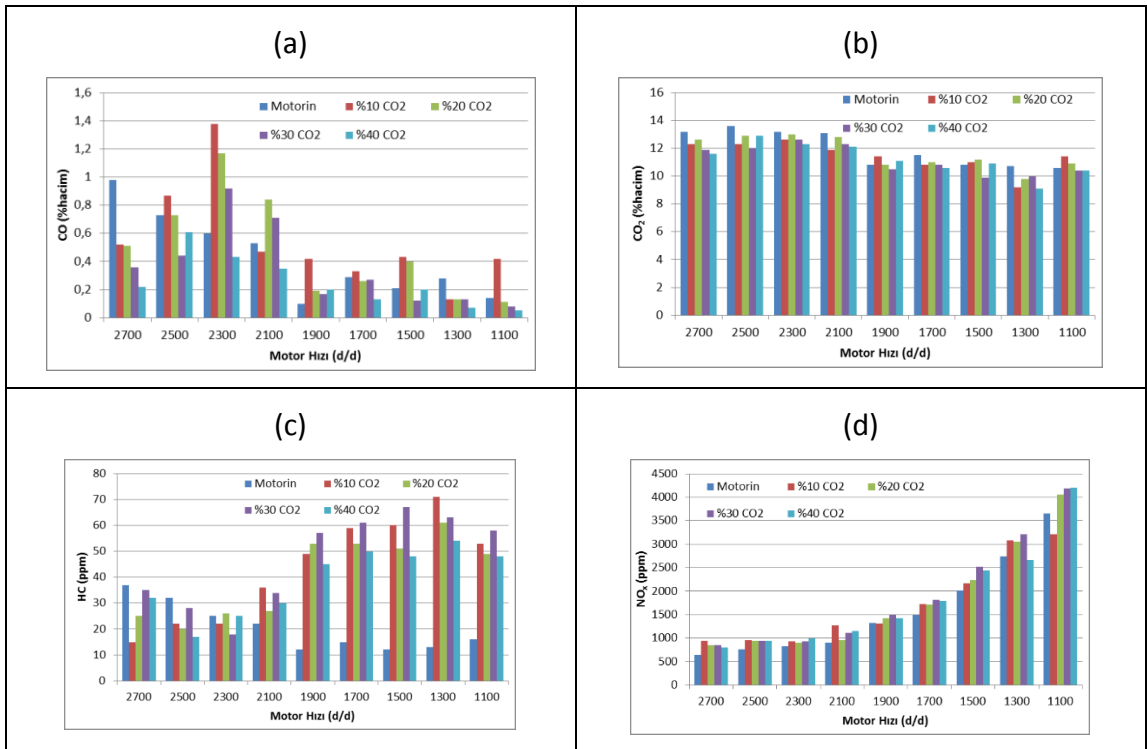
NO_x miktarları ise hemen hemen tüm devir şartlarında biyogaz kullanımı ile yalnız motorin yakıtına oranla artmaktadır. Ayrıca devir yükseldikçe NO_x miktarı düşmektedir.

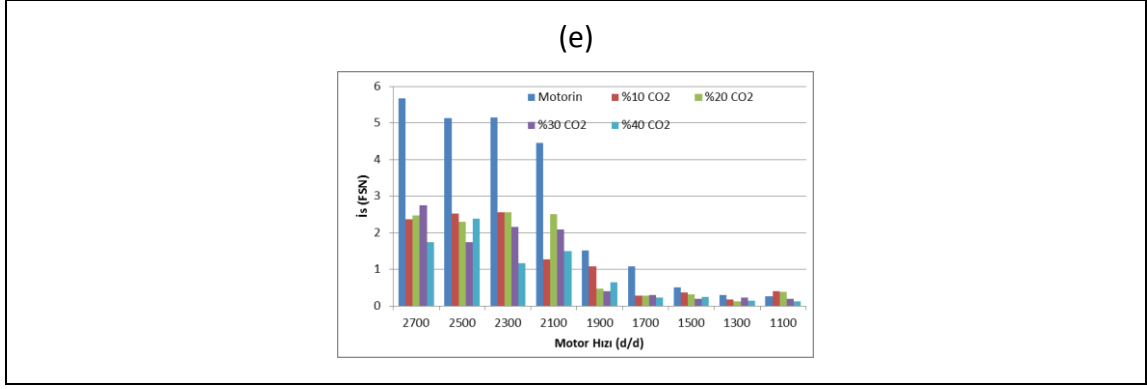
Gaz yakıt ilavesiyle, artan alev sıcaklığından dolayı ise NO formasyonu yükselmektedir. Yalnızca metan karışimli gaz yakıt kullanımında motorine göre yüksek alev sıcaklığı nedeniyle daha fazla NO oluşmaktadır. NO formasyonu hava fazlalık katsayısına bağlı

değişim göstermektedir. Özellikle stokiyometrik şartlarda en yüksek NO değeri oluşmaktadır. Ancak, dizel motorlar fakir yakıtla çalıştığı için emisyon sonuçları yine hava fazlalık katsayısına bağlı değişmektedir [68]. Yılmaz vd. [67] gerçekleştirdiği çalışmada, düşük motor yüklerinde dizel ve çift yakıt arasında fark görülmezken, yük arttıkça gaz yakıt (biyogaz) kullanımında NOx emisyonu değerleri artmaktadır.

İs miktarı özellikle yüksek devir koşullarında biyogaz ilavesi ile büyük bir azalma göstermiştir.

Biyogazın çift yakıt olarak kullanımında, yakıt daha iyi karıştığından is emisyonunun daha düşük seviyede açığa çıkmaktadır [74]. Gaz yakıt miktarı arttıkça, silindir içersine gönderilen dizel yakıt miktarı azaldığı için, is emisyonları azalmaktadır. Ayrıca, ilave yakıt olarak kullanılan doğalgazın temel komponenti olan metanın parafin ailesinin en düşük is emisyonu oluşturmaya eğilimli üyesi olması da is emisyonunun azalmasında etkilidir [62].





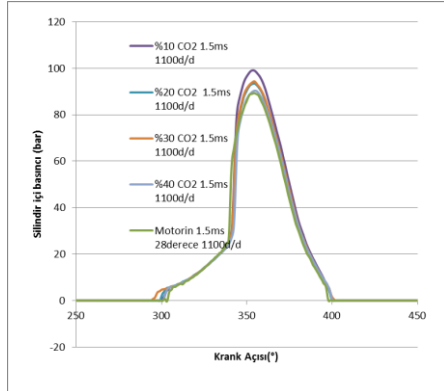
Şekil 4. 117 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde emisyon karakteristikleri

- (a) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında CO emisyonu grafiği
- (b) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında CO₂ emisyonu grafiği
- (c) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında HC emisyonu grafiği
- (d) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında NO_x emisyonu grafiği
- (e) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında is emisyonu grafiği.

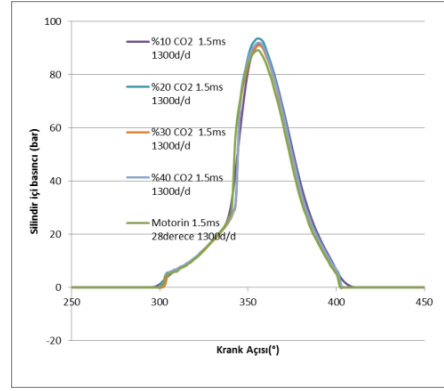
Silindir içi basınç grafikleri Şekil 4.118’de verilmiştir. CO₂ ilaveli biyogaz yakıtlar, tüm motor devri ve püskürtme avansı şartlarında yalnız motorine göre daha yüksek silindir içi gaz basıncına sahiptir.

Biyogaz dizele göre daha hızlı yanabilen bir yakıttır. Bu nedenle ilave yakıt olarak biyogaz kullanıldığında silindir için basınç daha yüksektir. Karışımın dizele göre daha homojen olması ve tutuşma gecikmesi süresinin kısılması sebebiyle, biyogaz kullanımında pik basıncın ÜÖN’ya daha yakın olarak ve daha yüksek silindir içi gaz basıncı açığa çıkmaktadır [67].

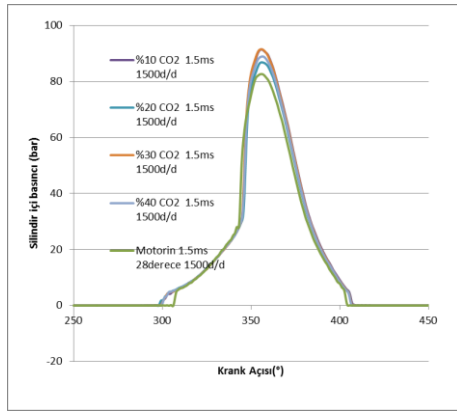
(a)



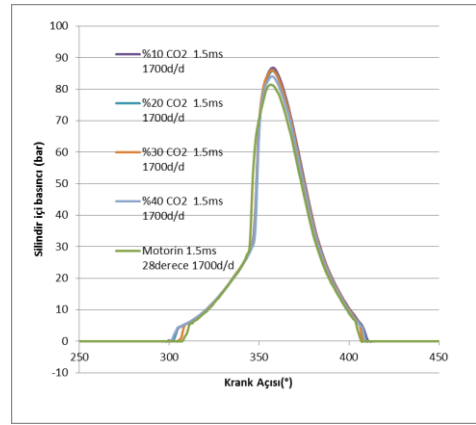
(b)



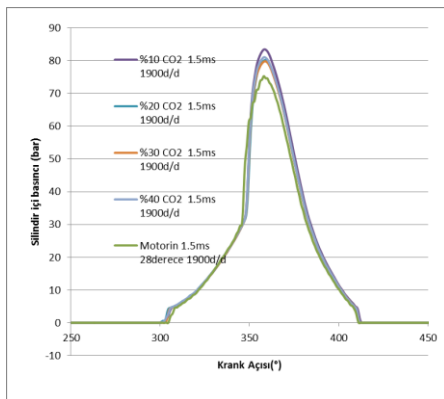
(c)



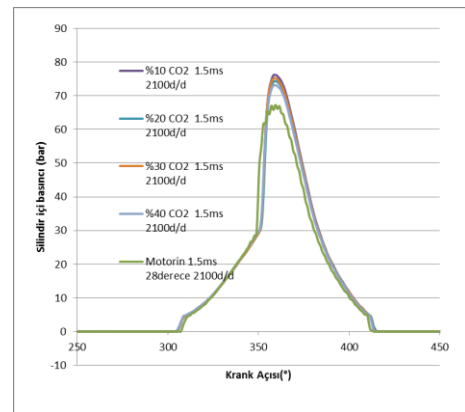
(d)



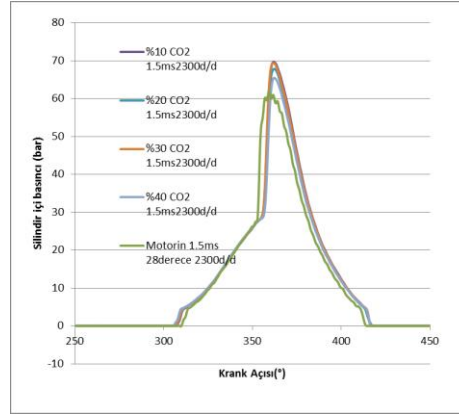
(e)



(f)



(g)



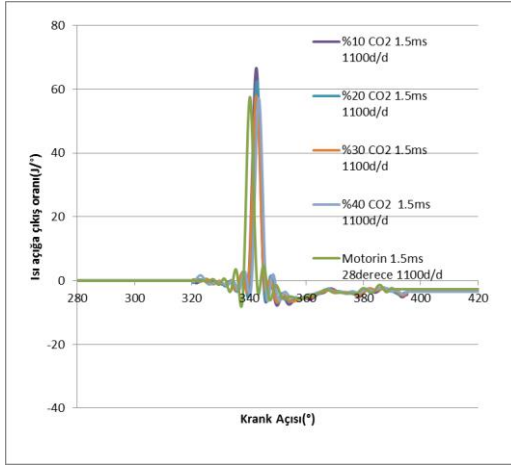
Sekil 4. 118 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi

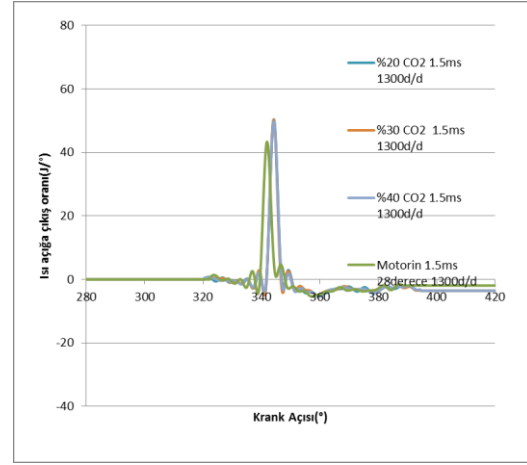
Isı açığa çıkış oranı grafikleri Şekil 4.119’te verilmiştir. Isı açığa çıkış oranı genel olarak biyogaz/motorin çift yakıt kullanım şartlarında daha yüksek değerdedir. Özellikle %10 CO₂ içeriğine sahip biyogaz/motorin çift yakıt şartında en yüksek değerleri vermektedir.

Gaz yakıt ve havanın ön karışımli ve homojen yapıda kullanılarak, pilot püskürtme ile dizel yakıtla birlikte kontrolsüz yanma fazında bir anda yanmasıyla daha hızlı ve yüksek ısı açığa çıkış oranı gözlenmektedir. Motor yükü arttıkça, silindir içine gönderilen yakıt miktarı arttığı için ısı açığa çıkış oranı artmaktadır [67].

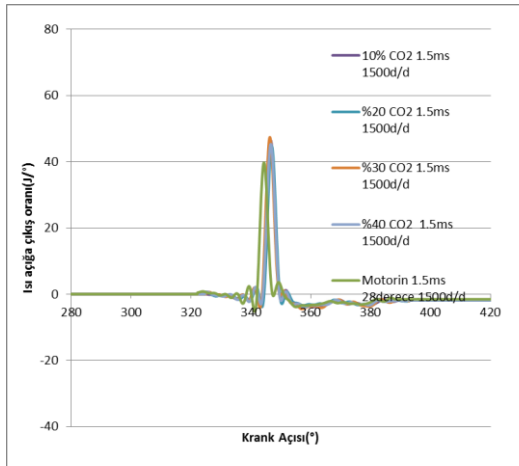
(a)



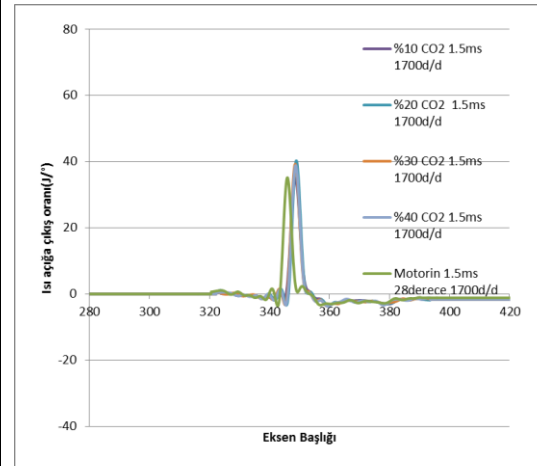
(b)



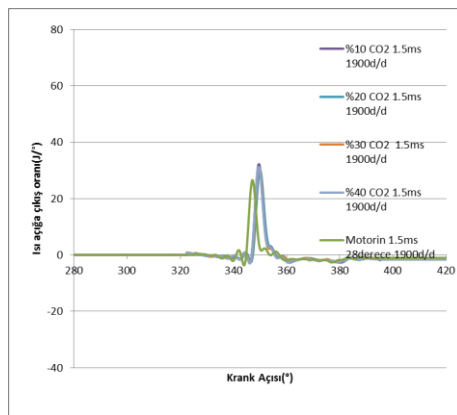
(c)



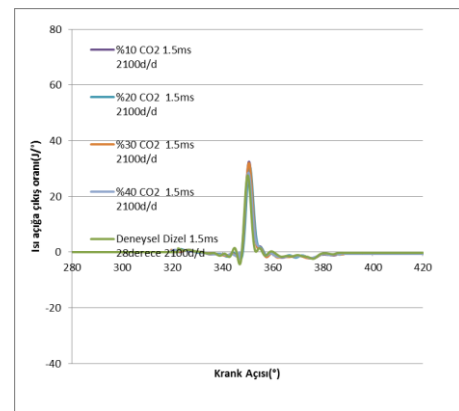
(d)



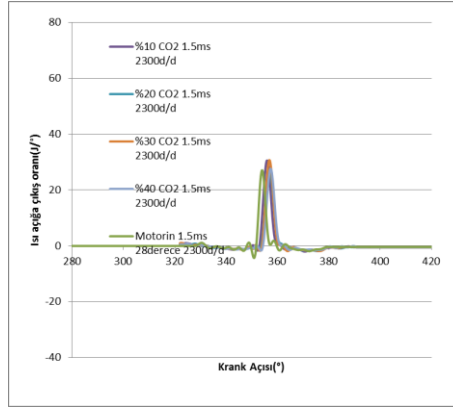
(e)



(f)



(g)



Sekil 4. 119 Farklı CO2 içerikli biyogaz ilavesinde ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, biyogazın ilavesi ile özellikle yüksek CO₂ içerikli biyogaz ile çalışma şartında, termik verimde ciddi miktarda düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak, NO_x emisyonlarındaki artışın, yalnız doğalgaz yakıtı ilaveli duruma göre azaldığı tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- %25 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8.8 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %8.3 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %4 olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %1.3 olduğu sonucuna varılmıştır.

- %25 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %48.8 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %33.8 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %34.1 olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %26.3 olduğu sonucuna varılmıştır.
- %25 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %74.5 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %73.9 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %73.2 olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %78.6 olduğu sonucuna varılmıştır.

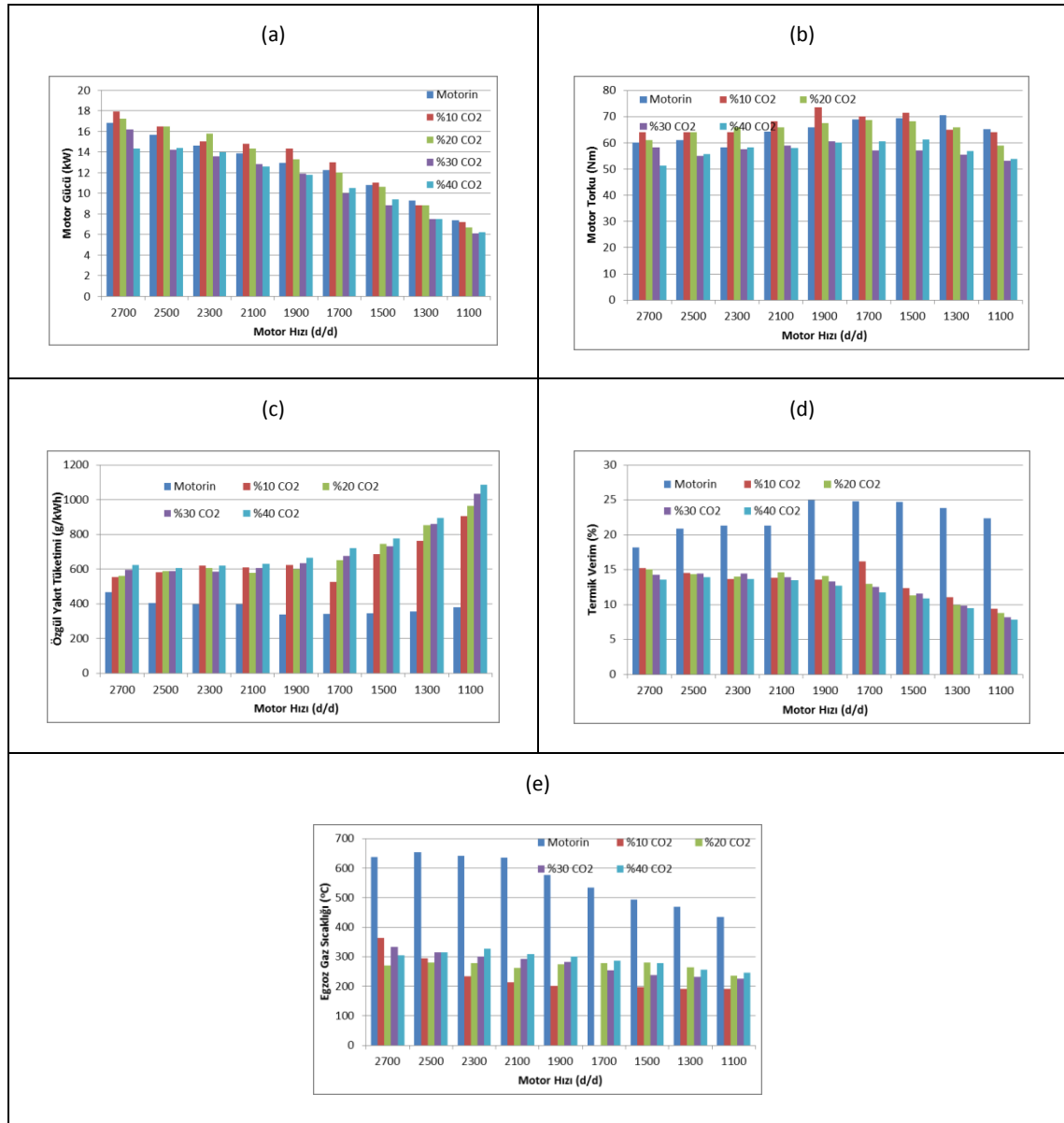
4.1.6.6 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Biyogaz (%50 enerji)- Motorin Sonuçları

Şekil 4.116'da motor performans grafikleri verilmiştir. Motor gücü yüksek devir ve %10 ve %20 CO₂ içeriğine sahip biyogaz kullanımı ile artış gösterirken, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz kullanımında düşüş göstermiştir. Motor torku ise özellikle %10 CO₂ ilaveli biyogaz-motorin çift yakıtında yüksek motor devirlerinde motorine göre artış göstermiştir. Özgül yakıt tüketimi ise biyogaz ilavesi ile tüm devir şartlarında artış gösterirken, aynı zamanda biyogazdaki artan CO₂ oranı ile özgül yakıt tüketimi daha da

artmaktadır. Termik verim değerlerinde ise CO₂ ilavesi ile önemli miktarda düşüş meydana gelmiştir.

Çift yakıtlı motorlarda gaz yakıt oranının artması termik verim ve yanma verimini düşürmektedir. Termik verimin düşüş nedeni, yanmamış gaz yakıt, düşük volümetrik verim ve yanma zamanının gaz yakıt değişiminden sonra tam optimize edilmemesidir [63].

Shan vd. [66] yapmış olduğu çalışmada, EGR oranı arttıkça termik verimin azaldığı görülmektedir. CO₂ gazının inert bir gaz olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir.



Sekil 4. 120 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde motor performans karakteristiği

- (a) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında motor gücü grafiği
- (b) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında motor torku grafiği
- (c) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi grafiği
- (d) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında termik verim grafiği
- (e) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı grafiği

Emisyon grafikleri Şekil 4.121’de verilmiştir. Karbon monoksit miktarı, biyogazdaki CO₂ oranının artışı ile bazı devirlerde artış gösterirken bazı devirlerde düşüş göstermiştir.

EGR oran arttıkça CO emisyonu artmaktadır. Yakıt yanma sıcaklığı düştüğü için CO emisyonu artmaktadır [66]. CO₂ gazının da seyreltici gaz olduğu bilindiği için, benzer sonuç elde edilmesi doğaldır.

CO₂ miktarı ise yüksek devir şartlarında yalnız motorin şartlarına göre azalma göstermiştir.

Bunda yanma veriminin kötüleşmesinin ve artan volümetrik verimle silindir içerisindeki lokal oksijen miktarlarının düşmesinin de etkisi vardır [70].

Hidrokarbon miktarında ise, tüm devir şartlarında biyogaz ilaveli yakıtla çalışma şartlarında, yalnız motorin miktarının çok üstünde değerler açığa çıkmıştır.

Biyogazın ilave yakıt olarak kullanıldığında silindir içinden kaçan gaz yakıt ve yağlama yağının yanmasından dolayı HC emisyonları oluşmaktadır. Kullanılan gaz yakıtın artışıyla volümetrik verimin düşmesi ve lokal oksijen oranının azalması sebebiyle daha zengin karışım oluşmaktadır. Bu nedenle lokal yanma bölgelerinde HC miktarı artmaktadır [67]. Ayrıca, küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle yanması zorlaştığı için HC emisyonu artmaktadır [74].

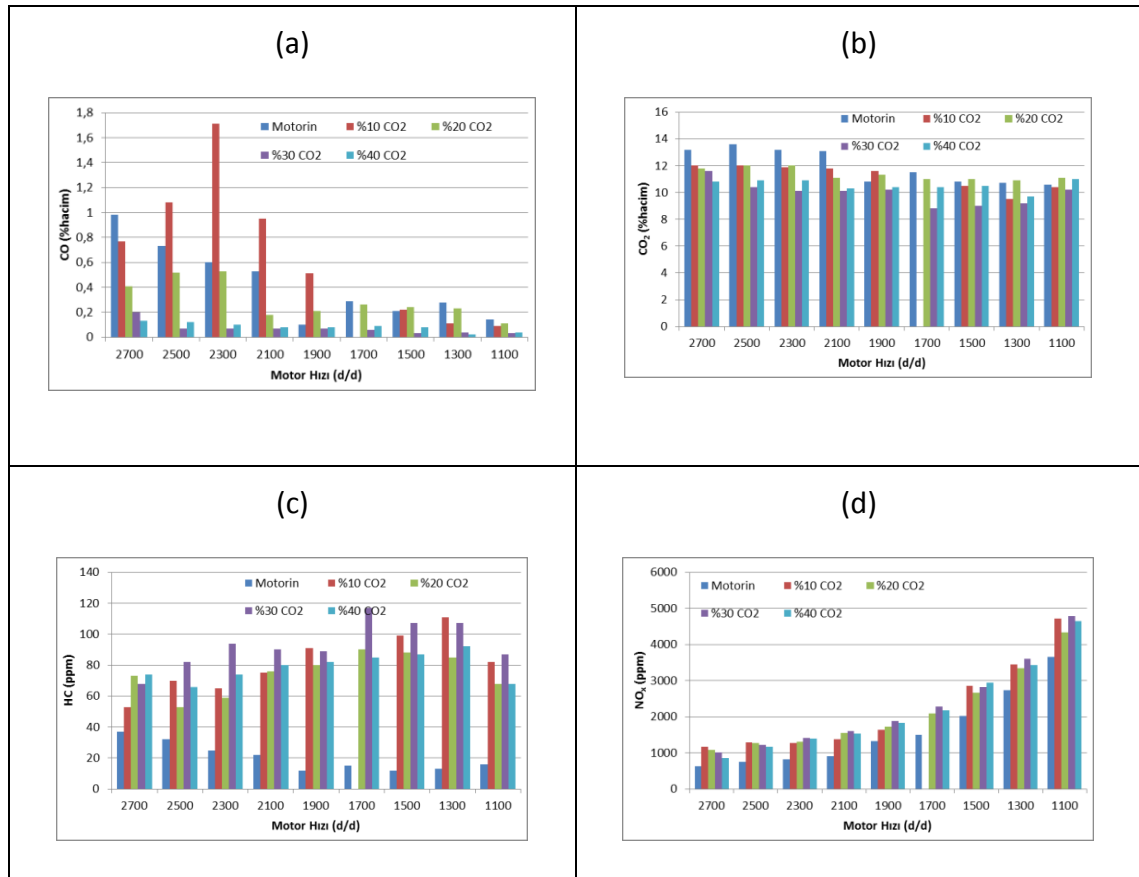
NO_x miktarları ise tüm devir şartlarında biyogaz/motorin çift yakıt çalışma şartında daha azdır. Ayrıca, devir yükseldikçe NO_x miktarı düşmektedir.

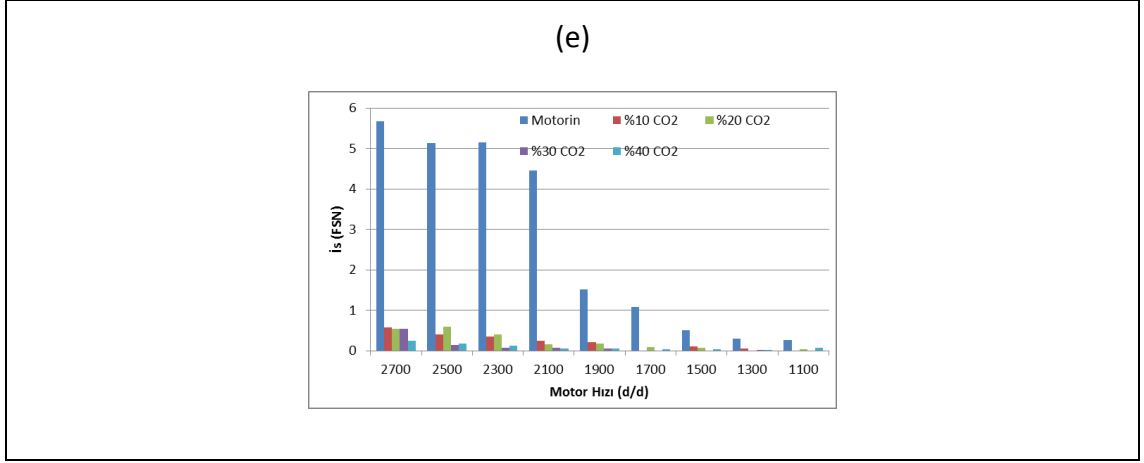
Çift yakıt kullanımında yanma sonrası art gazların içinde CO_2 bulunması sıcaklığın daha düşük olmasına neden olmaktadır. Bu durum daha düşük silindir içi sıcaklıkların oluşmasını, dolayısıyla daha düşük NO_x emisyon değerlerinin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Çift yakıtın ısıl değerinin dizele göre daha düşük olması da NO_x emisyonunun azalmasına neden olmaktadır [73].

İs miktarı özellikle yüksek devir koşullarında biyogaz ilavesi ile büyük bir azalma göstermiştir.

Biyogazın çift yakıt olarak kullanımında, yakıt daha iyi karıştığından is emisyonunun daha düşük seviyede açığa çıkmaktadır [74].

Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH_4 'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH_4 miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].





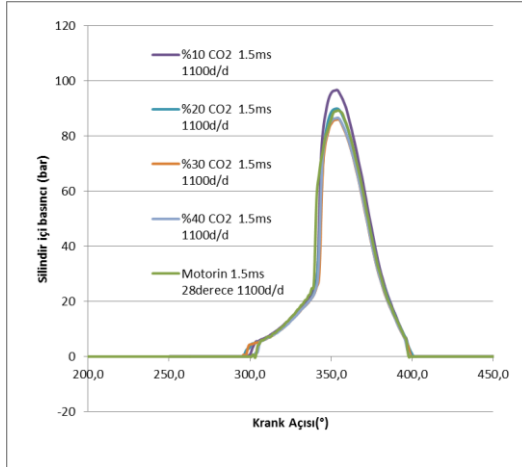
Şekil 4. 121 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde motor emisyon karakteristiği

- (a) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında CO emisyonu grafiği
- (b) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında CO₂ emisyonu grafiği
- (c) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında HC emisyonu grafiği
- (d) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında NO_x emisyonu grafiği
- (e) %10, %20, %30 ve %40 CO₂ içerikli biyogaz - motorin ve yalnız motorin ile çalışma şartında is emisyonu grafiği.

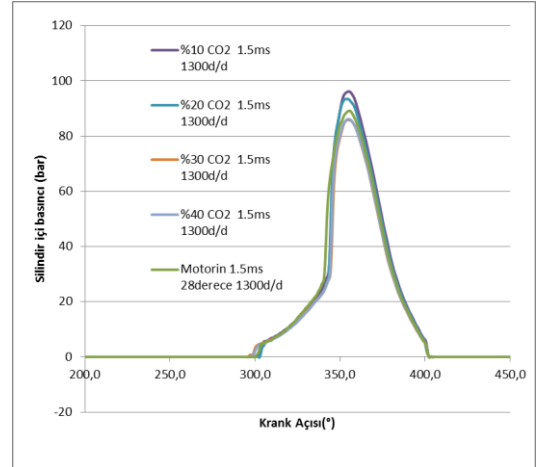
Şekil 4.122'de silindir içi basınç değeri grafikleri verilmiştir. Biyogaz/motorin çift yakıtı çalışma şartlarında, tüm motor devri ve püskürtme avans şartlarında yalnız motorine göre daha yüksek silindir içi gaz basıncına sahiptir.

Biyogaz dizele göre daha hızlı yanabilen bir yakıttır. Bu nedenle ilave yakıt olarak biyogaz kullanıldığında silindir için basınç daha yüksektir. Karışımın dizele göre daha homojen olması ve tutuşma gecikmesi süresinin kısılması sebebiyle, biyogaz kullanımında pik basıncın ÜÖN'ya daha yakın olarak ve daha yüksek silindir içi gaz basıncı açığa çıkmaktadır [67].

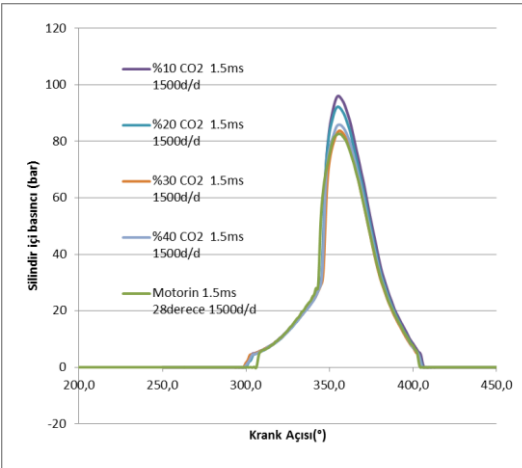
(a)



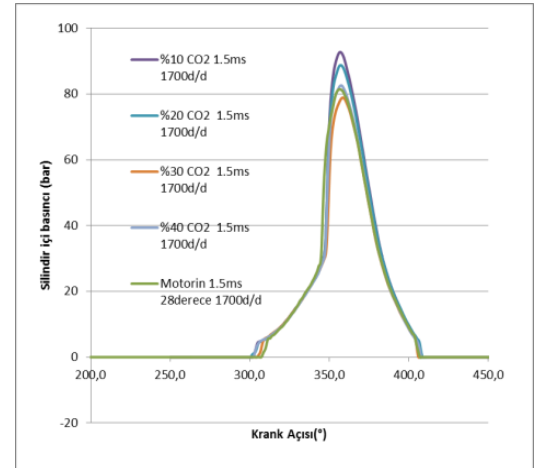
(b)



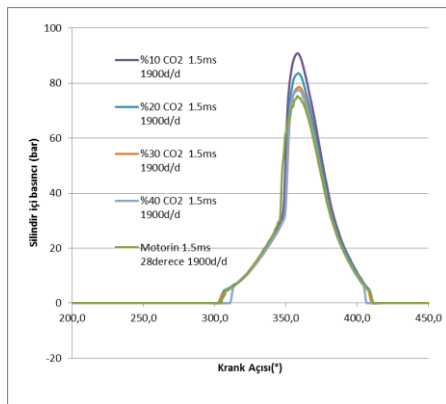
(c)



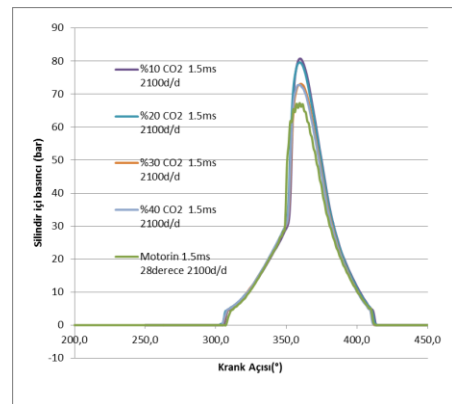
(d)



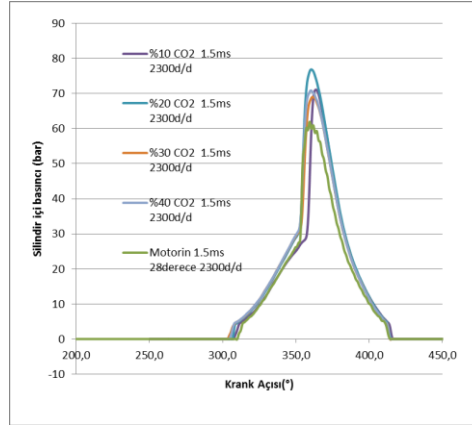
(e)



(f)



(g)



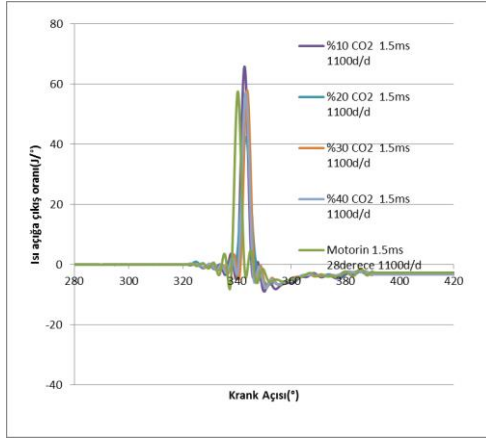
Şekil 4. 122 Farklı CO2 içerikli biyogaz ilavesinde silindir içi gaz basıncı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki silindir içi basıncı eğrisi.

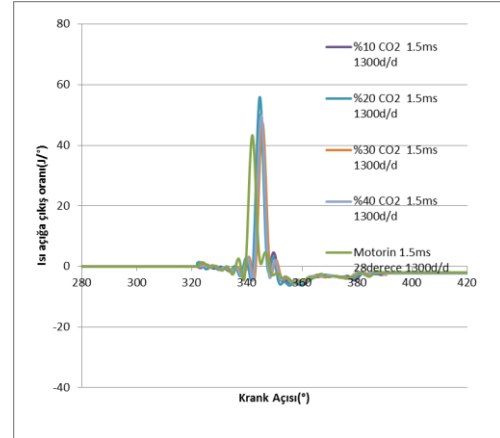
Şekil 4.123'da ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Isı açığa çıkış oranı genel olarak biyogaz/motorin çift yakıt çalışma şartında daha yüksektir. Özellikle %10 CO₂ ilaveli biyogaz/motorin çift yakıt çalışma şartında en yüksek değerleri vermektedir.

Gaz yakıt ve havanın ön karışımli ve homojen yapıda kullanılarak, pilot püskürtme ile dizel yakıtla birlikte kontrolsüz yanma fazında bir anda yanmasıyla daha hızlı ve yüksek ısı açığa çıkış oranı gözlenmektedir. Motor yükü arttıkça, silindir içine gönderilen yakıt miktarı arttığı için ısı açığa çıkış oranı artmaktadır [67].

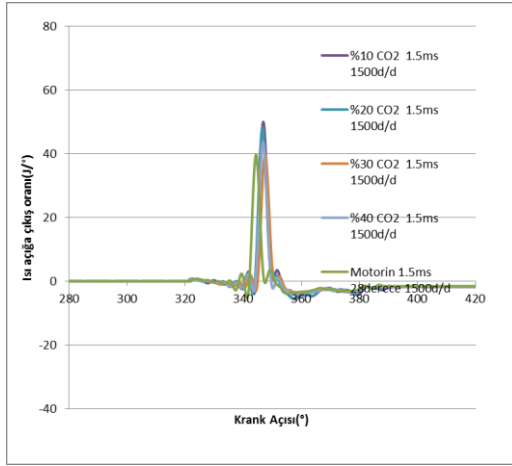
(a)



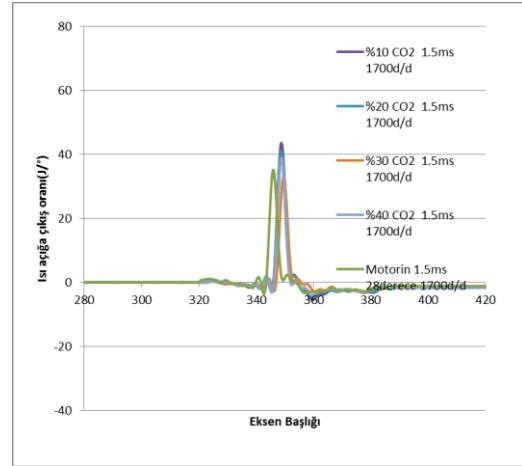
(b)



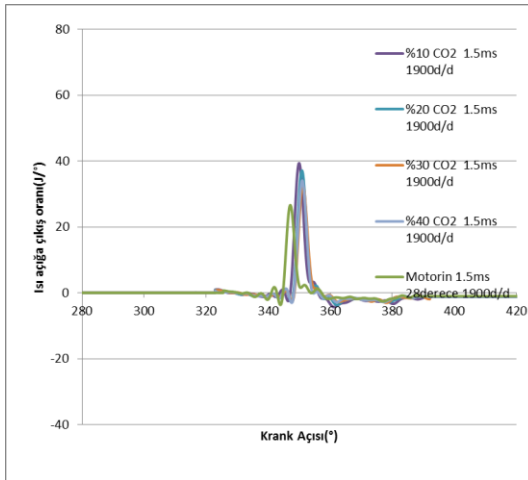
(c)



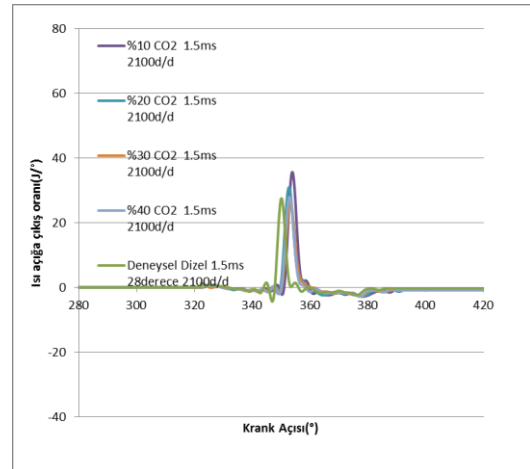
(d)

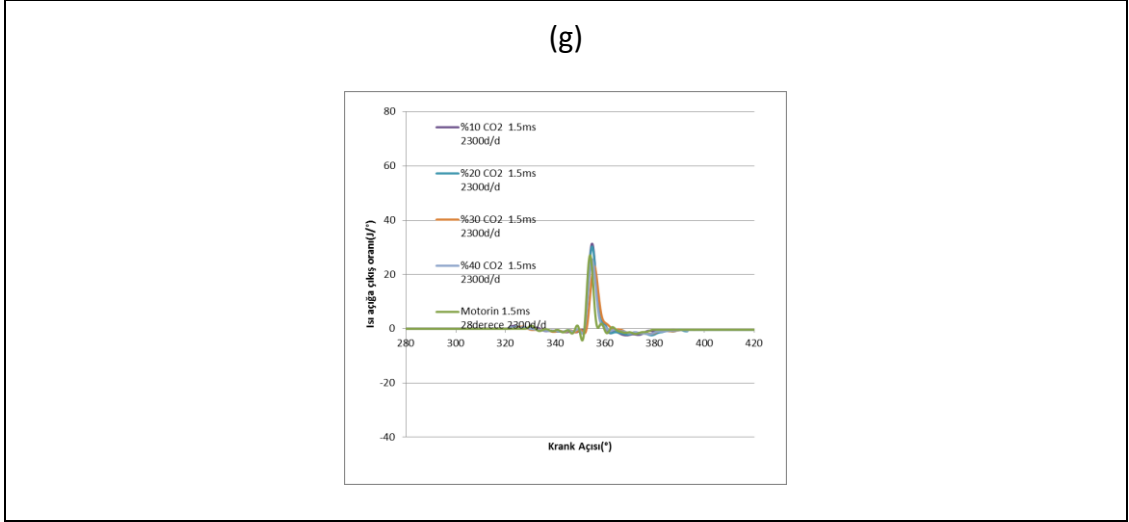


(e)



(f)





Sekil 4. 123 Farklı CO₂ içerikli biyogaz ilavesinde ısı açığa çıkış oranı karakteristiği

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1500d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1700d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 1900d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2100d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun 2300d/d motor hızındaki ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, enerji içeriği olarak %50 oranında biyogaz ilavesi ile özellikle yüksek CO₂ içerikli biyogaz ile çalışma şartında, termik verimde ciddi miktarda düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, yine motor gücü ve motor torku değerlerinde özellikle yüksek CO₂ içeriklerinde (%30 ve %40) düşüş meydana geldiği tespit edilmiştir. Ancak, NO_x emisyonlarındaki artışın, yalnız doğalgaz yakıtı ilaveli duruma göre azaldığı tespit edilmiştir. Is emisyonlarında tüm çalışma şartlarında ciddi miktarda iyileşme sağlandığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- %50 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %10.5 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücündeki maksimum artış oranının 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %13.7 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, motor gücünde tüm devirlerde düşüş meydana

geldiği ve motor gücündeki düşüşün yalnız motorin yakıtına göre %2.1 ila %19.3 arasında olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, yalnızca 2300 d/d motor hızında motor gücünde %0.8 artış meydana geldiği, diğer tüm motor hızlarında motor gücünde düşüş meydana geldiği ve maksimum düşüşün %19.3 olduğu sonucuna varılmıştır.

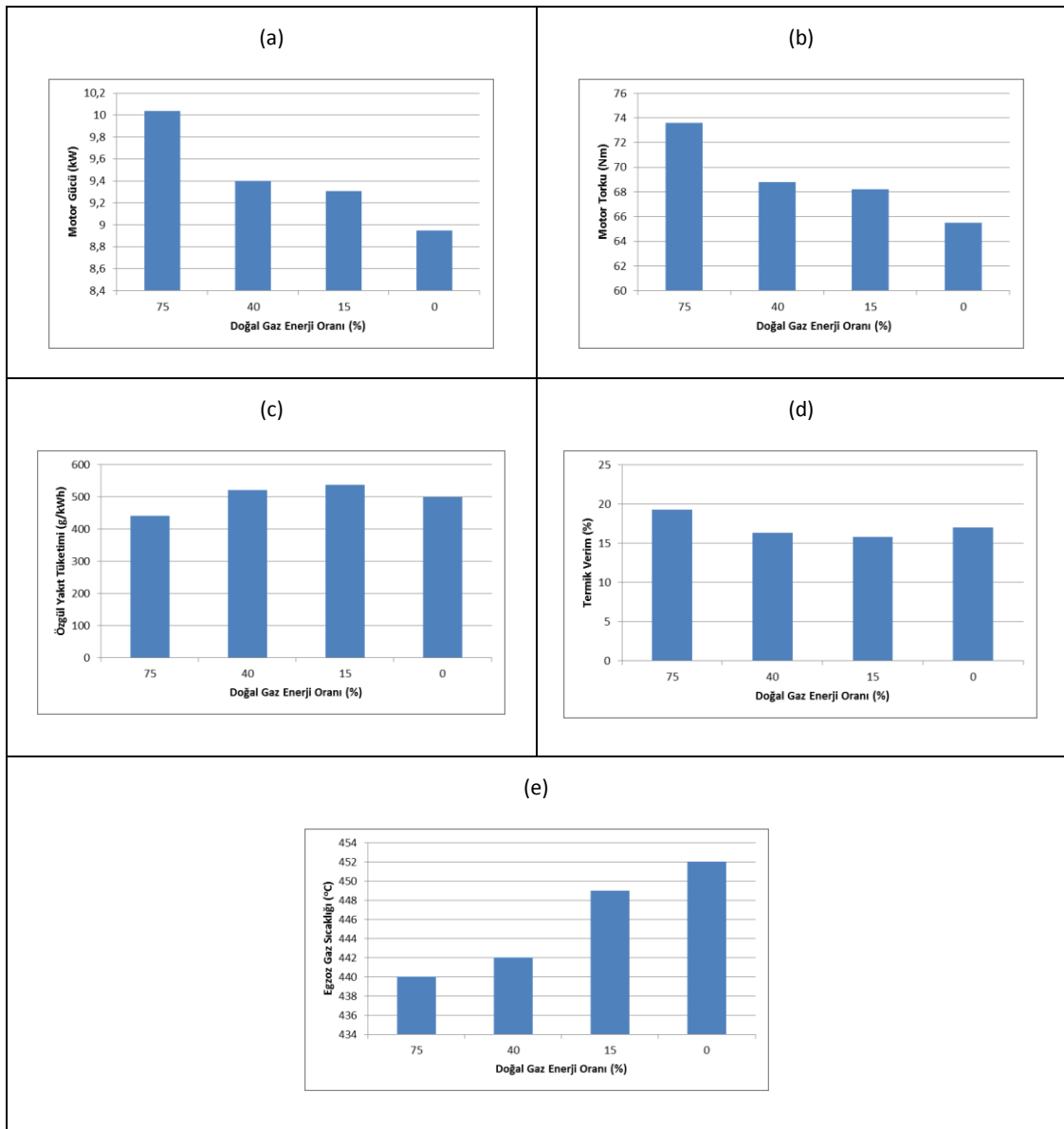
- %50 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %83.6 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2700 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %71.2 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %76.8 olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, NO_x emisyonlarındaki maksimum artış oranının 2300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %69.1 olduğu sonucuna varılmıştır.
- %50 biyogaz yakıtı ilavesinde, biyogaz yakıtının %10'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1300 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %94.4 olduğu; biyogaz yakıtının %20'sinin CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 2100 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %96.5 olduğu; biyogaz yakıtının %30'unun CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 2500 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %98.6 olduğu; biyogaz yakıtının %40'ının CO₂ gazı içerdiği durumda, is emisyonlarındaki maksimum düşüş oranının 1900 d/d motor hızında yalnız motorin yakıtına göre %78.6 olduğu sonucuna varılmıştır.

4.1.6.7 1300 d/d Motor Hızı 1. 5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Motor performansına ait grafikler Şekil 4.124'de verilmiştir. Motor gücü ve torku eklenen doğalgaz oranıyla paralel olarak artmıştır. Özgül yakıt tüketimi ise %15 ve %40

doğalgaz ilavelerinde artış gösterirken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yalnız motorine göre düşüş meydana gelmiştir. Termik verim ise %15 ve %40 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yalnız motorine göre düşükken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartında termik verimi yalnız motorinden fazladır. Egzoz çıkış sıcaklığı ise doğalgaz ilavesi ile azalmıştır.

Çift yakıtlı motorlarda gaz yakıt ilavesi ile termik verim ve yanma verimini düşürmektedir. Termik verimin düşüş nedeni, yanmamış gaz yakıt, düşük volümetrik verim ve yanma zamanının gaz yakıt değişiminden sonra tam optimize edilmemesidir [63]. Diğer taraftan, gaz yakıt hava karışımında, gaz yakıt miktarı arttıkça hava fazlalık katsayısı aşırı fakirden zengine doğru yaklaşacağı için silindir içi sıcaklıklar artar ve özgül yakıt tüketimi düşer [74].



Şekil 4. 124 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
- (b) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi
- (c) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
- (e) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.125’de emisyon grafikleri verilmiştir. Karbon monoksit oranı en yüksek %15 doğalgaz ilaveli çift yakıt çalışma şartında görülmüştür. En düşük karbon monoksit miktarı ise %75 doğalgaz ilavesinde tespit edilmiştir.

CO metanın eksik yanmasından dolayı açığa çıkan ara ürünlerden birisidir. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak alev hızının değişkenlik göstermesi ve fakir karışımda düşmesi, eksik yanma sonucu açığa çıkan CO emisyonlarının artışı açıklamaktadır. [68] Ancak, gaz yakıt oranı arttıkça, havayla daha homojen şekilde karışan gaz yakıt, yanma odasına daha iyi ve homojen şekilde dağılmaktadır. Bu sayede oksitlenme daha verimli şekilde gerçekleştiğinden CO emisyonu azalmaktadır [75].

CO₂ miktarı ise doğalgaz ilavesiyle artış göstermiştir. CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70].

Hidrokarbon miktarı eklenen doğalgaz oranına paralel olarak büyük artışlar göstermiştir.

Crevis hacimleri, dizel motorda piston ve silindir cidarları arasındaki boşluklar ve üst segmandaki boşluklar daha fazla olduğu için artmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar bu ölü hacimde dizelden çift yakıtlıya dönüştürülen motorlarda daha fazla birikmekte dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır [70].

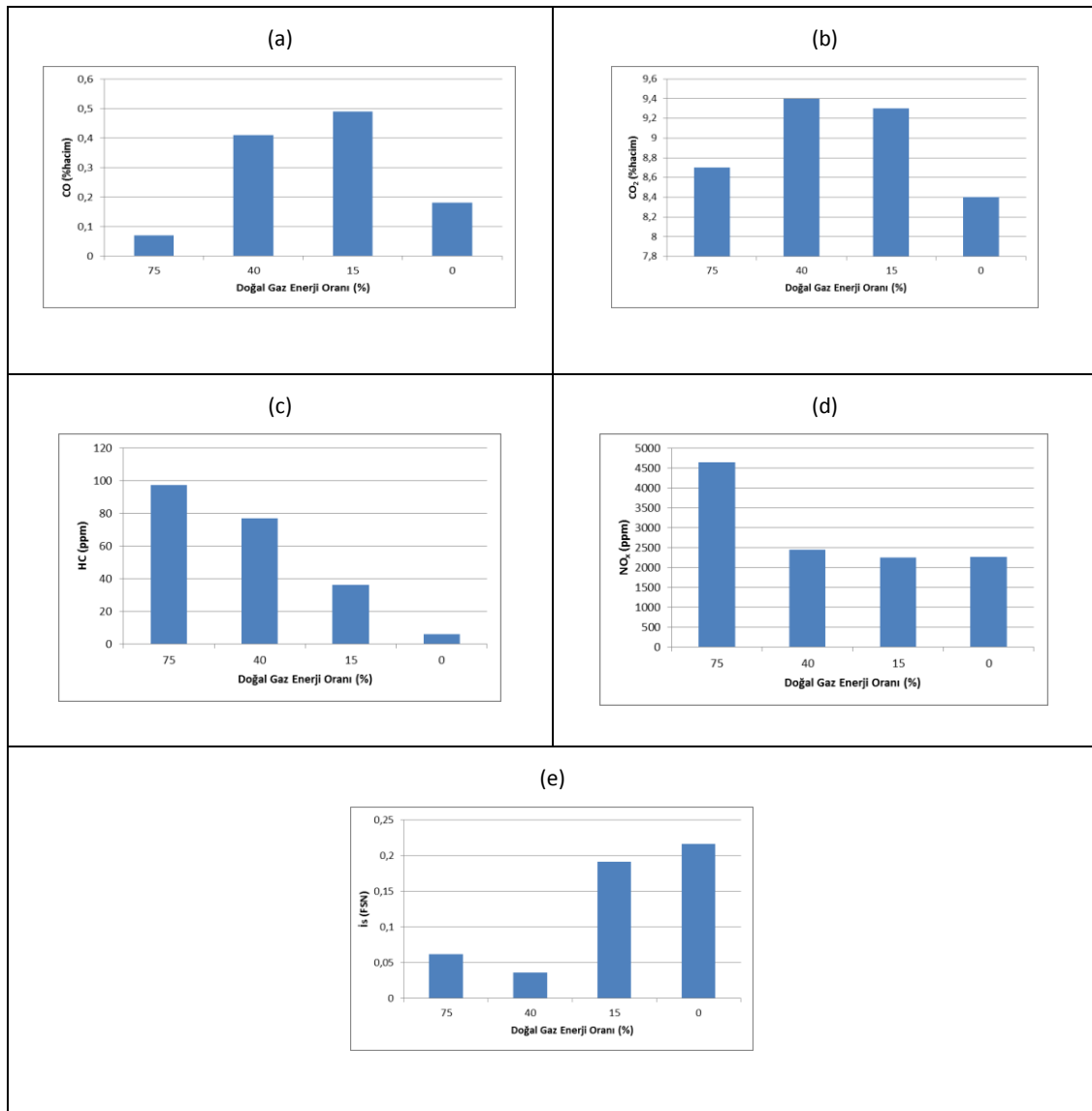
NO_x emisyonu ise %15 ve %40 doğalgaz ilavesi ile yalnız motorin yakıtına göre çok hafif farklılık gösterirken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıt şartında, yalnız motorin ile çalışma şartının neredeyse iki katı kadardır.

Gaz yakıtın ilavesiyle daha fazla ısı ortaya çıkmış olsa da, daha homojen hava-yakıt karışımının kullanılmış olması, lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasını engellemiş ve NO_x emisyonunu düşürmüştür. Öte yandan, silindir cidarları gaz yakıt kullanımı sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış, gaz yakıt tüm yanma odasına dağılarak daha yüksek ısı salınımının açığa çıkmasına ve NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur.

Birbirine zıt olan bu parametreler sonucu NO_x emisyonlarında artış, düşüş veya ciddi bir değişiklik meydana gelmemesi gözlemlenebilir [75].

İs miktarı doğalgaz ilavesi ile büyük düşüşler gösterirken en düşük seviyenin %40 doğalgaz ilaveli çift yakıtta tespit edilmiştir.

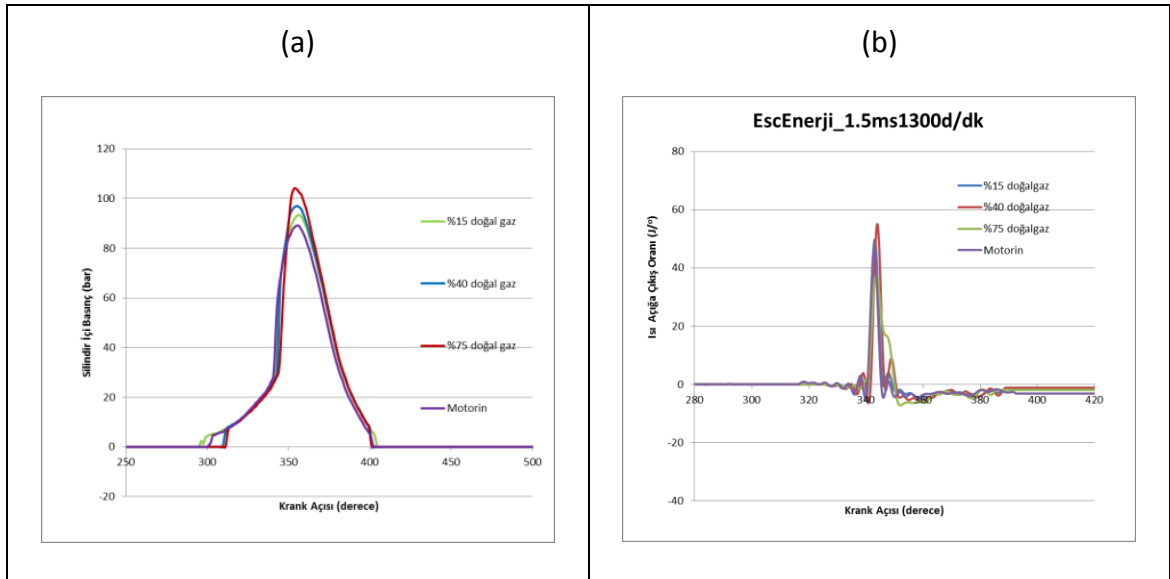
Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH₄'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH₄ miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].



Şekil 4. 125 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında CO emisyonu eğrisi
- (b) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında CO₂ emisyonu eğrisi
- (c) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında HC emisyonu eğrisi
- (d) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında NO_x emisyonu eğrisi
- (e) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında is emisyonu eğrisi.

Şekil 4.126'da silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı miktarı doğalgaz oranı ile paralel olarak artış göstermiştir. En yüksek silindir içi gaz basıncına %75 doğalgaz eklentili çift yakıtta rastlanılmıştır. Gaz yakıt kullanımında, motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha yüksek enerji açığa çıkmasını, gaz yakıtın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi gaz basıncı değerlerinin artmasını sağlamaktadır [69]. Isı açığa çıkış oranı ise %75 doğalgaz ilavesi ile düşüş gösterirken, %40 ve %15 doğalgaz ilaveli çift yakıtta artış göstermişlerdir. %75 doğalgaz ilavesi ile maksimum ısı açığa çıkış oranının düşmesinin nedeni, düşen motorin yakıtı miktarıyla, hava fazlalık katsayısının artmasıyla, alev hızının değişmesiyle, yanma süresinin uzamasıdır.



Şekil 4. 126 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi.

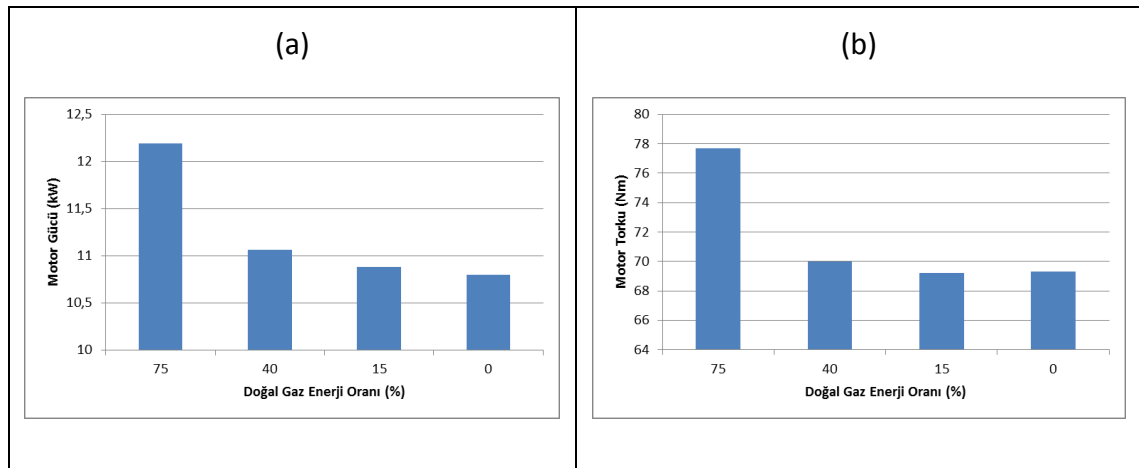
Elde edilen sonuçlardan, doğalgazın enerji içeriği olarak artmasıyla, %40 enerji içeriğine kadar NO_x emisyonları miktarında ciddi bir artış olmamasına rağmen, artan doğalgaz

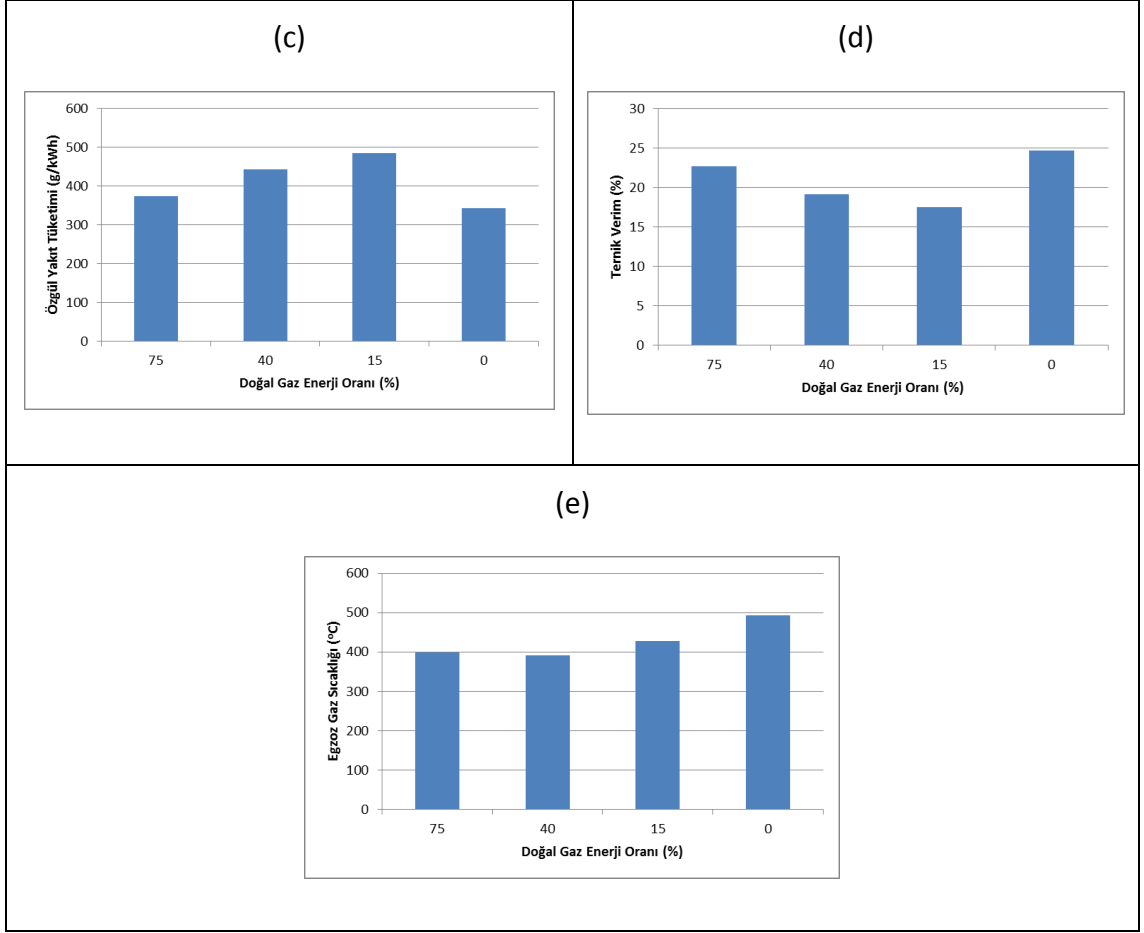
enerji içeriğiyle (%75) NO_x emisyonlarında ciddi bir miktar artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %4 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %5 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %12.2 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %0.4 oranında azaldığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %8 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %104.9 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %13.1 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %81.2 oranında azaldığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %67.5 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %172.2 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %127.7 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %61.1 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre 5 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 12 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 15 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

6.1.6.7 1500 d/d Motor Hızı 1. 5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.127’te motor performans grafikleri verilmiştir. Motor gücü ve motor torku, eklenen doğalgaz oranıyla paralel olarak artmıştır. İki özellikte de en yüksek değerlerini %75 doğalgaz ilaveli doğalgaz-motorin çift yakıtında almışlardır. Özgül yakıt tüketimi ise %15 ve %40 doğalgaz ilavelerinde artış gösterirken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıtta %40 doğalgaz ilaveli çift yakıtı göre düşük olmuştur. Termik verim ise %15 ve %40 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yalnız motorine göre düşükken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıt termik verimi yalnız motorin termik verimine daha yakın değerdir. Çift yakıt kullanıldığında dizele göre daha düşük termik verim elde edilmektedir. Nedeni, kalorifik değerın kullanılan gaz yakıtta daha düşük olması olarak gösterilmektedir. Art gazlar, yanmayan gaz yakıt, düşük yanma sıcaklığı ve düşük alev ilerleme hızı termik verimin düşmesine sebep olmaktadır [73]. Pilot püskürtmeyle gönderilen dizel yakıtının düşmesi özellikle düşük yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur [74]. Egzoz çıkış sıcaklığı ise doğalgaz ilavesi ile azalmıştır.





Şekil 4. 127 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
- (b) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi
- (c) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
- (d) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
- (e) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.128'te egzoz emisyonu grafikleri verilmiştir. Karbon monoksit oranı en yüksek %15 doğalgaz ilaveli çift yakıtta görülmüştür. En düşük karbon monoksit miktarı ise %75 doğalgaz ilavesi şartında tespit edilmekle beraber, yalnız motorin şartında açığa çıkan karbon monoksit seviyesinin de altındadır. CO metanın eksik yanmasından dolayı açığa çıkan ara ürünlerden birisidir. Hava fazlalık katsayısına bağlı olarak alev hızının değişkenlik göstermesi ve fakir karışımda düşmesi, eksik yanma sonucu açığa çıkan CO emisyonlarının artışı açıklamaktadır [68]. Ancak diğer taraftan, gaz yakıt oranı arttıkça, havayla daha homojen şekilde karışan gaz yakıt, yanma odasına daha iyi ve homojen şekilde dağılmaktadır. Bu sayede oksitlenme daha verimli şekilde gerçekleştiğinden CO emisyonu azalmaktadır [75].

CO₂ miktarı ise doğalgaz ilavesiyle artış göstermiştir.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70].

Hidrokarbon miktarı eklenen doğalgaz oranına paralel olarak büyük artışlar göstermiştir.

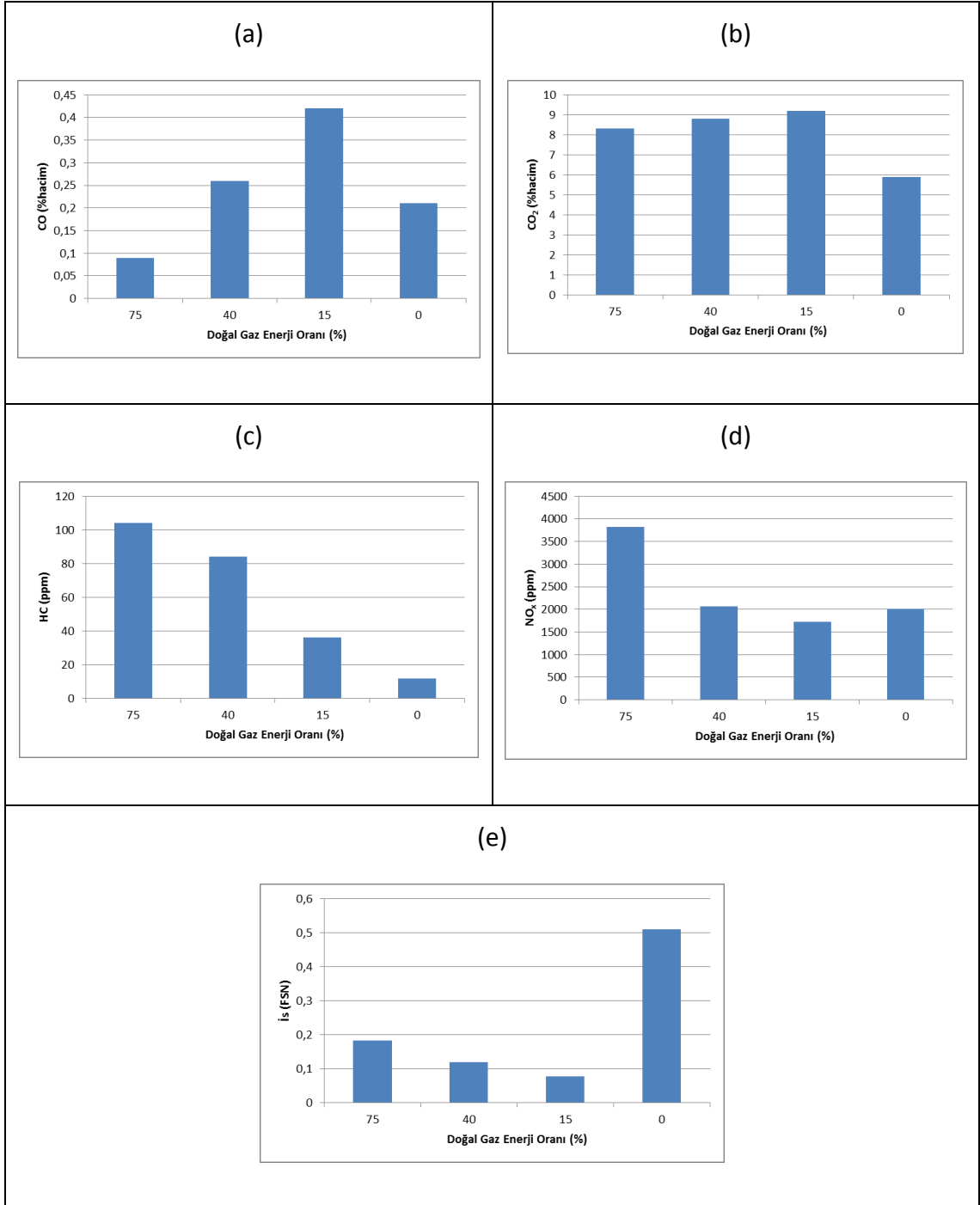
Crevis hacimleri, dizel motorda piston ve silindir cidarları arasındaki boşluklar ve üst segmandaki boşluklar daha fazla olduğu için artmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar bu ölü hacimde dizelden çift yakıtlıya dönüştürülen motorlarda daha fazla birikmekte dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır [70]. Kullanılan metanın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından ve supap bindirmesi esnasında bir kısmının dışarı kaçmasından dolayı tam yanma gerçekleşmemektedir. Bu nedenle HC emisyonlarında ciddi oranda artış görülmektedir [74].

NO_x emisyonu ise %15 ve %40 doğalgaz ilavesinde ufak farklılıklar gösterirken, %75 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yalnız motorinin NO_x emisyonlarının neredeyse iki katı kadardır.

Gaz yakıt ilavesiyle, artan alev sıcaklığından dolayı ise NO formasyonu yükselmektedir. Gaz yakıt kullanımında motorine göre yüksek alev sıcaklığı nedeniyle daha fazla NO oluşmaktadır. NO formasyonu hava fazlalık katsayısına bağlı değişim göstermektedir. Özellikle stokiometrik şartlarda en yüksek NO değeri oluşmaktadır. Ancak, dizel motorlar fakir yakıtla çalıştığı için emisyon sonuçları yine hava fazlalık katsayısına bağlı değişmektedir [68].

İs miktarı doğalgaz ilavesi ile büyük düşüşler gösterirken, en düşük seviyenin %15 doğalgaz ilaveli çift yakıtta tespit edilmiştir.

CH₄, dizel yakıtından daha az karbon içerdiği için is emisyonu daha fazla azalmaktadır. CH₄ gazı emme manifoldundan gönderildiğinde, hava ile daha homojen karıştığından, daha az yakıt içeri püskürtülerek daha verimli yanma elde edilebilmektedir [75].

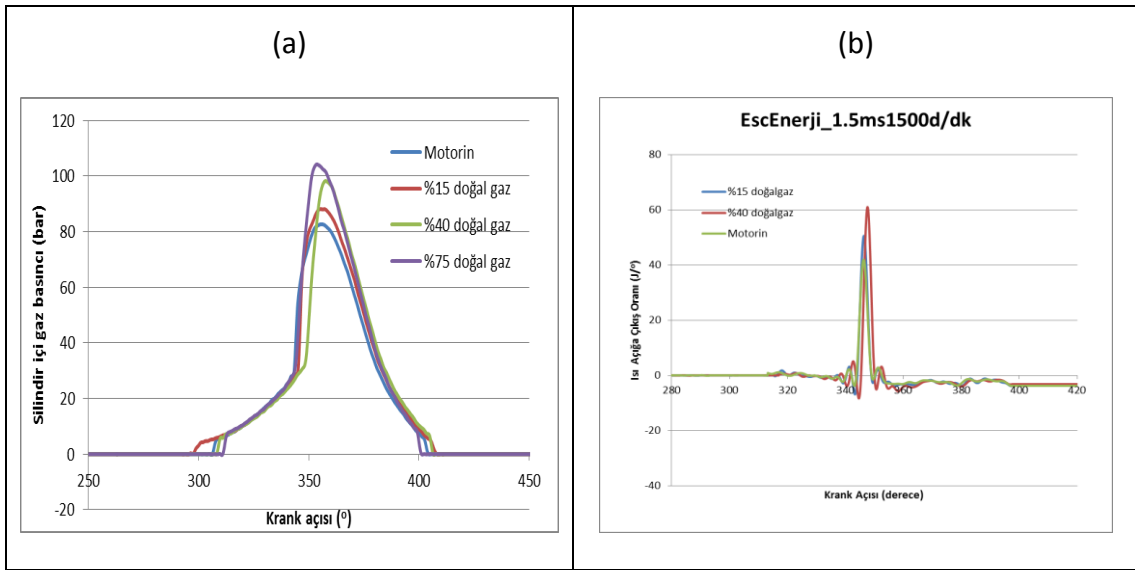


Şekil 4. 128 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında CO emisyonu eğrisi
 (b) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında CO₂ emisyonu eğrisi
 (c) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında HC emisyonu eğrisi
 (d) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında NO_x emisyonu eğrisi
 (e) %0, %15, %40 ve %75 doğalgaz - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında Is emisyonu eğrisi

Şekil 4.129'te silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı miktarı doğalgaz oranı ile paralel olarak artış göstermiştir. En yüksek silindir içi gaz basıncına %75 doğalgaz eklentili çift yakıtta rastlanılmıştır. Isı açığa çıkış

oranı ise yalnız motorine göre %15 doğalgaz ilavesinde artış gösterirken, %40 ve %75 doğalgaz ilavesinde çift yakıtta düşüş göstermişlerdir. Gaz yakıt kullanımında, silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha yüksek enerji açığa çıkmasını, gaz yakıtın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi gaz basıncı değerlerinin artmasını sağlamaktadır [69].



Şekil 4. 129 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı karakteristikleri

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi.

Elde edilen sonuçlardan, 1300d/d motor hızındaki sonuçlara benzer olarak, doğalgazın enerji içeriği olarak artmasıyla, %75 enerji içeriğinden itibaren NO_x emisyonları miktarında ciddi bir artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, is emisyonlarında, %75 doğalgaz ilavesiyle is emisyonları miktarı yalnız motorin yakıtına göre artmaya başlamıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %5.3 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %7.1 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %18 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %3.4 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %24.1 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %129.4 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %53.3 oranında azaldığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %27.3 oranında azaldığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %10.9 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre 3 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %136,3 arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %18.2 azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 4 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 11 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 14 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

4.1.6.8 ESC Çevrimine Göre 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Farklı yüklerdeki, 1300d/d, 1400d/d ve 1500d/d motor hızlarındaki, motor performansı ve emisyon değerleri grafikleri Şekil 4.130 ila 135 arasında verilmiştir. Motor gücü ve motor torku; tam ve % 75 motor yükü durumlarında, %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtta daha fazladır. Ancak, motor yükü %50 ve aşağısına indikçe motor gücü ve motor torku doğalgaz ilaveli çift yakıt şartında düşmektedir. 1300d/d motor hızında, %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtın özgül yakıt tüketimi, motor yükü düştükçe yalnız motorin özgül yakıt tüketiminin seviyesinde daha alt seviyelere düşmüştür. %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtın

termik verimi, motor yükü düştükçe yalnız motorin termik veriminin seviyesinden daha üst seviyelere çıkmıştır. Egzoz çıkış sıcaklığı genel olarak yalnız motorin yakıt şartlarında daha yüksektir. 1400 d/d motor hızında, doğalgaz/motorin çift yakıt şartında, termik verim %100 ve %75 motor yükünde daha fazla iken, motor yükü düştükçe termik verim düşmektedir. 1500d/d motor hızında da termik verim açısından durum aynıdır.

Çift yakıt kullanıldığında dizele göre daha düşük termik verim elde edilmektedir. Nedeni, kalorifik değerin kullanılan gaz yakıtta daha düşük olması olarak gösterilmektedir. Art gazlar, yanmayan gaz yakıt, düşük yanma sıcaklığı ve düşük alev ilerleme hızı termik verimin düşmesine sebep olmaktadır [73].

1300d/d motor hızında, emisyon değerleri, motor yüküne ve doğalgaz ilavesine bağlı olarak değişmektedir. Ancak, genel olarak doğalgaz ilavesiyle CO miktarında ciddi artışlar gözlemlenmiştir. Karbon monoksit miktarı motor yük oranı azaldıkça azalmaktadır.

Kullanılan gaz yakıt miktarı arttıkça, tam yanma gerçekleşemediğinden dolayı CO emisyonu artmaktadır. Motor yükü arttıkça karışım zenginleşmekte, hava miktarı azalıp oksidasyon zorlaşmaktadır [74].

Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, katalitik susturucu kullanıldığında dizel-gaz yakıt çiftinin CO emisyonu tüm yüklerde motorinin altına düşürülmektedir. Oksidasyon katalistinin kullanımında, özellikle orta ve yüksek yüklerde CO emisyonlarını sıfıra yakın olacak kadar azalttığı görülmektedir [70].

Karbondioksit oranı ise yüksek motor yükü şartlarında %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtta fazla iken, düşük yük şartlarında motorinden fazladır. Hidrokarbon miktarı en çok %50 doğalgaz ilaveli çift yakıt ve %50 motor yükü şartlarında görülmüştür.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır. [70] Ancak diğer taraftan, gaz yakıtın (CH₄) içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70].

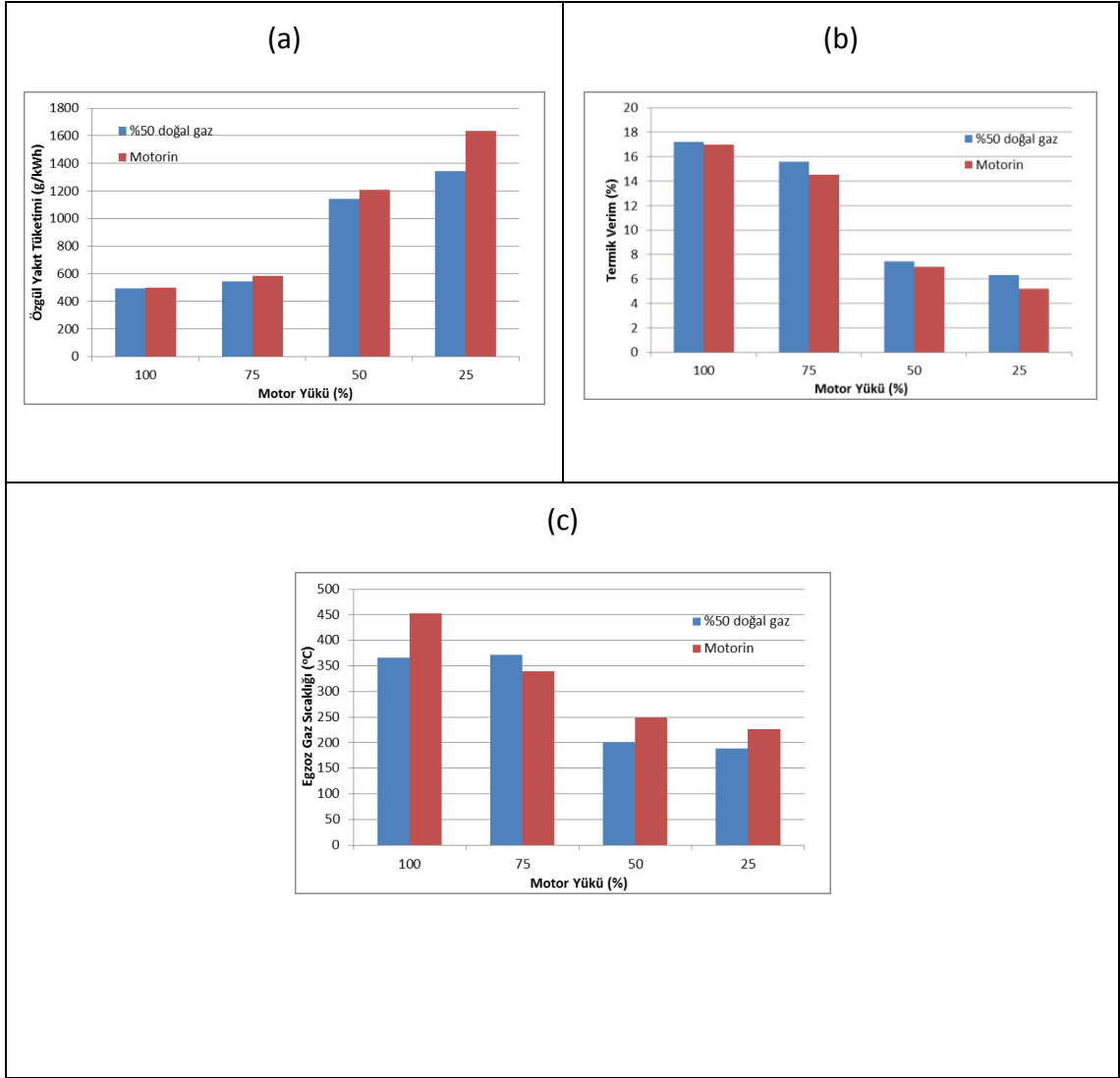
%50 doğalgaz ilaveli çift yakıt NO_x emisyonu düşük motor yükü şartlarında motorinden daha düşüktür.

Gaz yakıtın ilavesiyle daha fazla ısı ortaya çıkmış olsa da, daha homojen hava-yakıt karışımının kullanılmış olması, lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasını engellemiş ve NO_x emisyonunu düşürmüştür. Öte yandan, silindir cidarları gaz yakıt kullanımı sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış, gaz yakıt tüm yanma odasına dağılarak daha yüksek ısı salınımının açığa çıkmasına ve NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur. Birbirine zıt olan bu parametreler sonucu NO_x emisyonlarında artış, düşüş veya ciddi bir değişiklik meydana gelmemesi gözlemlenebilir [75].

Yalnız motorin yakıtı ile çalışma şartlarında açığa çıkan is miktarı, tüm motor yükü şartlarında doğalgaz ilaveli yakıtla çalışma şartından daha fazladır ve motor yükü azaldıkça iki yakıt tipinde de azalır.

Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH₄'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH₄ miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].

1400 d/d motor hızında, doğalgaz ilavesi ile CO miktarı bir tek tam yük şartında düşerken, diğer tüm yük şartlarında CO emisyonlarında artış görülmektedir. HC emisyonları da, doğalgaz ilavesi ile tüm motor yüklerinde artmaktadır. NO_x emisyonları ise, doğalgaz ilavesi ile sadece tam yük şartında artarken, diğer tüm yük şartlarında düşmektedir. 1500 d/d motor hızında ise, doğalgaz ilavesi ile tüm yük şartlarında CO ve HC emisyonları artmıştır. Özellikle HC emisyonlarında ciddi miktarda artış gözlemlenmiştir. Doğalgaz ilavesi ile %100 ve %75 yük şartlarında NO_x emisyonları artarken, diğer yük şartlarında ise düşüş gözlemlenmiştir. Is emisyonlarında da yine %100 ve %75 yük şartlarında doğalgaz ilavesi ile iyileşme gözlemlenirken, diğer yük şartlarında ise artış gözlemlenmiştir.

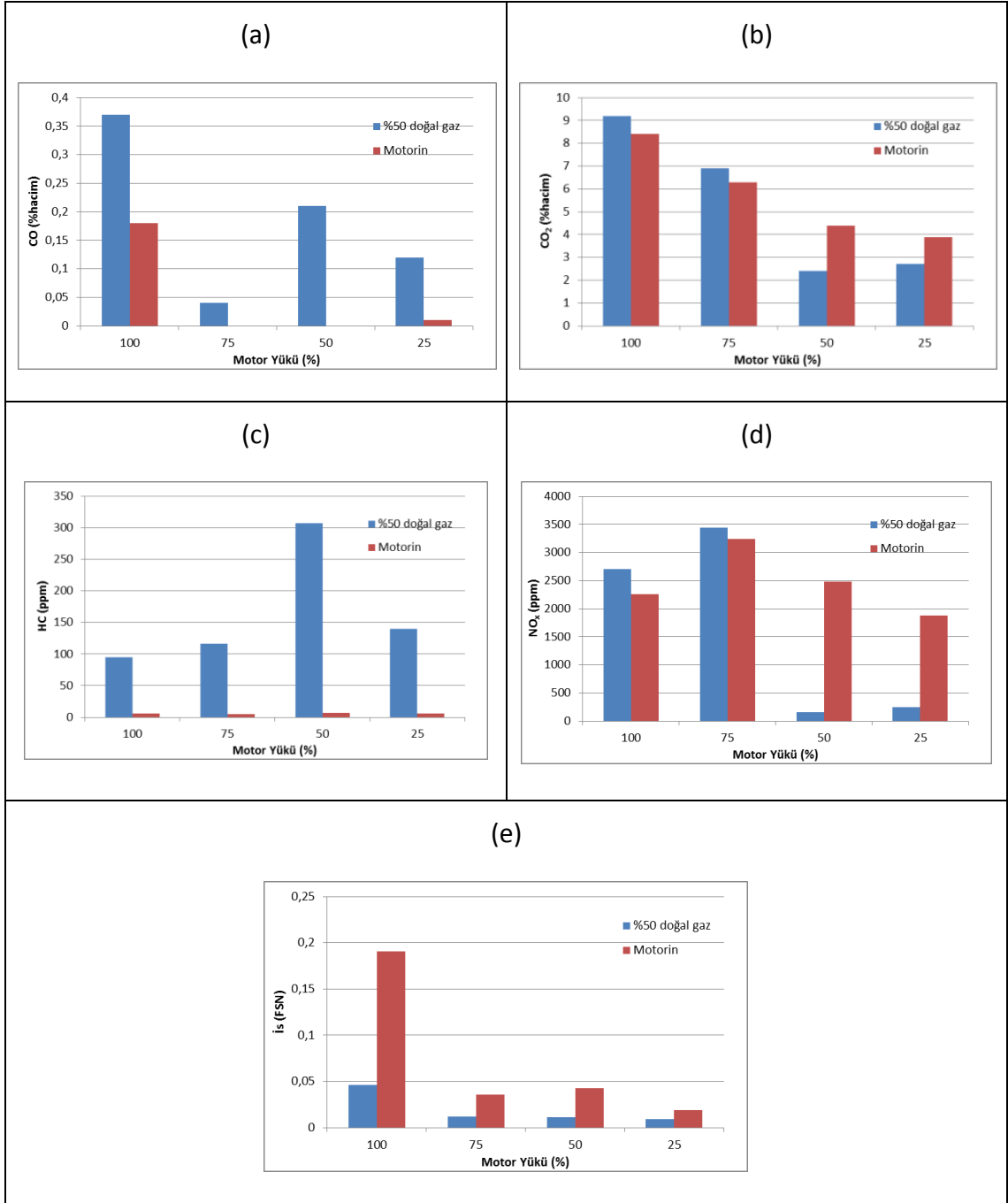


Şekil 4. 130 1300d/d motor hızı için motor performans sonuçları

(a)%25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde özgül yakıt tüketimi grafiği

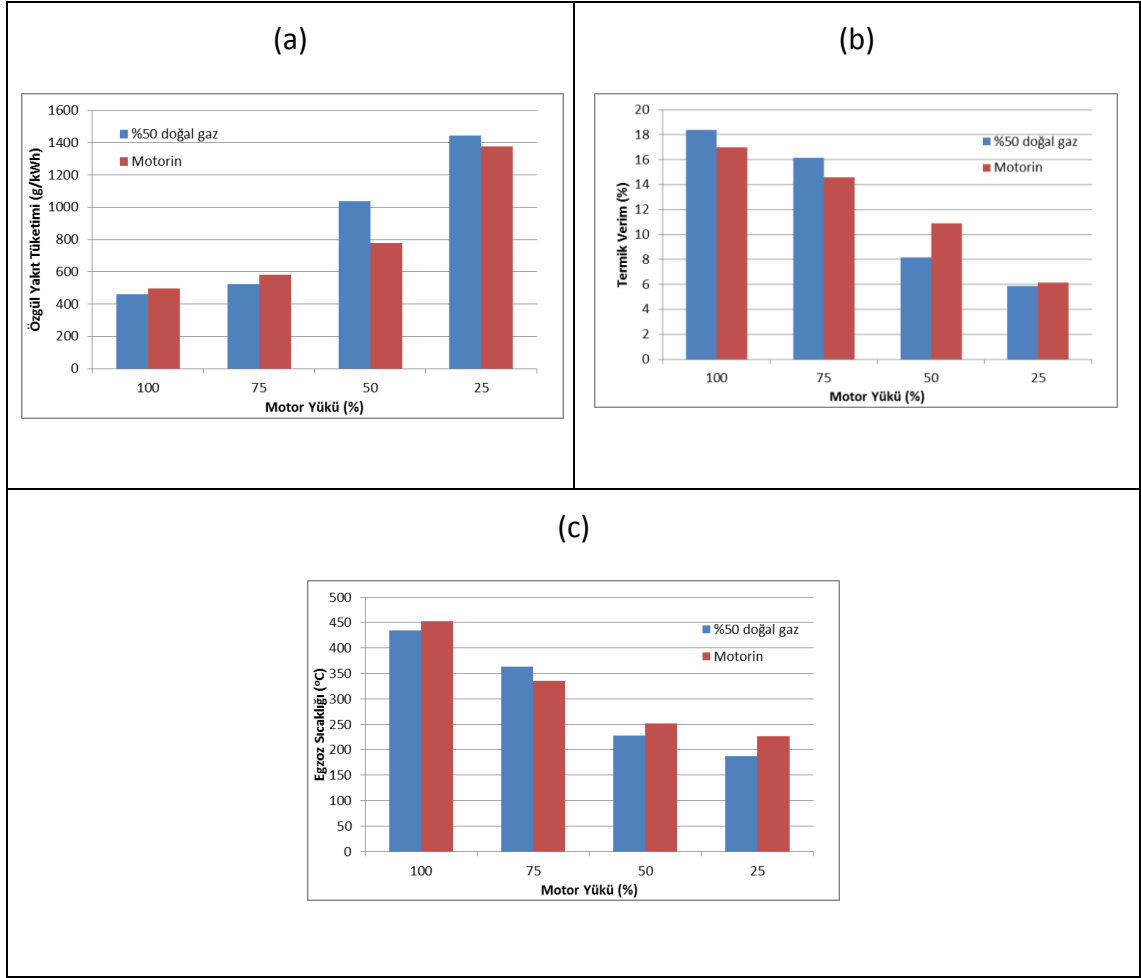
(b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde termik verim grafiği

(c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde egzoz sıcaklığı grafiği



Sekil 4. 131 1300d/d motor hızı için emisyon sonuçları

- (a)%25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO emisyonu grafiğı
 (b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO₂ emisyonu grafiğı
 (c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde HC emisyonu grafiğı
 (d) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde NO_x emisyonu grafiğı
 (e) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde is emisyonu grafiğı

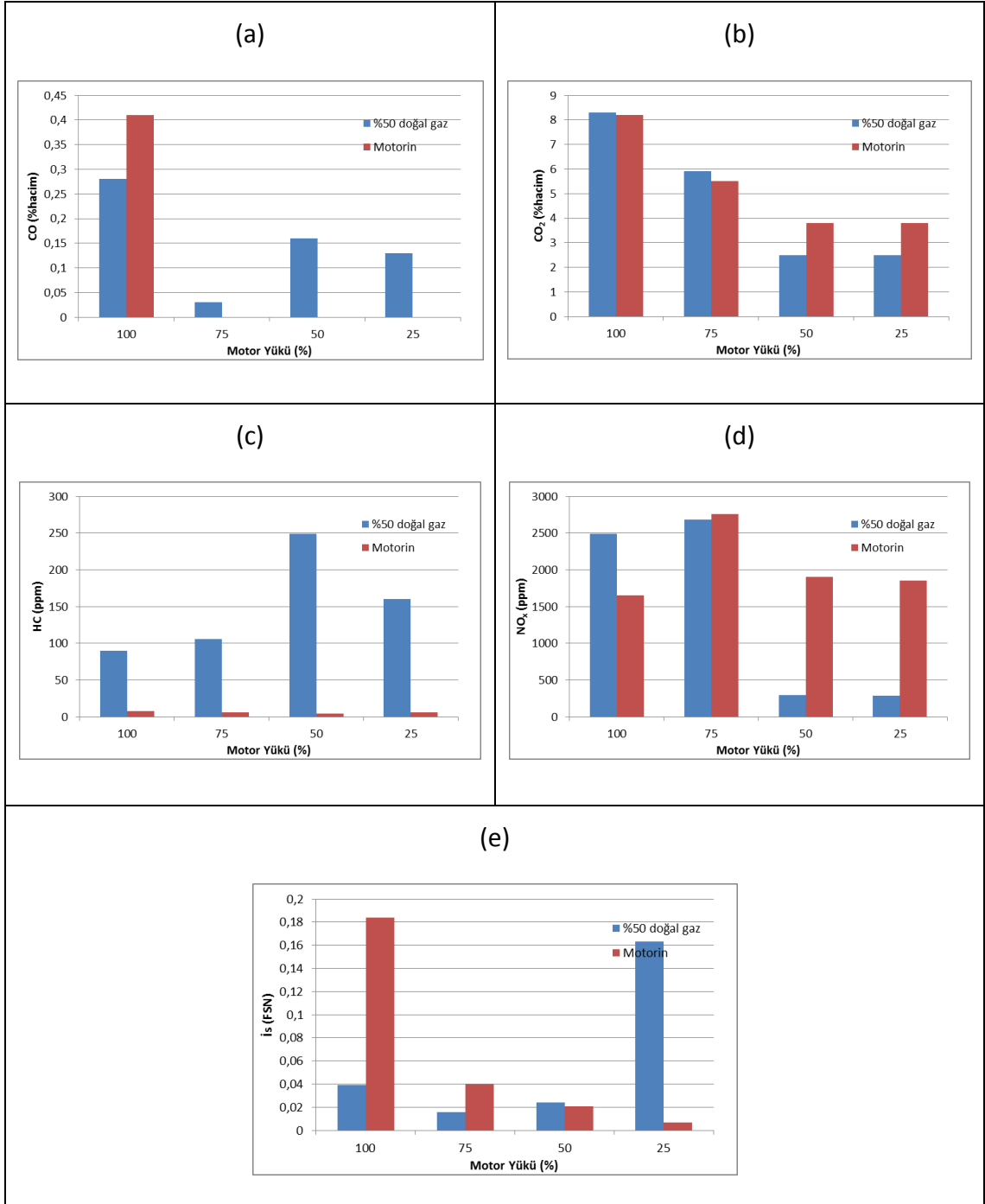


Şekil 4. 132 1400d/d motor hızı için motor performans sonuçları

(a) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde özgül yakıt tüketimi grafiğı

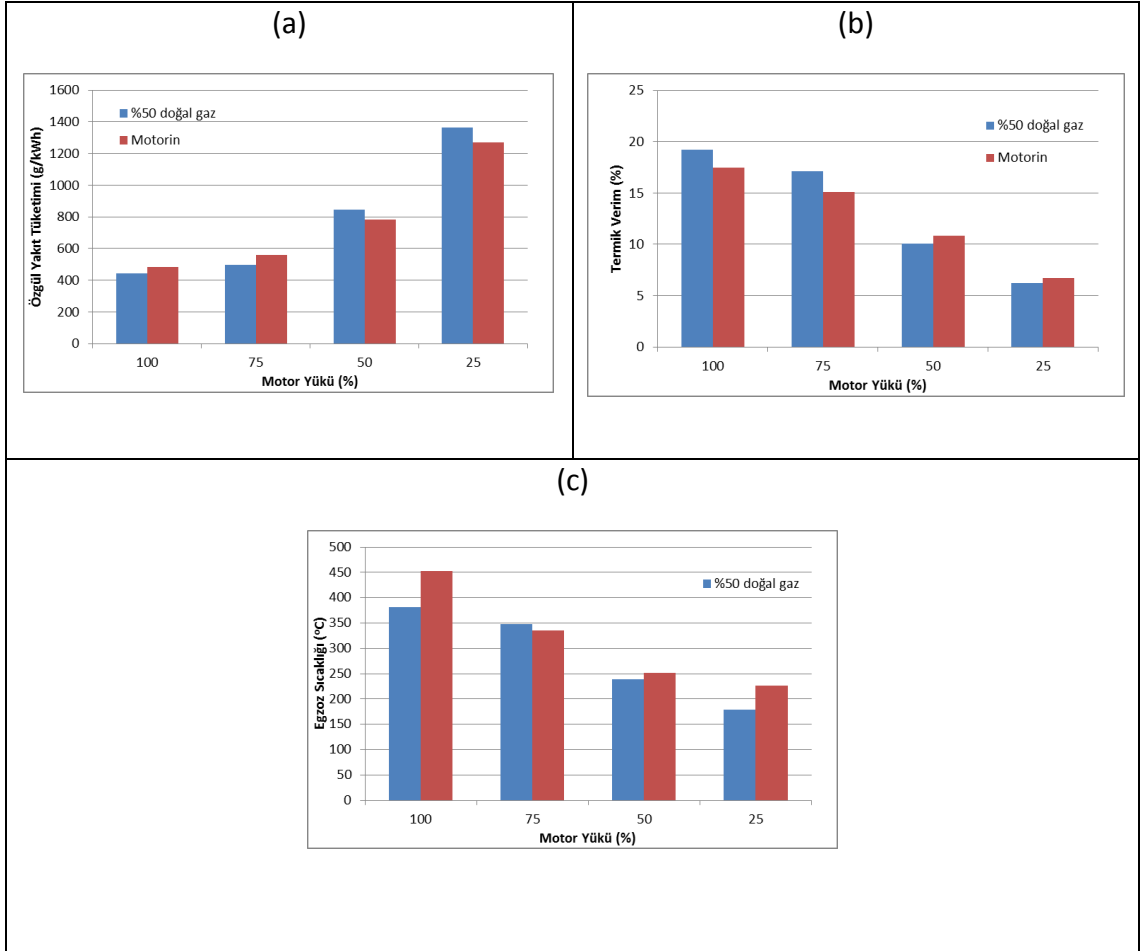
(b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde termik verim grafiğı

(c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde egzoz sıcaklığı grafiğı



Şekil 4. 133 1400d/d motor hızı için emisyon sonuçları

- (a)%25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO emisyonu grafiği
 (b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO₂ emisyonu grafiği
 (c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde HC emisyonu grafiği
 (d) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde NO_x emisyonu grafiği
 (e) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde is emisyonu grafiği

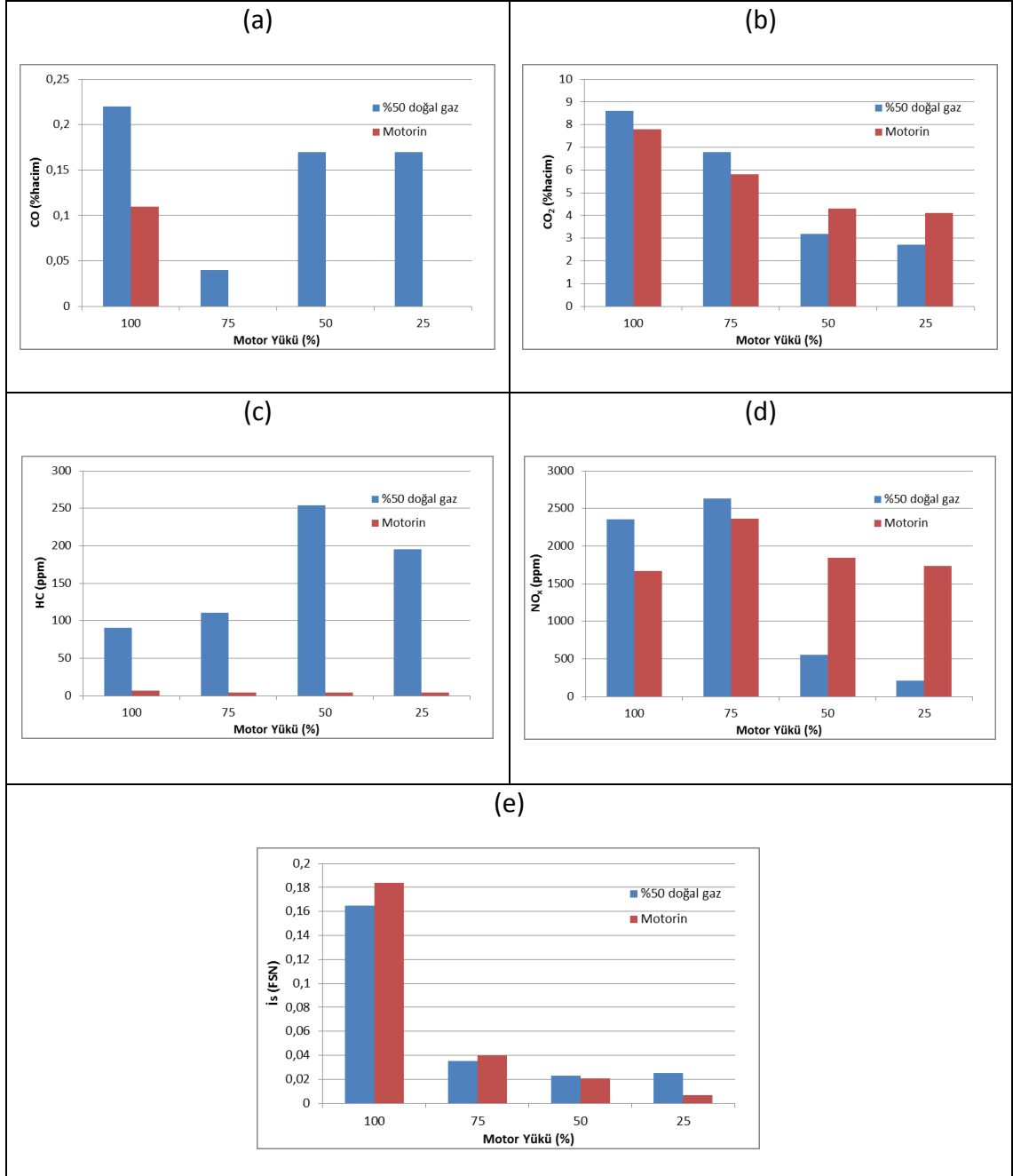


Şekil 4. 134 1500d/d motor hızı için motor performans sonuçları

(a) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde özgül yakıt tüketimi grafiği

(b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde termik verim grafiği

(c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde egzoz sıcaklığı grafiği



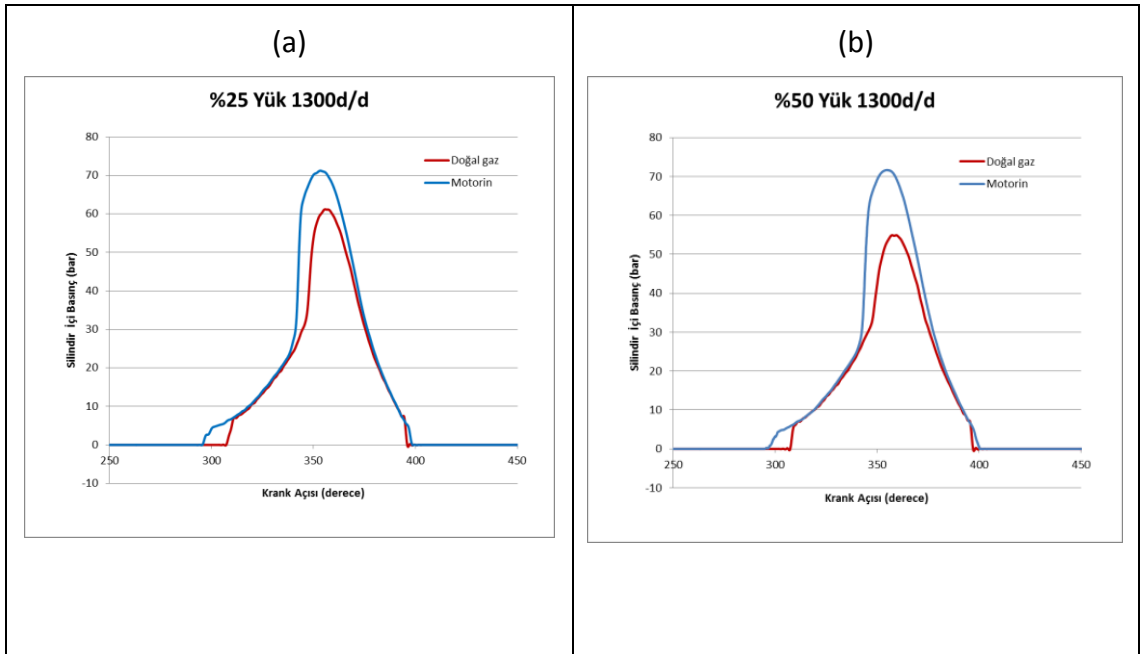
Şekil 4. 135 1500d/d motor hızı için emisyon sonuçları

- (a) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO emisyonu grafiğı
 (b) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde CO₂ emisyonu grafiğı
 (c) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde HC emisyonu grafiğı
 (d) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde NO_x emisyonu grafiğı
 (e) %25, %50, %75 ve %100 motor yüklerinde is emisyonu grafiğı

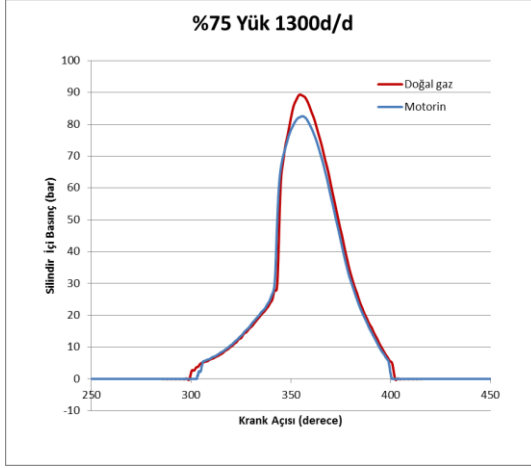
Şekil 4.136 ve Şekil 4.137’de sırasıyla, farklı motor hızı ve motor yüklerindeki silindir içi gaz basıncı değerleri ve ısı açığa çıkış oranı değerleri verilmiştir. Doğalgaz silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı yüksek motor yükü şartlarında motorin yakıtından fazla iken, düşük motor yükü şartlarında ise daha azdır.

Pilot püskürtmeyle gönderilen motorin miktarının çok düşük olması yanma süresinin uzamasına, yanma yoğunluğunun azalmasına ve dolayısıyla silindir içi basınçların düşmesine sebep olmaktadır [69]. Ancak, gaz yakıt kullanımında, motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha yüksek enerji açığa çıkmasını, gaz yakıtın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi gaz basıncı değerlerinin artmasını sağlamaktadır [69].

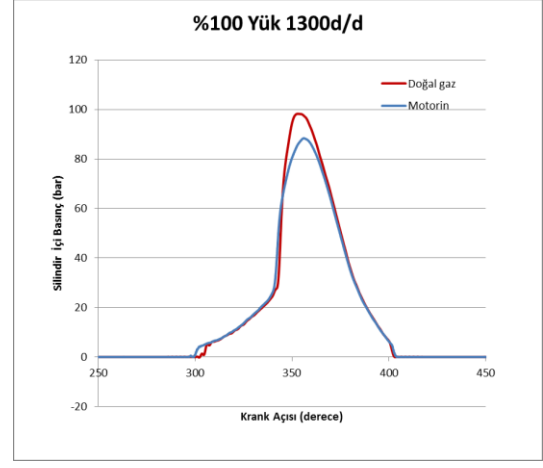
Gaz yakıt/hava karışımı olan dolgunun dizel gönderilmesiyle yanma merkezinde tutuşarak alev cephesinin ilerlemesini doğrudan etkilemektedir. Diğer taraftan motor yükünün artmasıyla silindir içi termal şartların ağırlaşmasıyla birlikte hava yakıt karışımının kontrolsüz yanma fazında yanma karakteristiği iyileşmektedir. Özellikle kontrolsüz yanma fazında daha fazla tutuşma enerjisi gönderilmesi doğalgazın büyük bölümünün kontrolsüz yanma fazında stabil bir şekilde yanmasını sağlayarak, silindir içi basınçların ve ısı açığa çıkış oranı değerlerinin artmasını sağlar [69].



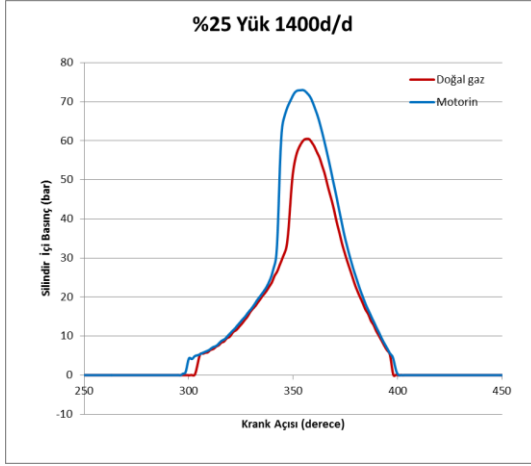
(c)



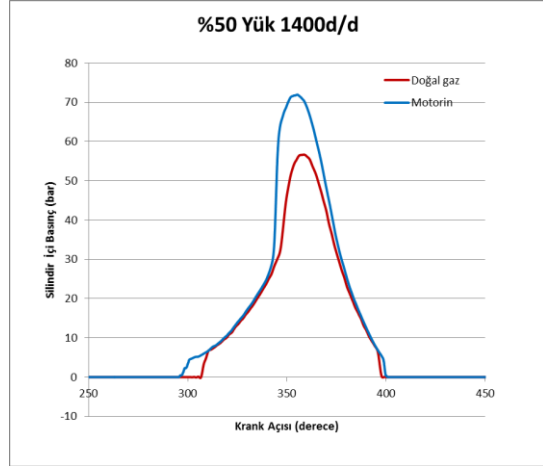
(d)



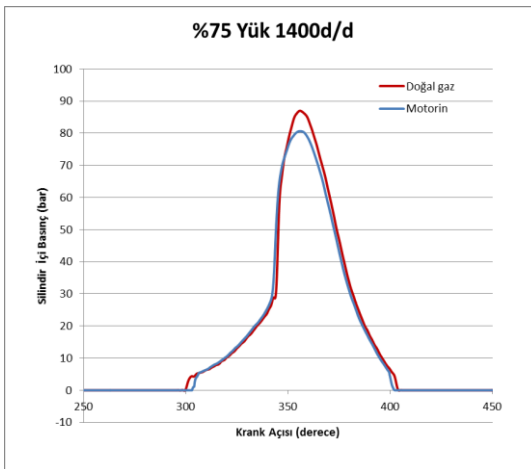
(e)



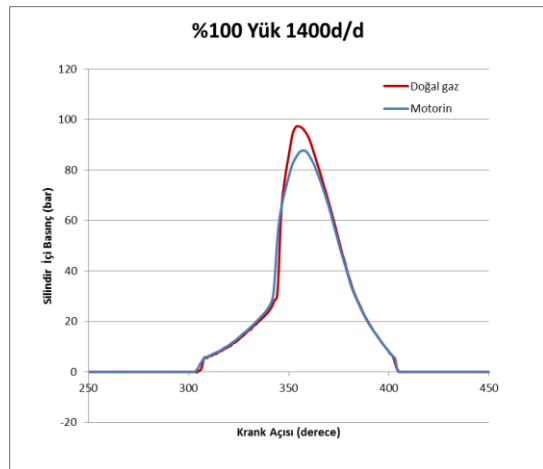
(f)

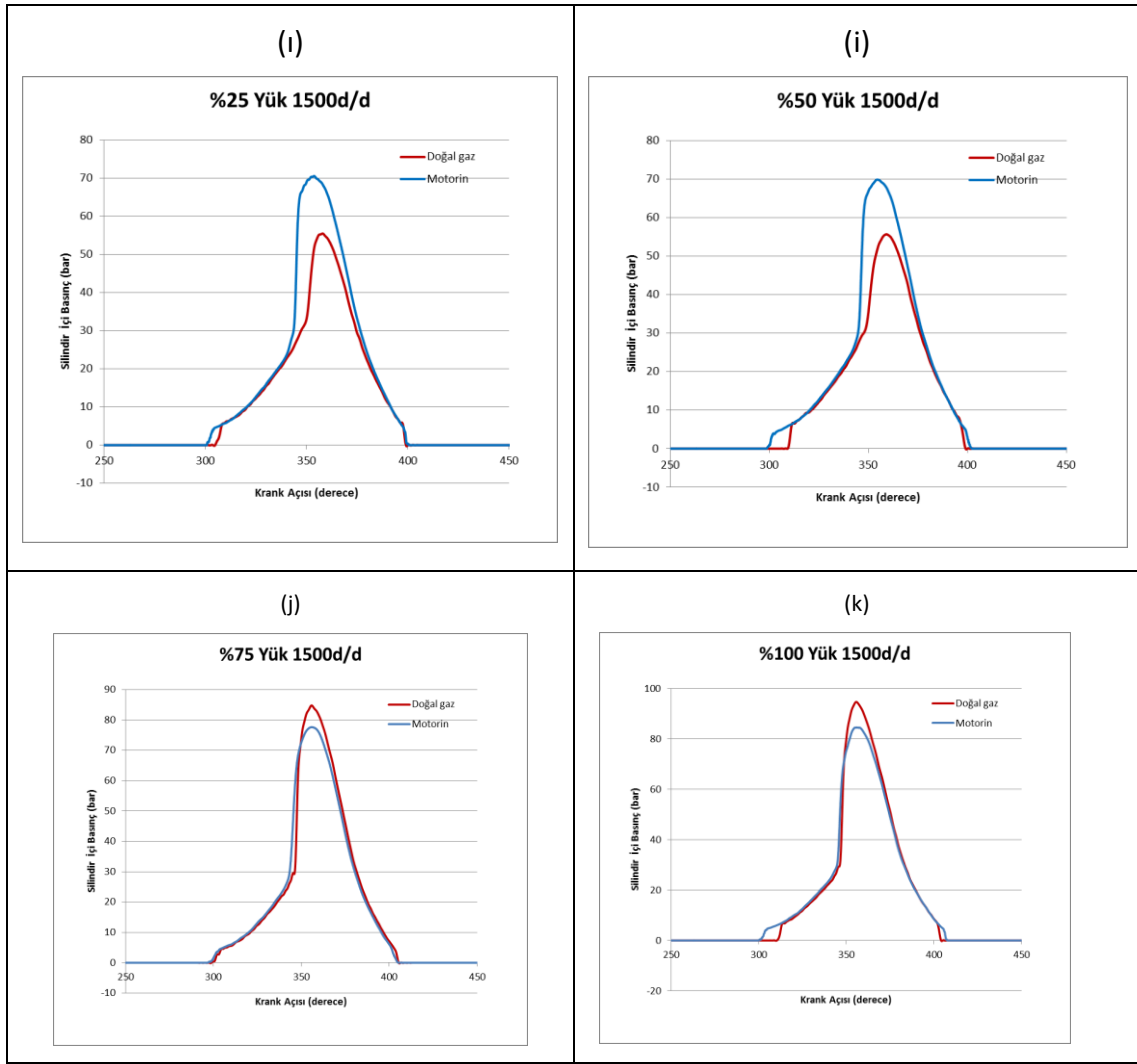


(g)



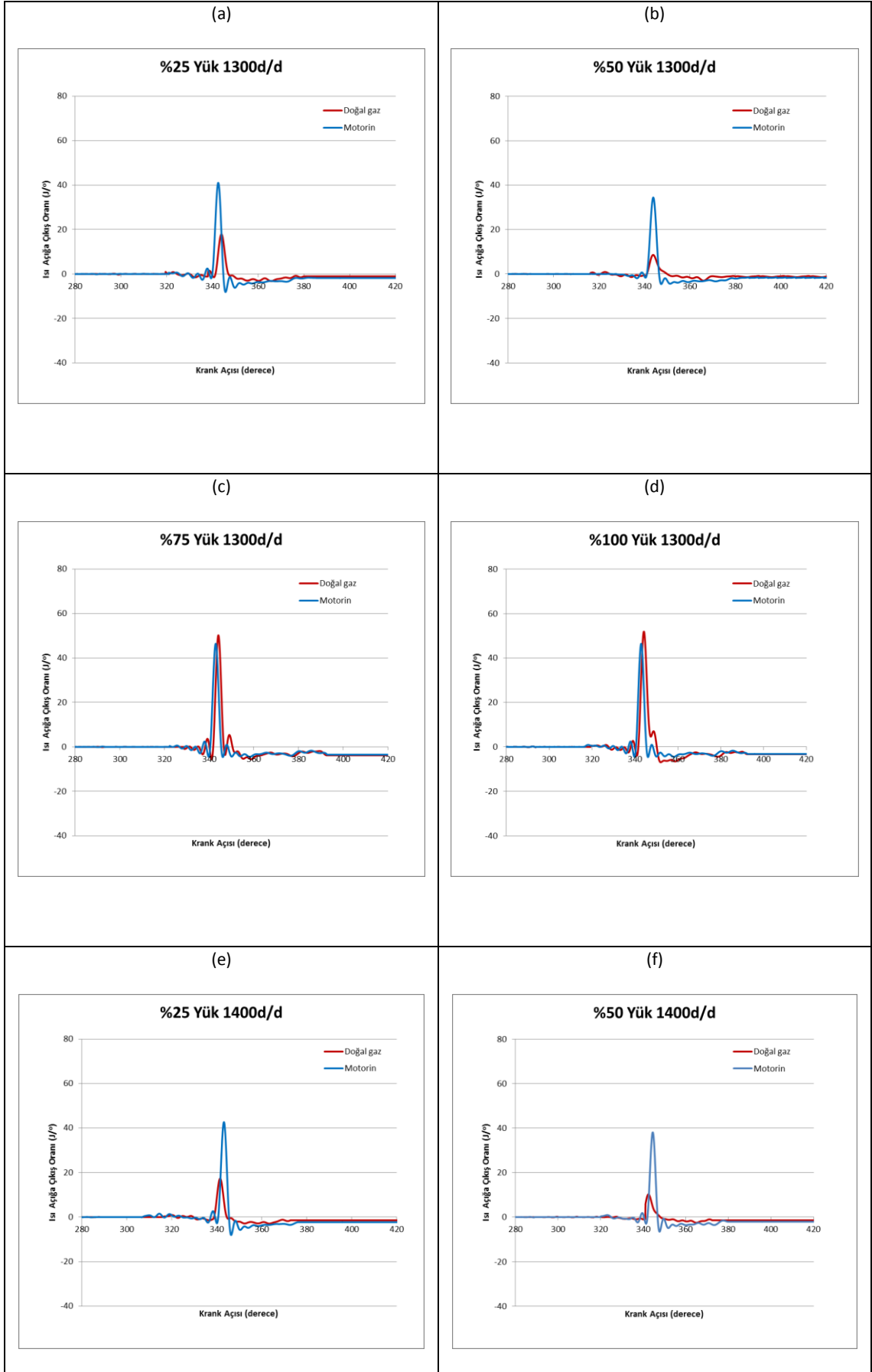
(h)

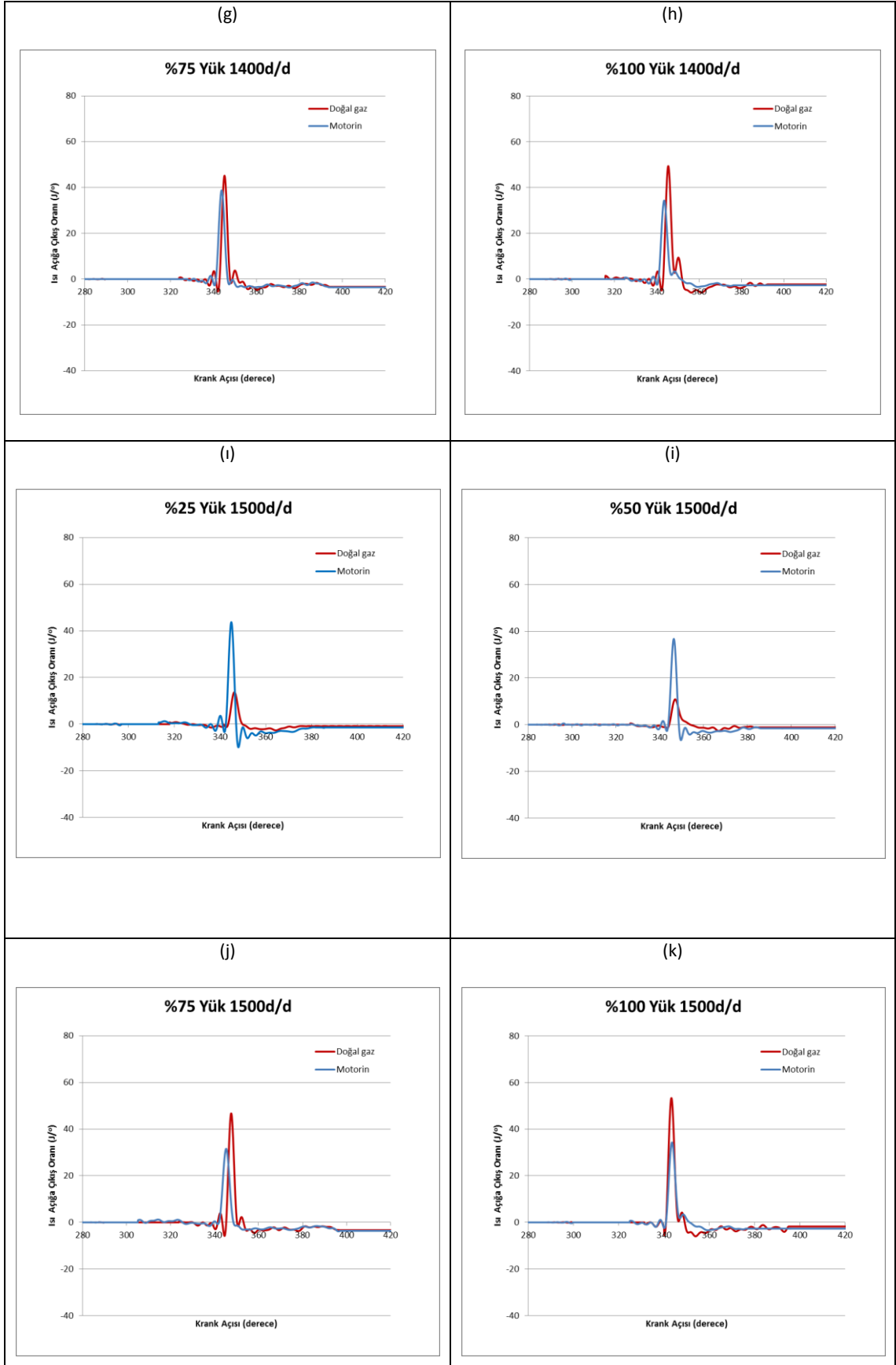




Şekil 4. 136 Farklı motor yüklerinde silindir içi gaz basıncı karakteristikleri

- (a) 1300d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (b) 1300d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (c) 1300d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (d) 1300d/d motor hızı ve %100 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (e) 1400d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (f) 1400d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (g) 1400d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (h) 1400d/d motor hızı ve %100 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (i) 1500d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (j) 1500d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (k) 1500d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi





Şekil 4. 137 Farklı motor yüklerinde ısı aıća çıkış oranı karakteristikleri

- (a) 1300d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (b) 1300d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (c) 1300d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (d) 1300d/d motor hızı ve %100 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (e) 1400d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 1400d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 1400d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 1400d/d motor hızı ve %100 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (i) 1500d/d motor hızı ve %25 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (j) 1500d/d motor hızı ve %50 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (k) 1500d/d motor hızı ve %75 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (l) 1500d/d motor hızı ve %100 motor yükü şartında common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi.

Elde edilen sonuçlardan, %50 gaz yakıt ilavesi ile tam yük şartında yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarında artış gözlemlenirken, özellikle kısmi yüklerde NO_x emisyonlarında ciddi miktarda düşüş meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Özellikle kısmi yüklerde gaz yakıt ilavesiyle, hem NO_x, hem de is emisyonlarında düşüş meydana gelmesi, daha yüksek emisyon regülasyonları karşılanabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, doğalgaz ilavesi ile kısmi yüklerde bazen is emisyonlarında artış olduğu gözlemlense de, motorun is emisyonu değerlerinin yalnız motorin kullanıldığı şartlarda dahi oldukça düşük, regülasyonların altında olmasından dolayı, is emisyonlarındaki artış önemsizdir. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 11 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 20 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 3 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %105.5 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 22 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 43 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 22 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 15 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %86.7 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %93.8 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %6.1 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %19.5 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık 4 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %74.4 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %66.7 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %75.9 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 12 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 15 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 2 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %31.7 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 26 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 61 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 17 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 10 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %84.5 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %84.6 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %2.6 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %50.6 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık 22 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %14.3 oranında arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %60 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %78.8 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 16 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 16 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 3 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %100 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 48 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 63 kat arttığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 27 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 12 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %87.7 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %70 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %11.2 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %41.5 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık 7 kat arttığı, %50 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %73.9 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %40 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) doğalgaz ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %60.6 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

4.2.6.9 ESC Çevrimine Göre Rölanti Şartında Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Doğalgaz-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.138’de motor performansı ve motor emisyonu grafikleri verilmiştir. Rölanti şartında, %50 doğalgaz ilaveli çift yakıt ile yalnız motorin yakıtı incelendiğinde; %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtın motor gücü ve motor torku, yalnız motorin yakıtı motor gücü ve motor torkuna göre daha düşüktür. Özgül yakıt tüketimi ise %50 doğalgaz

ilavesi ile artış göstermiştir. Termik verim yüzdesi yalnız motorin yakıtında %50 doğalgaz ilaveli çift yakıta göre daha fazladır. %50 doğalgaz ilaveli doğalgaz-motorin çift yakıtının egzoz çıkış sıcaklığı, yalnız motorin yakıtına göre daha fazladır.

Gaz yakıtın yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığıyla, gaz konsantrasyonu yüksek olsa dahi alev ilerlemesini ve kendi kendine tutuşmayı kötüleştirmektedir [63]. Pilot püskürtmeyle gönderilen dizel yakıtının düşmesi özellikle kısmi yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur [74].

Karbon monoksit miktarı doğalgaz ilavesi ile artış göstermiştir.

Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, motor yükü arttıkça CO emisyonu azalmaktadır, ama yine de dizel-gaz yakıt (doğalgaz) kullanımında açığa çıkan CO miktarı, sadece dizel kullanıldığı durumlara göre çok yüksektir. Özellikle düşük yüklerde, sıcaklık çok artmadığı için efektif yanma sağlanamamakta ve emisyon artmaktadır.

Yalnız motorin yakıtının karbondioksit miktarı, %50 doğalgaz ilaveli çift yakıta göre azalmaktadır.

Gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70]. Diğer taraftan, düşük yüklerde gaz yakıt ilavesiyle yanma veriminin daha da düşmesi bu durumda etkilidir.

%50 doğalgaz ilaveli doğalgaz-motorin çift yakıtının hidrokarbon miktarı, yalnız motorin hidrokarbon miktarından yaklaşık 3 kat daha fazladır.

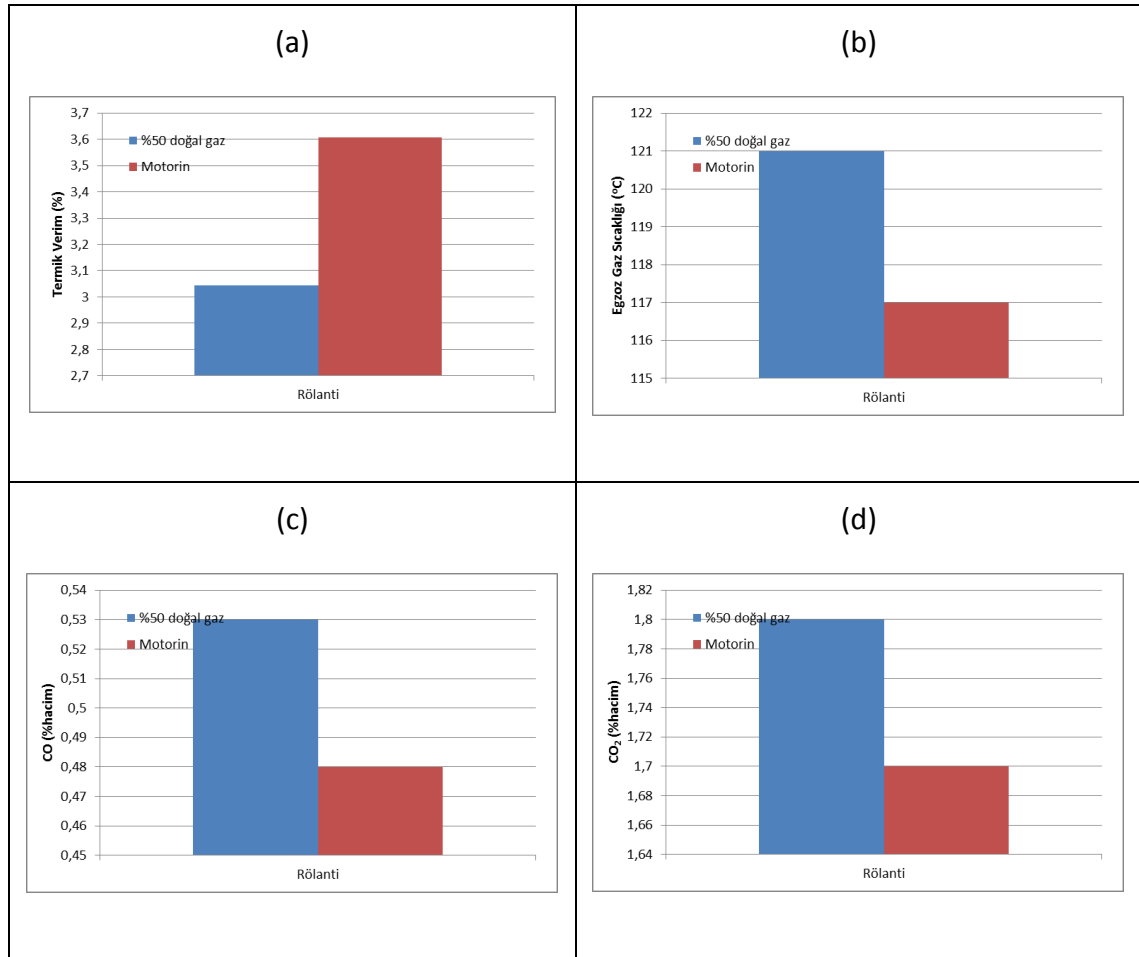
Düşük yüklerde ilave yakıt olarak kullanılan metan oranının artması sebebiyle HC emisyonu artışı çok fazlayken; yüksek yüklerde daha az artış görülmektedir. Tam motor yükü ve basınçta yanma daha iyi gerçekleştiğinden dolayı HC emisyonunda daha az artış görülmektedir. Özellikle düşük yüklerde, önemli miktarda gaz yakıt yanmaya katılmayarak, egzozdan atılmaktadır. Yük arttıkça gaz yakıtın aleve katılımı arttığı için, açığa çıkan emisyon miktarı azalmaktadır. Yük miktarı arttıkça, hava/yakıt oranı stokiometriye yaklaştıkça, alev ilerleme mekanizması iyileşerek, yanmamış HC miktarı artışı azalmaktadır [62].

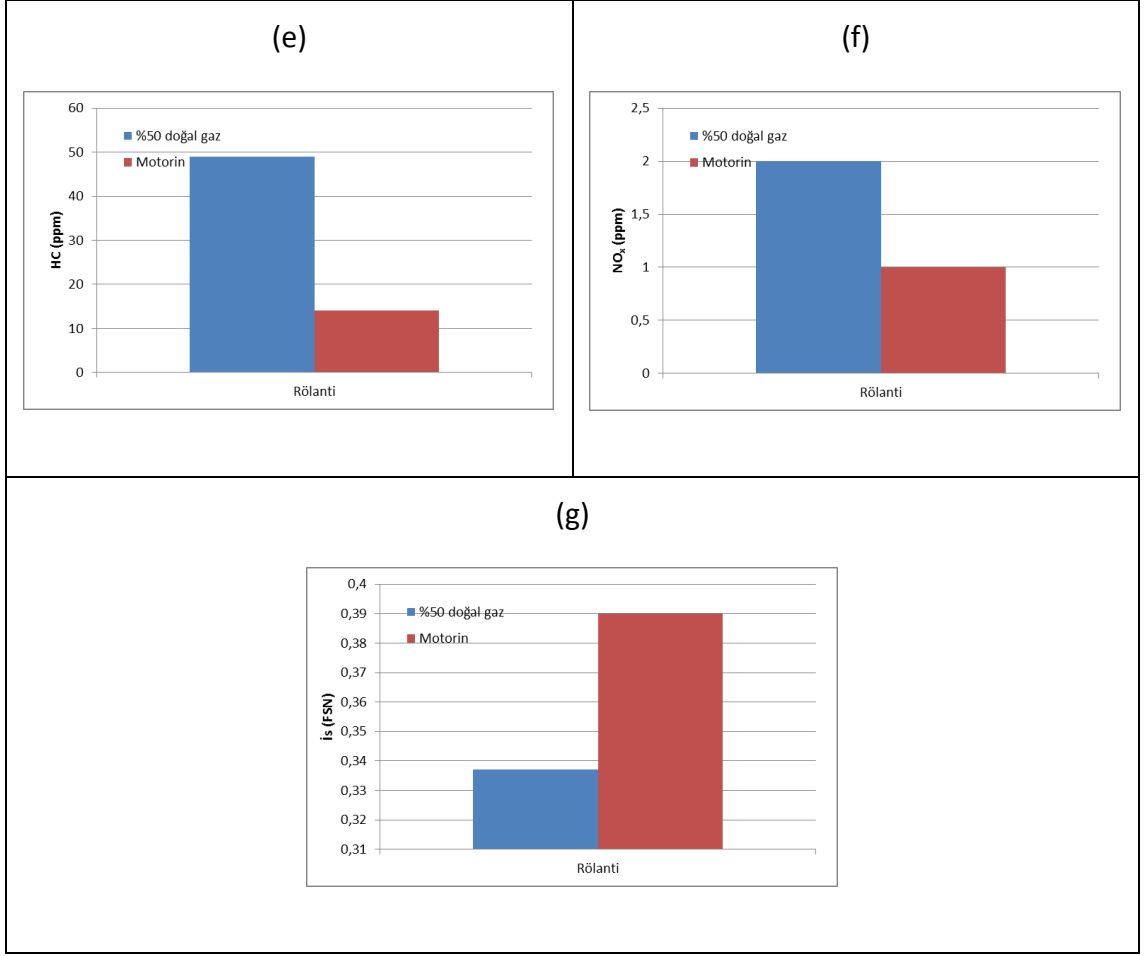
NO_x emisyonu ise %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yaklaşık 2 kat daha fazladır.

Gaz yakıt ilavesiyle, artan alev sıcaklığından dolayı ise NO formasyonu yükselmektedir. Yalnızca metan karışimli gaz yakıt kullanımında motorine göre yüksek alev sıcaklığı nedeniyle daha fazla NO oluşmaktadır. NO formasyonu hava fazlalık katsayısına bağlı değişim göstermektedir. Özellikle stokiyometrik şartlarda en yüksek NO değeri oluşmaktadır. Ancak, dizel motorlar fakir yakıtla çalıştığı için emisyon sonuçları yine hava fazlalık katsayısına bağlı değişmektedir [68].

İs miktarı ise %50 doğalgaz ilaveli çift yakıtta yalnız motorin yakıtına göre daha azdır.

CH₄, dizel yakıtından daha az karbon içerdiği için is emisyonu daha fazla azalmaktadır. CH₄ gazı emme manifoldundan gönderildiğinde, hava ile daha homojen karıştığından, daha az yakıt içeri püskürtülerek daha verimli yanma elde edilebilmektedir [75].





Şekil 4. 138 Rölanti şartında motor performans ve emisyon karakteristiği sonuçları

- (a) Rölanti şartında termik verim grafiği
- (b) Rölanti şartında egzoz sıcaklığı grafiği
- (c) Rölanti şartında CO emisyonu grafiği
- (d) Rölanti şartında CO₂ emisyonu grafiği
- (e) Rölanti şartında HC emisyonu grafiği
- (f) Rölanti şartında NO_x emisyonu grafiği
- (g) Rölanti şartında is emisyonu grafiği

Elde edilen sonuçlardan, rölanti şartında doğalgaz ilavesi ile yalnız motorin yakıtına göre, CO emisyonunun %10.4 oranında arttığı, HC emisyonunun 2.5 kat oranında arttığı, is emisyonunda ise %13.5 düşüş meydana geldiği sonucuna varılmıştır. NO_x emisyonu artmış olmasına rağmen, doğalgaz ilaveli şartta yalnızca 2 ppm değeri okunmasından dolayı, meydana gelen artış ihmal edilebilecek değerdedir.

4.2.6.10 ESC Çevrimine Göre 1300d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H₂+%90CH₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.139’te motor performansı ve motor emisyonu grafikleri verilmiştir. Motor gücü en fazla enerji içeriği olarak %15 gaz yakıt ilavesinde elde edilmiştir. Yine en yüksek motor torku da %15 gaz/motorin çift yakıtı kullanılmasında elde edilmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise doğalgaz içeriği ile düşüş göstermiş ve en düşük termik verim %40 gaz yakıt ilavesinde gözlemlenmiştir. %15 gaz yakıt ilavesinde egzoz çıkış sıcaklığı en yüksektir.

Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır [63].

Karbon monoksit miktarı %15 ve %75 gaz ilavesinde düşüş gösterirken, %40 gaz yakıt ilavesinde 2 katından fazla olmuştur.

Gaz yakıt oranı arttıkça düşen silindir içi sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu, CO emisyonunda ciddi artışa sebebiyet vermektedir. Yüksek motor hızlarında yanma süresinin kısılması, oksijen erişebilirliğini azaltarak CO miktarını daha da artırmaktadır [62].

Karbondioksit miktarı gaz yakıt ilavesiyle artmış ve %15 enerji içeriği olarak gaz ilavesinde en yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlarda, termik verimin düşmesi ve de hidrojenin karbon içermemesi ve metanın düşük C/H oranı sebebiyle, CO₂ emisyonlarının düşmesi beklenirken, motor gücünün de arttığı göz önünde bulundurulduğunda, esasında özgül emisyonlarda ciddi bir artış meydana gelmediği öngörülmektedir.

Hidrokarbon oranı ise gaz yakıtın enerji içeriği artışıyla paralel olarak artmıştır.

Fakir karışım da alev sönmeye bölgeleri arttığı için özellikle silindir cidarlarına temas eden bölgelerde eksik yanma meydana gelmekte ve bu da HC emisyonlarını arttırmaktadır. Küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle yanması zorlaştığı için HC emisyonu artmaktadır [74].

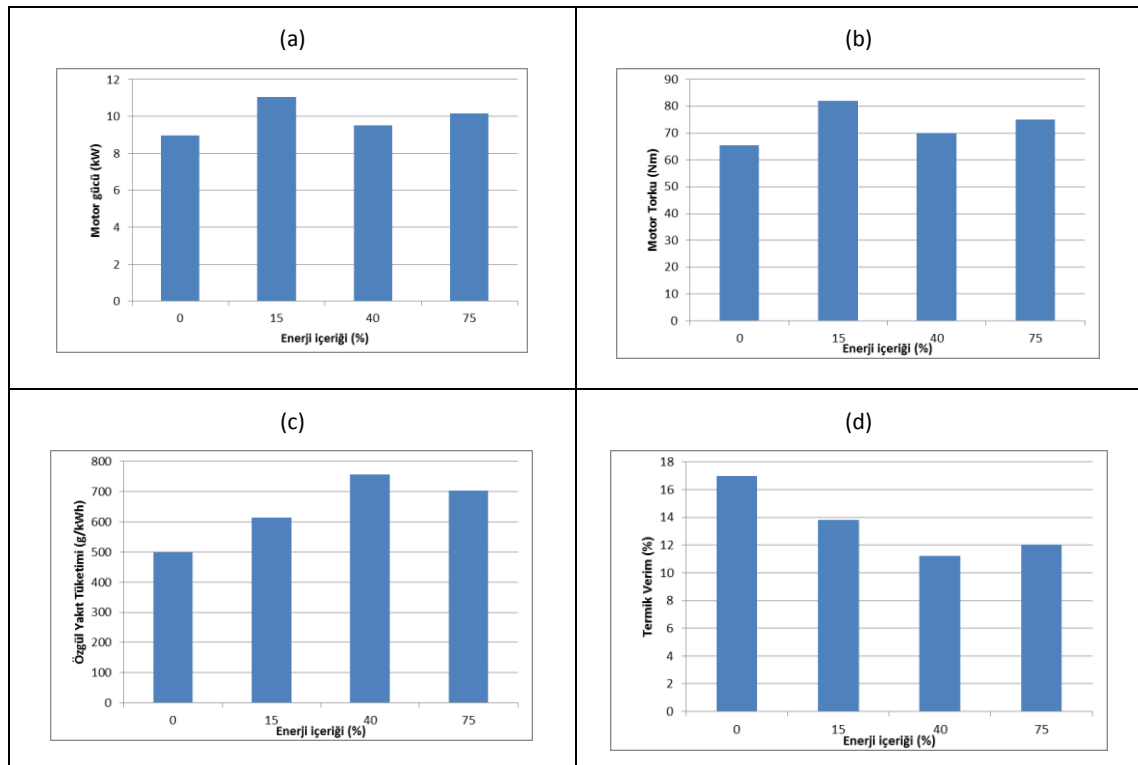
NO_x emisyonları ise %15 gaz yakıt ilavesi hariç, diğer gaz yakıt ilavelerinde yalnız motorin yakıtına göre daha fazladır.

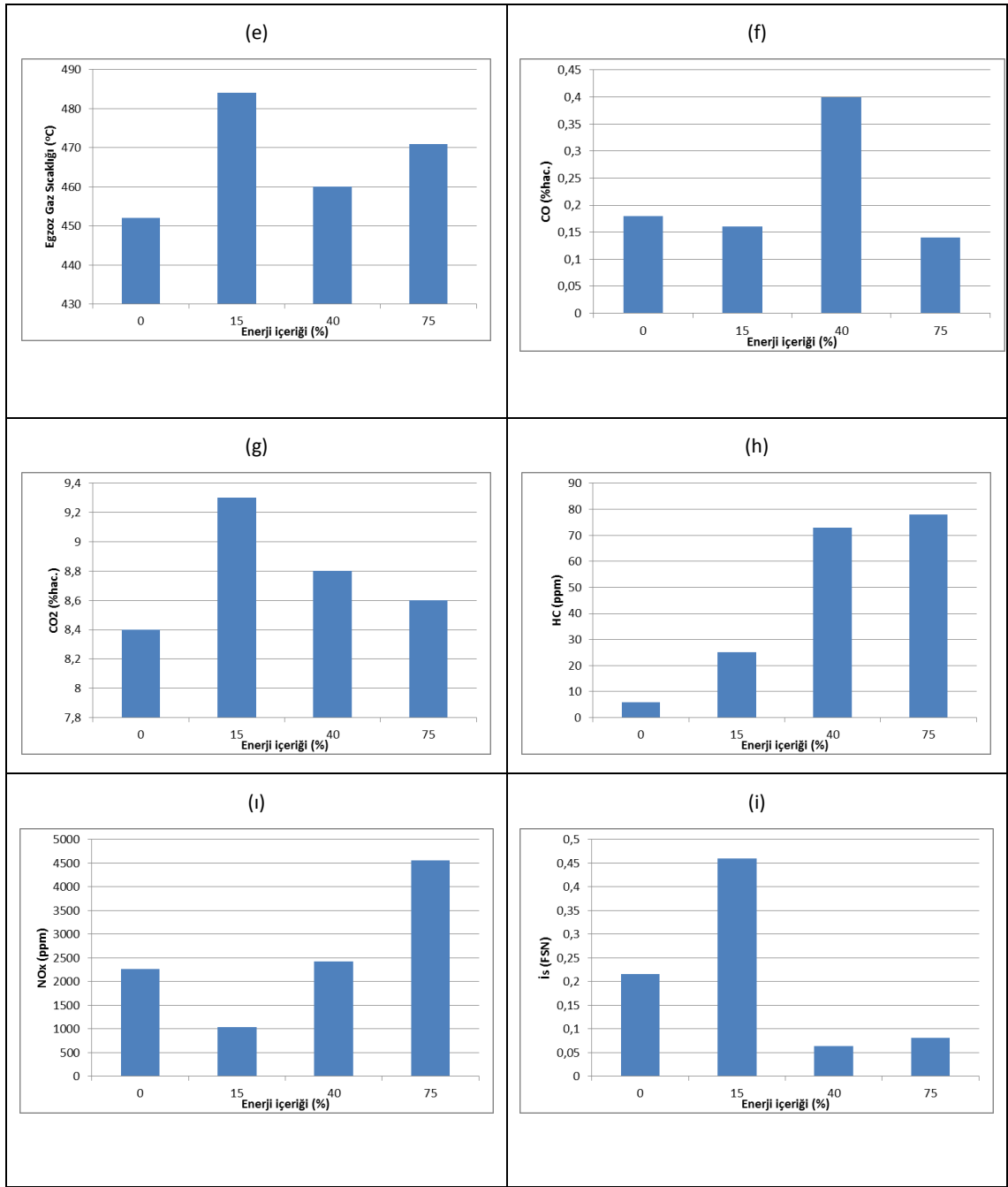
Mansor vd. [68] H₂ ve CH₄ gazları karışımı ve motorini dizel bir motorda kullanmıştır. İlave alternatif yakıt olarak kullanılan H₂'nin oranının artmasıyla NO emisyonu değeri artmaktadır. Motorin oranı arttıkça ise azalmaktadır. Çünkü, H₂'nin artmasıyla, motorin oranının da azalmasıyla, silindir içi sıcaklıklar artmaktadır. CH₄ ile motorin karışımı yakıt kullanıldığında ise yalnız motorin kullanılan durumdan daha fazla NO emisyonu oluşmaktadır, çünkü yine saf yakıttan daha fazla silindir içi sıcaklık oluşmaktadır [68].

NO_x emisyonlarının silindir içi sıcaklığına ve lokal hava fazlalık katsayısına bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu nedenle, yalnızca silindir içi sıcaklıkların arttığı püskürtme avansları aralığında yüksek emisyon değerleri görülmektedir [64].

İs miktarı ise %40 ve %75 gaz yakıt ilavesinde büyük azalma gösterirken, %15 gaz yakıt ilavesinde 2 katı civarında artış göstermiştir.

Hernandez vd. [63] yapmış olduğu çalışmada, farklı gaz yakıtlarla yapılan çalışmalarda is oluşumunu en çok azaltan gazın H₂ olduğu, en az etkileyenin de (yine de önemli miktarda iyileşme sağlıyor) CH₄ olduğu görülmektedir [63].





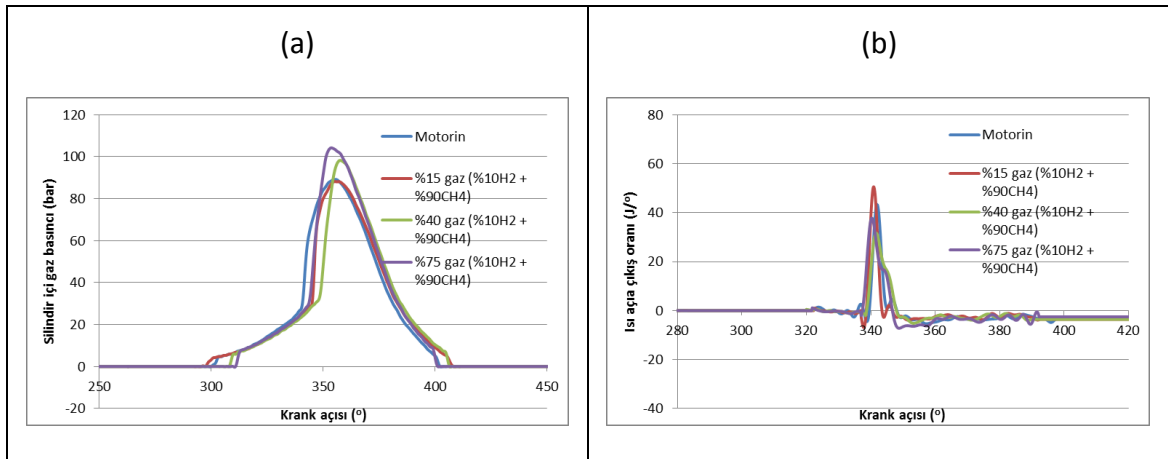
Şekil 4. 139 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
 (b) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi,
 (c) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
 (d) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
 (e) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.140'da silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı miktarı %75 gaz içerikli yakıtta en fazladır. Isı açığa çıkma oranı gaz yakıt ilavesinde genelde düşerken, %15 gaz yakıt ilavesinde yükselmiştir. Daha fazla H₂ içeren gaz yakıtlar daha fazla reaktiflik ve H radikali içermektedirler. Bu nedenle bu

yakıtların kullanımında, karışımın basınç ve sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. [66] CH_4 ilavesinde, CH_4 'ün gaz yakıt olmasından dolayı yakıt homojenliği saf dizelin kullanımına göre daha fazladır. CH_4 kullanımında alev hızı H_2 'ye göre daha düşük olsa da saf dizele göre daha yüksektir. CH_4 'ün kullanılması, H_2 'nin kontrolsüz yanmayı arttırıcı özelliğini baskılaması nedeniyle önemlidir. Gaz yakıtlarda silindir basıncının artmasının temel nedeni daha yüksek özgül enerji içeriğine ve daha yüksek alev hızına sahip olmalarıdır. Gaz yakıtlar kontrolsüz yanma fazındaki açığa çıkan enerjiyi arttırmaktadırlar. Daha uzun bir kontrolsüz yanma ve daha kısa kontrollü yanma fazı açığa çıkmaktadır [68].

Mansor vd. [68] elde ettiği sonuçlara göre, hidrojenin diğer alternatif gaz yakıtlara göre daha reaktif bir yakıt olması ve tutuşma gecikmesinin azaltıp yanmanın iyileşmesi sebebiyle, hidrojen oranının artmasıyla en yüksek silindir içi basınç değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 140 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri

(a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
(b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, gaz yakıtın enerji içeriği olarak artmasıyla, %75 enerji içeriği değerinde NO_x emisyonlarında ciddi bir miktar artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, gaz yakıt karışımında hidrojen ilavesiyle, CO ve HC emisyonlarındaki artışın, yalnız doğalgaz yakıtı ilavesine göre azaldığı sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %15 gaz yakıt ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %23.5 oranında arttığı, %40 gaz yakıt ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %6.3 oranında arttığı, %75 gaz yakıt ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %13.4 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 gaz yakıt ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %54.2 oranında azaldığı, %40 gaz yakıt ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %7.4 oranında arttığı, %75 gaz yakıt ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %101.5 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 gaz yakıt ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %140.8 oranında arttığı, %40 gaz yakıt ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %67 oranında azaldığı, %75 gaz yakıt ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %57.6 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 gaz yakıt ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %11.1 oranında azaldığı, %40 gaz yakıt ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %122.2 oranında arttığı, %75 gaz yakıt ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %22.2 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 gaz yakıt ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre 3 kat arttığı, %40 gaz yakıt ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 11 kat arttığı, %75 gaz yakıt ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 12 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

4.2.6.11 ESC Çevrimine Göre 1500d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H₂+%90CH₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.141’de motor performansı ve emisyon grafikleri verilmiştir. Motor gücü ve motor torkunda gaz yakıt ilavesi ile artış gözlemlenirken, en yüksek verileri %15 gaz yakıt ilavesinde görülmüştür. Özgül yakıt tüketiminde gaz yakıt ilavesi ile düşüş gözlemlenmiştir. Termik verim değeri ise genel olarak gaz ilavesi ile yükselmiştir.

Gaz yakıt hava karışımında, gaz yakıt miktarı arttıkça hava fazlalık katsayısı aşırı fakirden zengine doğru yaklaşacağı için silindir içi sıcaklıklar artar ve özgül yakıt tüketimi düşer [74].

Motor yükü arttıkça silindir içi sıcaklıklar artarak, silindir içerisindeki fakir bölgelerde yanmayı daha gerçekleştirebilir hale getirerek, daha uzun püskürtme süresi, dizel alevine gaz yakıtın da katılmasını sağlayarak termik verimi arttırmaktadır [63].

Egzoz çıkış sıcaklığında ise gaz ilavesi ile ufak düşüşler gözlemlenmiştir. Karbon monoksit miktarı en fazla %40 gaz yakıt/motorin karışım yakıtı çalışma şartında görülmüştür.

Gaz yakıt oranı arttıkça düşen silindir içi sıcaklığı ve oksijen konsantrasyonu, CO emisyonunda ciddi artışa sebebiyet vermektedir [62]. Ancak, gaz yakıttaki H₂ bulunması sebebiyle, OH ve O radikalleri eksik yanmayı tamamlayarak yanma stabilitesini artırmakta ve CO emisyonlarını düşürmektedir [68].

Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, katalitik susturucu kullanıldığında dizel-gaz yakıt çiftinin CO emisyonu tüm yüklerde motorinin altına düşürülmektedir. Oksidasyon katalistinin kullanımında, özellikle orta ve yüksek yüklerde CO emisyonlarını sıfıra yakın olacak kadar azalttığı görülmektedir [70].

Gaz yakıt ilavesi ile karbondioksit oranında büyük artışlar gözlemlenmiştir. CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70].

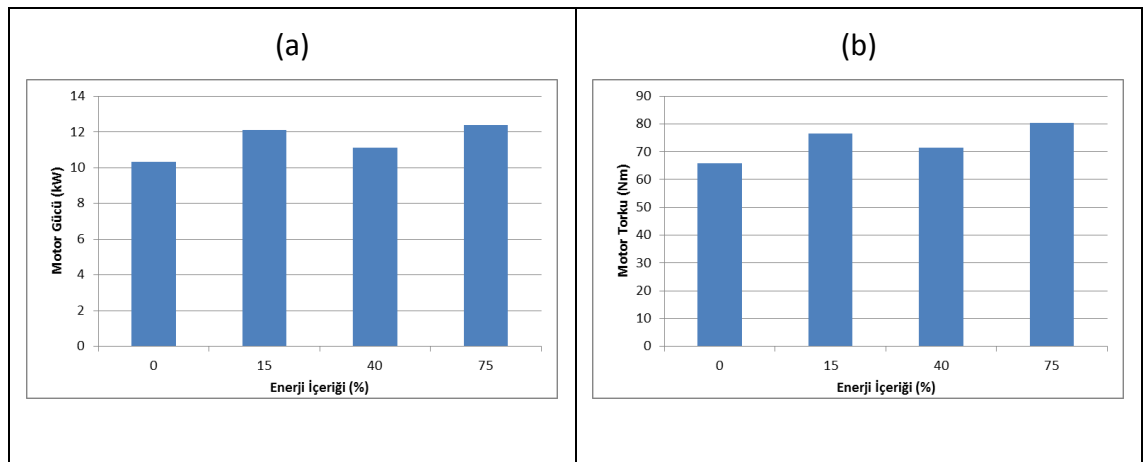
Hidrokarbon miktarında ise gaz yakıt ilavesi ile 8 katına kadar artışlar göstermiştir. Crevis hacimleri, dizel motorda piston ve silindir cidarları arasındaki boşluklar ve üst

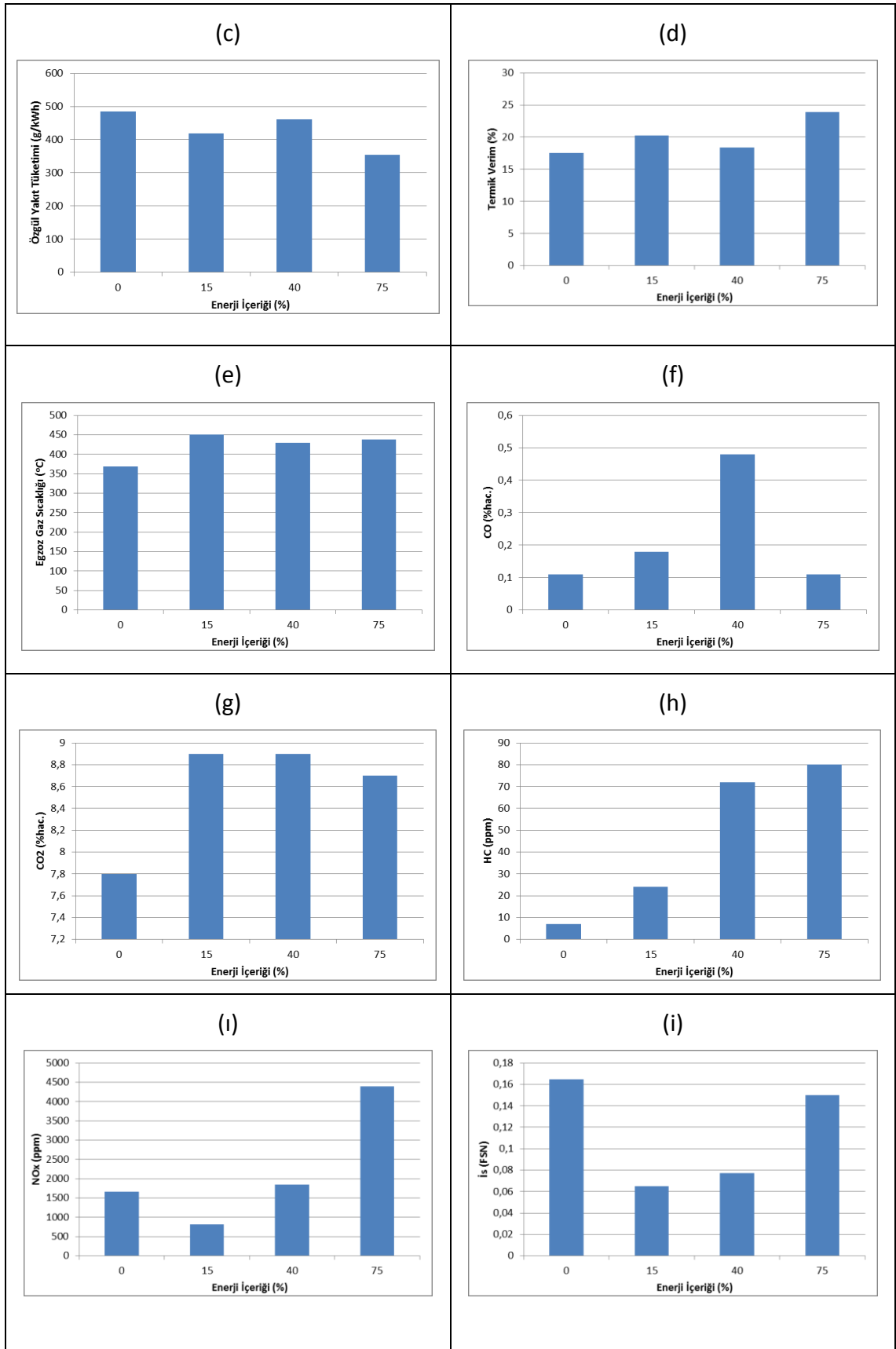
segmandaki boşluklar daha fazla olduğu için artmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar bu ölü hacimde dizelden çift yakıtlıya dönüştürülen motorlarda daha fazla birikmekte dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır [70].

NO_x emisyonları gaz yakıt ilavesi durumlarından %15 değerinde düşüş gösterirken, diğer durumlarda büyük artışlar göstermiştir. Mansor vd. [68] H_2 ve CH_4 gazları karışımı ve motorini dizel bir motorda kullanmıştır. İlave alternatif yakıt olarak kullanılan H_2 'nin oranının artmasıyla NO emisyonu değeri artmaktadır. Motorin oranı arttıkça ise azalmaktadır. Çünkü, H_2 'nin artmasıyla, motorin oranının da azalmasıyla, silindir içi sıcaklıklar artmaktadır. CH_4 ile motorin karışımı yakıt kullanıldığında ise yalnız motorin kullanılan durumdan daha fazla NO emisyonu oluşmaktadır, çünkü yine saf yakıttan daha fazla silindir içi sıcaklık oluşmaktadır [68].

Gaz yakıt ilavesi ile is miktarında maksimum %25 oranında düşüş gözlemlenmiştir.

Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH_4 'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH_4 miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].





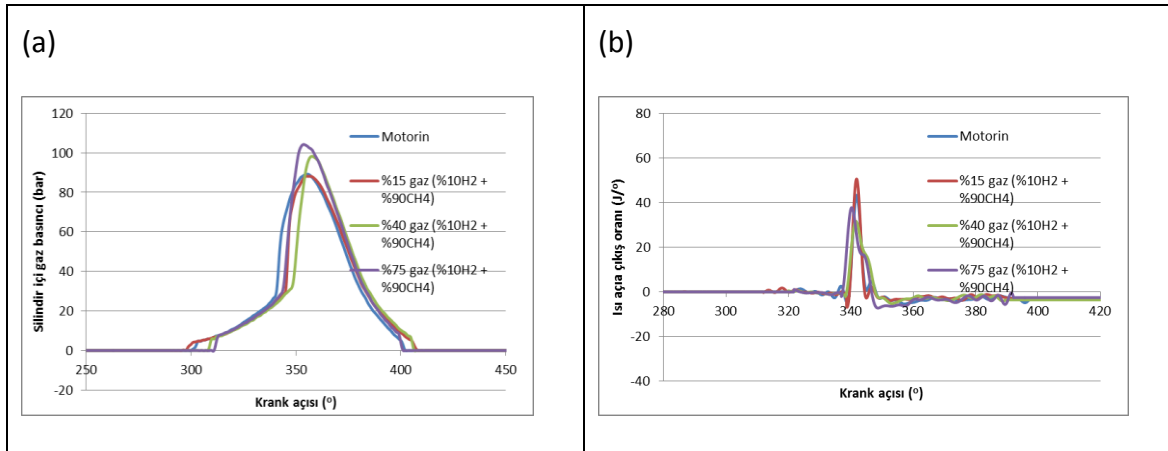
Şekil 4. 141 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
 (b) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi
 (c) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
 (d) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
 (e) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi

Şekil 4.142'de silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı miktarı %75 gaz içerikli yakıtta en fazladır. Isı açığa çıkma oranı gaz ilavesiyle genelde düşerken, %15 gaz yakıt ilavesinde ise yükselmiştir.

Daha fazla H_2 içeren gaz yakıtlar daha fazla reaktiflik ve H radikali içermektedirler. Bu nedenle bu yakıtların kullanımında, karışımın basınç ve sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir [66].

Mansor vd. [68] elde ettiği sonuçlara göre, hidrojenin diğer alternatif gaz yakıtlara göre daha reaktif bir yakıt olması ve tutuşma gecikmesinin azaltıp yanmanın iyileşmesi sebebiyle, hidrojen oranının artmasıyla en yüksek silindir içi basınç değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 142 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri

- (a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
 (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, 1300d/d motor hızında da görüldüğü gibi, gaz yakıtın enerji içeriği olarak artmasıyla, %75 enerji içeriği değerinde NO_x emisyonlarında ciddi bir miktar artış meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %17.1 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %7.6 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %20 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %51.1 oranında azaldığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %11.3 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %164.1 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 9 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %53.3 oranında azaldığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %9.1 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %63.6 arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 3 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtı ile çalışma şartıyla aynı olduğu sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 2 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 9 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 10 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

4.2.6.12 ESC Çevrimine Göre 1300d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%30H₂+%70CH₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.143'te motor performansı ve emisyon grafikleri verilmiştir. Motor gücü ve motor torkunda gaz yakıt ilavesi ile artış gözlemlenirken, en yüksek değerler %15 gaz yakıt ilavesinde görülmektedir. Özgül yakıt tüketimi değerinde, gaz yakıt ilavesi ile düşüş gözlemlenmiştir. Termik verim ise genel olarak gaz yakıt ilavesi ile yükselmiştir.

Gaz yakıt hava karışımında, gaz yakıt miktarı arttıkça hava fazlalık katsayısı aşırı fakirden zengine doğru yaklaşacağı için silindir içi sıcaklıklar artar ve özgül yakıt tüketimi düşer [74]. Ayrıca, gaz yakıt miktarının artması ile daha verimli bir kontrolsüz yanma fazı gerçekleşir ve termik verim artar, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi düşmektedir [74].

Karbon monoksit miktarı gaz yakıt ilavesi ile artarken, en yüksek değer %75 gaz yakıt ilavesinde görülmüştür.

CO formasyonu yanmamış gaz yakıt ulaşılabilirliği, karışım teşkili, yakıt dekompozisyonu ve oksidasyonuna bağlı olarak açığa çıkar. Düşük yüklerde dolgu sıcaklığının düşüklüğü veya aşırı fakir karışımın oluşması yanma verimini olumsuz olarak etkilediği için, CO emisyonları artmaktadır [70].

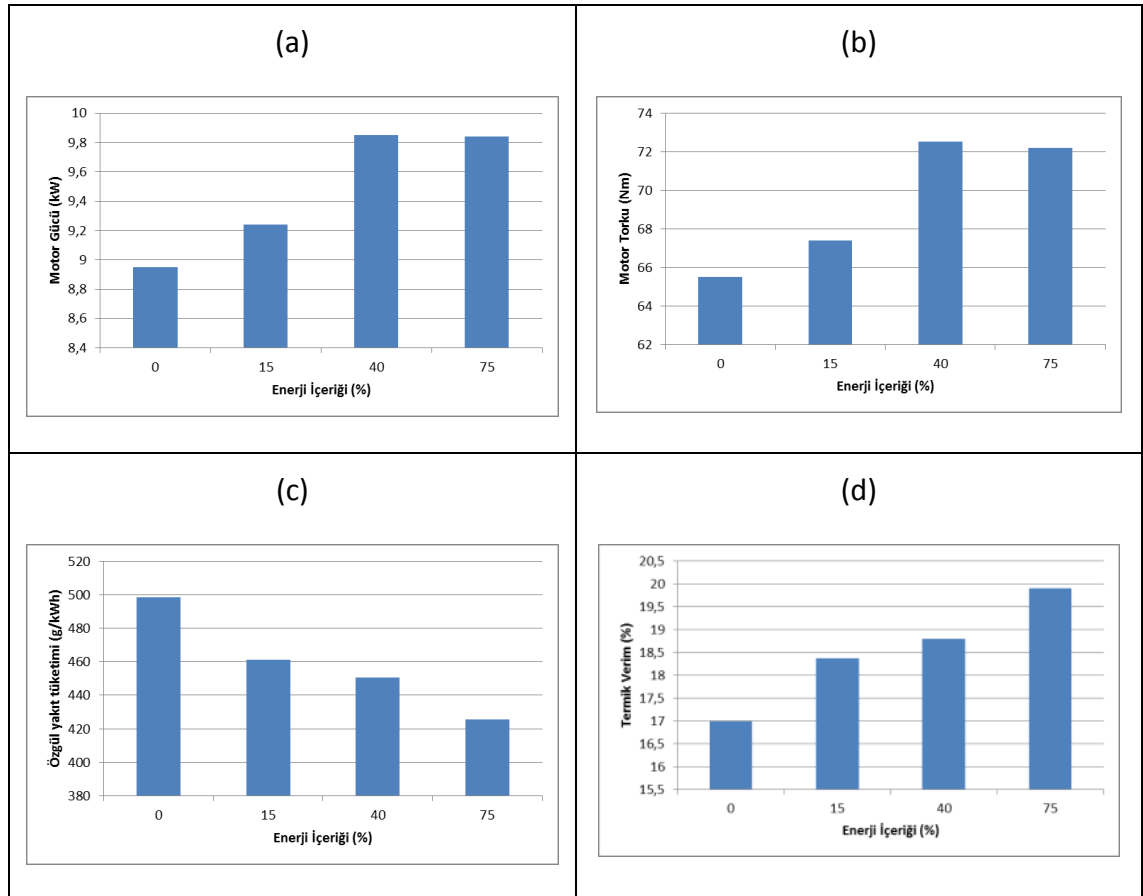
Gaz yakıt ilavesi ile karbondioksit oranında büyük artışlar gözlemlenirken, sadece %75 gaz yakıt ilaveli çift yakıtta düşüş gözlemlenmiştir. CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70]. Hidrokarbon miktarı ise gaz yakıt ilavesi ile 6 katına kadar artış göstermiştir. Kullanılan metanın kendi kendine tutuşma sıcaklığının yüksek olmasından ve supap bindirmesi esnasında bir kısmının dışarı kaçmasından dolayı tam yanma gerçekleşmemektedir. Bu nedenle HC emisyonlarında ciddi oranda artış görülmektedir [74].

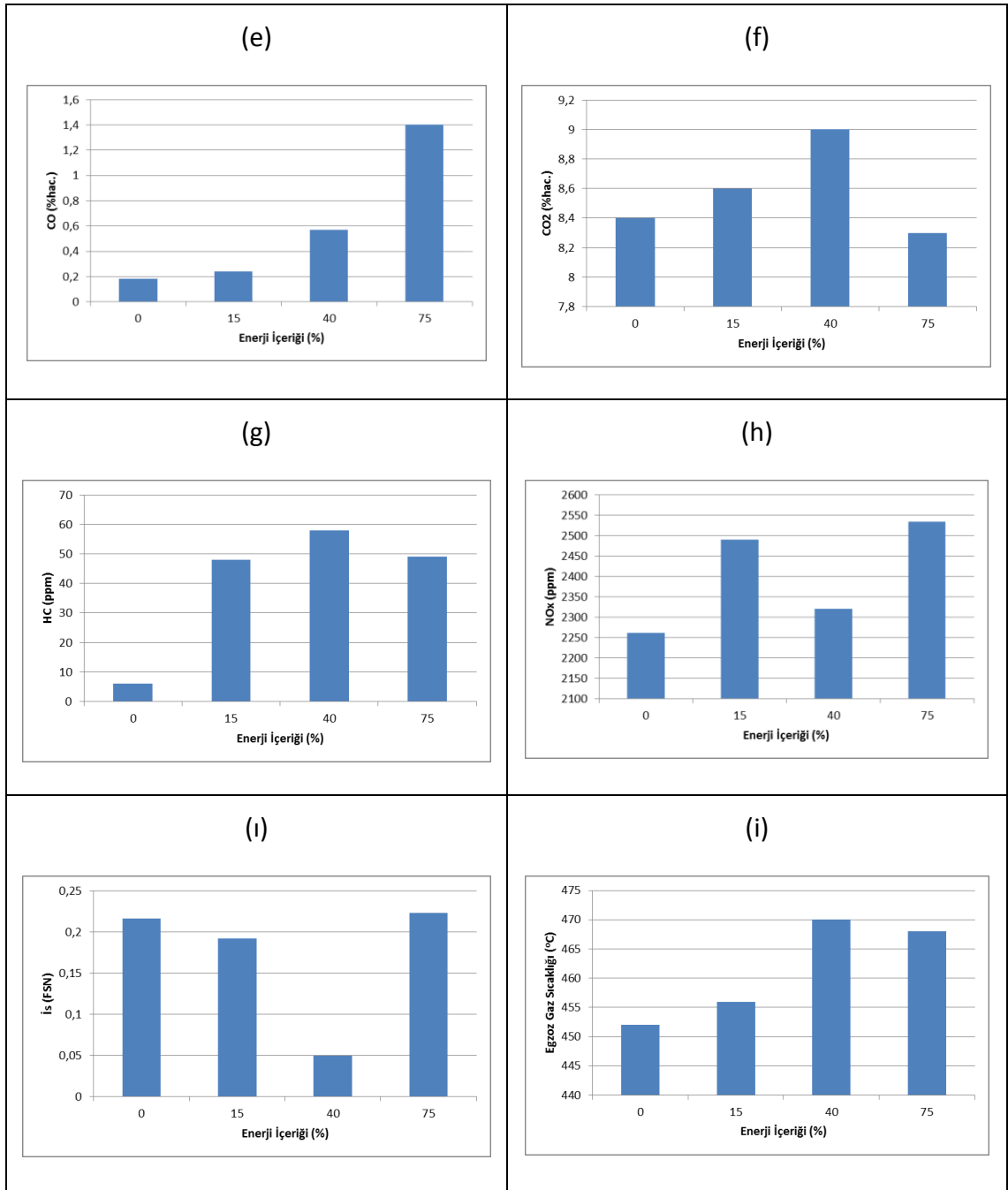
NO_x emisyonları gaz yakıt ilavesi ile büyük artışlar göstermiştir. Mansor vd. [68] H₂ ve CH₄ gazları karışımı ve motorini dizel bir motorda kullanmıştır. İlave alternatif yakıt olarak kullanılan H₂'nin oranının artmasıyla NO emisyonu değeri artmaktadır. Motorin oranı arttıkça ise azalmaktadır. Çünkü, H₂'nin artmasıyla, motorin oranının da

azalmasıyla, silindir içi sıcaklıklar artmaktadır. CH₄ ile motorin karışimli yakıt kullanıldığında ise yalnız motorin kullanılan durumdan daha fazla NO emisyonu oluşmaktadır, çünkü yine saf yakıttan daha fazla silindir içi sıcaklık oluşmaktadır [68].

İs miktarı %40 gaz yakıt ilavesinde yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık %25 oranında düşüş göstermiştir. %75 oranında gaz yakıt ilavesiyle is emisyonlarında bir miktar artış olmasına rağmen, motor gücünde ciddi miktarda artış olduğu değerlendirildiğinde, aslında özgül is emisyonlarında iyileşme meydana geleceği görülmektedir.

Silindir içine gönderilen metan oranı arttıkça is emisyonunun azaldığı görülmektedir. Ayrıca CH₄, dizel yakıtından daha az karbon içerdiği için is emisyonu daha fazla azalmaktadır. CH₄ gazı emme manifoldundan gönderildiğinde, hava ile daha homojen karıştığından, daha az yakıt içeri püskürtülerek daha verimli yanma elde edilebilmektedir [75]. Egzoz çıkış sıcaklığı, gaz yakıt ilavesi ile artış göstermiştir.





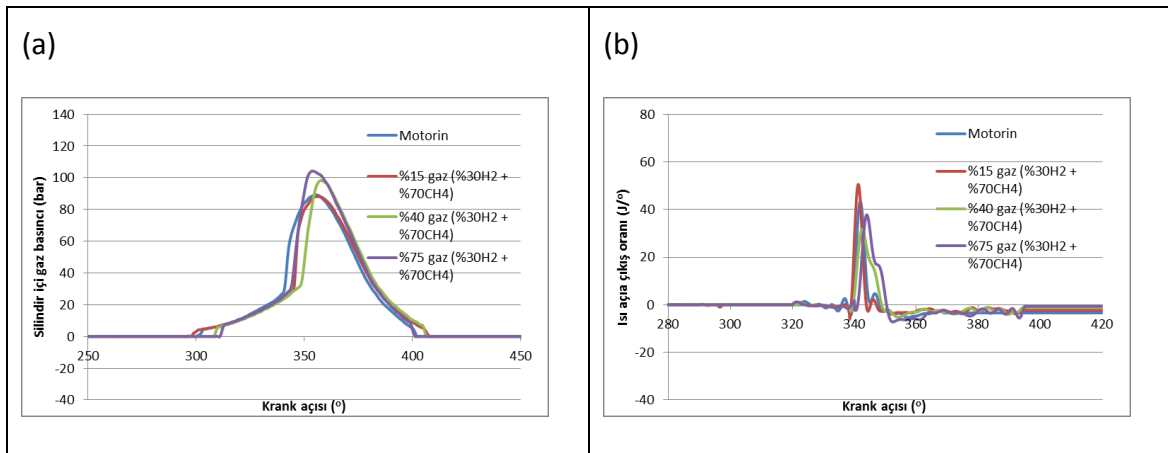
Şekil 4. 143 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
 (b) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi
 (c) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
 (d) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
 (e) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi.

Şekil 4.144'te silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Maksimum silindir içi gaz basıncı miktarı %75 gaz ilavesi durumunda en fazladır. Gaz yakıt artışı ile maksimum silindir içi gaz basınçlarında artış meydana geldiği

gözlemlenmiştir. Maksimum ısı açığa çıkış oranı, gaz ilavesiyle düşerken, %15 gaz ilavesinde ise yükselmiştir.

CH₄ ilavesinde, CH₄'ün gaz yakıt olmasından dolayı yakıt homojenliği saf dizelin kullanımına göre daha fazladır. CH₄ kullanımında alev hızı H₂'ye göre daha düşük olsa da saf dizele göre daha yüksektir. CH₄'ün kullanılması, H₂'nin kontrolsüz yanmayı arttırıcı özelliğini baskılaması nedeniyle önemlidir. Gaz yakıtlarda silindir basıncının artmasının temel nedeni daha yüksek özgül enerji içeriğine ve daha yüksek alev hızına sahip olmalarıdır. Gaz yakıtlar kontrolsüz yanma fazındaki açığa çıkan enerjiyi arttırmaktadırlar. Daha uzun bir kontrolsüz yanma ve daha kısa kontrollü yanma fazı açığa çıkmaktadır [68].



Şekil 4. 144 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı karakteristikleri

(a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
(b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi.

Elde edilen sonuçlardan, tüm enerji içeriği olarak gaz yakıt ilavesiyle NO_x emisyonlarında ciddi bir miktar artış meydana gelmediği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %3.2 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %10.1 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %9.9 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %10.1 oranında azaldığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %2.6 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %12.1 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 9 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %33.3 arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 2 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtı ile çalışma şartına göre yaklaşık 7 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 8 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

4.2.6.13 ESC Çevrimine Göre 1500d/d Motor Hızında çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%30H₂+%70CH₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.145’de motor performansı ve emisyon verileri verilmiştir. Motor gücü ve motor torkunda gaz yakıt ilavesi ile artış gözlemlenirken, en yüksek verileri %15 gaz yakıt ilavesiyle görülmüştür. Özgül yakıt tüketiminde gaz yakıt ilavesi ile düşüş gözlemlenmiştir. Termik verim ise genel olarak gaz ilavesi ile yükselmiştir.

Gaz yakıt miktarının artması ile daha verimli bir kontrolsüz yanma fazı gerçekleşir ve termik verim artar, dolayısıyla özgül yakıt tüketimi düşmektedir [74].

Egzoz gaz sıcaklığı ise gaz ilavesi ile artış göstermiştir. Karbon monoksit miktarı gaz ilavesi ile artarken, en fazla artış %75 gaz ilaveli yakıtta görülmüştür.

Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, motor yükü arttıkça CO emisyonu azalmaktadır, ama yine de dizel-gaz yakıt (doğalgaz) kullanımında açığa çıkan CO miktarı, sadece dizel kullanıldığı durumlara göre çok yüksektir. Özellikle düşük yüklerde, sıcaklık çok artmadığı için efektif yanma sağlanamamakta ve emisyon artmaktadır.

Gaz ilavesi ile karbondioksit oranında büyük artışlar gözlemlenmiştir.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70].

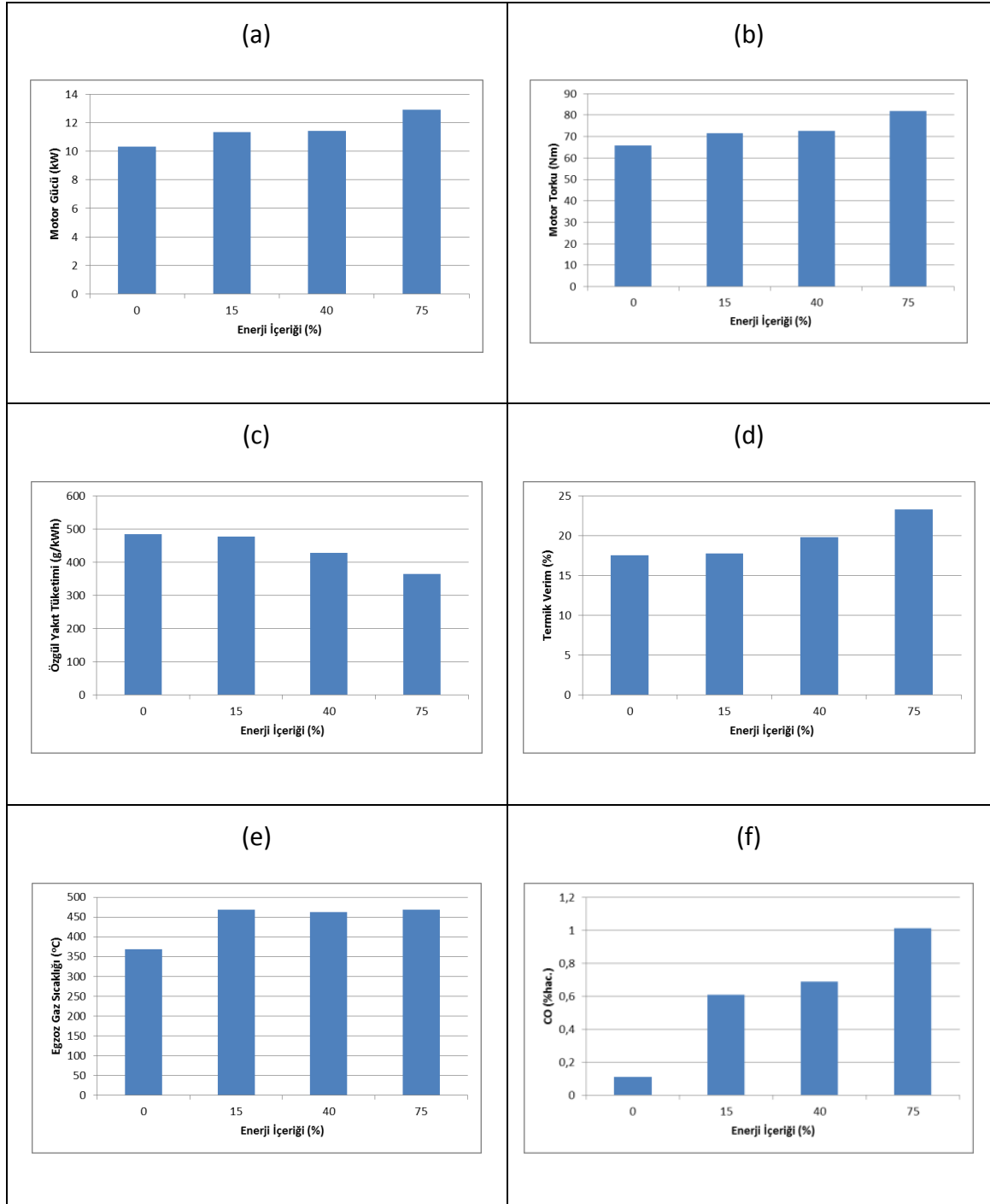
Hidrokarbon miktarında ise gaz ilavesi ile yaklaşık 9 katına kadar artış göstermiştir.

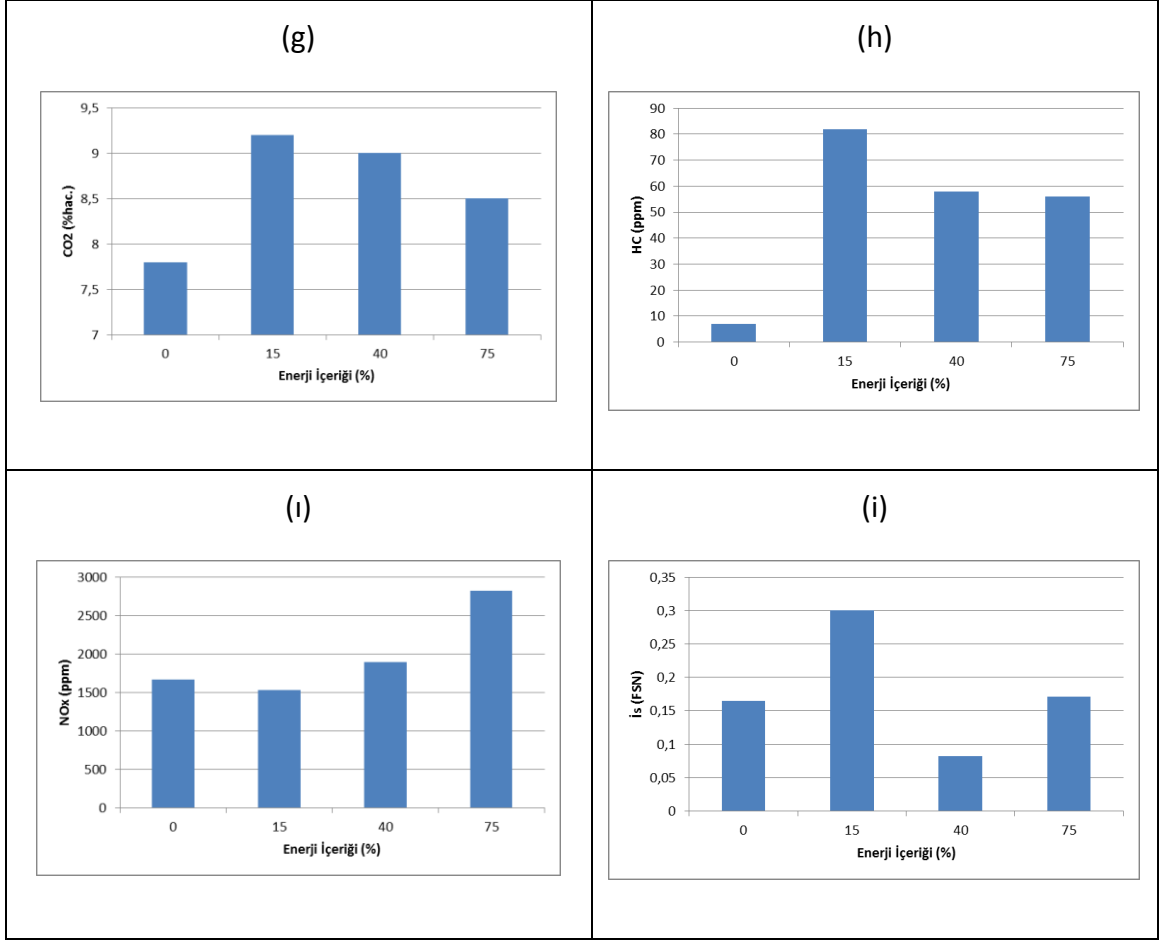
Fakir karışım da alev sönme bölgeleri arttığı için özellikle silindir cidarlarına temas eden bölgelerde eksik yanma meydana gelmekte ve bu da HC emisyonlarını arttırmaktadır. Küçük hacimler (crevice) etkisinden dolayı metanın sıkıştırma strokunda yüksek kendi kendine tutuşma sıcaklığı sebebiyle yanması zorlaştığı için HC emisyonu artmaktadır [74].

NO_x emisyonları %15 ve %40 gaz yakıt ilavesi ile ufak değişiklikler gösterirken, %75 gaz yakıt ilavesi ile ciddi bir artış gözlemlenmiştir. Mansor vd. [68] H₂ ve CH₄ gazları karışımı ve motorini dizel bir motorda kullanmıştır. İlave alternatif yakıt olarak kullanılan H₂'nin oranının artmasıyla NO emisyonu değeri artmaktadır. Motorin oranı arttıkça ise azalmaktadır. Çünkü, H₂'nin artmasıyla, motorin oranının da azalmasıyla, silindir içi sıcaklıklar artmaktadır. CH₄ ile motorin karışimli yakıt kullanıldığında ise yalnız motorin kullanılan durumdan daha fazla NO emisyonu oluşmaktadır, çünkü yine saf yakıttan daha fazla silindir içi sıcaklık oluşmaktadır [68].

İs miktarı ise sadece %40 gaz ilavesinde düşüş göstermiştir.

Hernandez vd. [63] yapmış olduğu çalışmada, farklı gaz yakıtlarla yapılan çalışmalarda is oluşumunu en çok azaltan gazın H_2 olduğu, en az etkileyenin de (yine de önemli miktarda iyileşme sağlıyor) CH_4 olduğu görülmektedir [63].

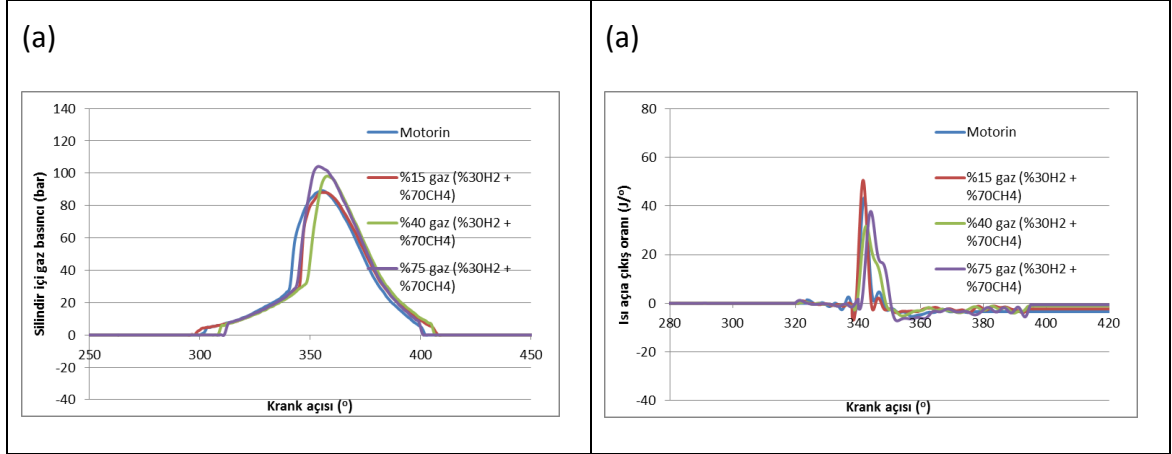




Şekil 4. 145 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde motor performans ve emisyon karakteristikleri

- (a) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor gücü eğrisi
 (b) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında motor torku eğrisi
 (c) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında özgül yakıt tüketimi eğrisi
 (d) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında termik verim eğrisi
 (e) %0, %15, %40 ve %75 gaz yakıt - motorin çift yakıtı ile çalışma şartında egzoz sıcaklığı eğrisi.

Şekil 4.146'da silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı miktarı %75 gaz ilavesiyle en yüksek değerdedir. Isı açığa çıkış oranı gaz ilavesiyle genelde düşerken, %15 gaz yakıt ilavesinde yükselmiştir. Daha fazla H₂ içeren gaz yakıtlar daha fazla reaktiflik ve H radikali içermektedirler. Bu nedenle bu yakıtların kullanımında, karışımın basınç ve sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. [66] Mansor vd. [68] elde ettiği sonuçlara göre, hidrojenin diğer alternatif gaz yakıtlara göre daha reaktif bir yakıt olması ve tutuşma gecikmesinin azaltıp yanmanın iyileşmesi sebebiyle, hidrojen oranının artmasıyla en yüksek silindir içi basınç değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 146 Farklı gaz yakıt enerji içeriklerinde silindir içi gaz basıncı ve ısı açığa çıkışı oranı karakteristikleri

(a) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
 (b) 28° püskürtme avansı ile common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkışı oranı eğrisi.

Elde edilen sonuçlardan, tüm enerji içeriği olarak gaz yakıt ilavesiyle NO_x emisyonlarında ciddi bir miktar artış meydana gelmediği sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %9.7 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %10.5 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, motor gücünün yalnız motorin yakıtına göre %24.8 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %7.8 oranında azaldığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %13.6 oranında arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, NO_x emisyonlarının yalnız motorin yakıtına göre %69.1 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %90.7 oranında arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre %51.8 oranında azaldığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, is emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık %3.2 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 5 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 5 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, CO emisyonunun yalnız motorin yakıtı ile çalışma şartına göre yaklaşık 8 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %15 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 11 kat arttığı, %40 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı, %75 doğalgaz ilavesiyle, HC emisyonunun yalnız motorin yakıtına göre yaklaşık 7 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

4.2.6.14 ESC Çevrimine Göre Farklı Motor Yüklerinde Çalışan 1.5ms Motorin Püskürtme ve Eşdeğer Toplam Enerjili Gaz (%10H₂+%90CH₄ ve %30H₂+%70CH₄)-Motorin Enerji Oranı Sonuçları

Şekil 4.147’de performans grafikleri verilmiştir. Özgül yakıt tüketimi gaz ilavesi ile genel olarak düşüş göstermiştir. Özgül yakıt tüketimi gaz yakıt ilavesi bazı çalışma noktalarında motorin yakıtına göre yükseliş gösterirken, bazı çalışma noktalarında ise düşüş göstermiştir.

Gaz yakıt hava karışımında, gaz yakıt miktarı arttıkça hava fazlalık katsayısı aşırı fakirden zengine doğru yaklaşacağı için silindir içi sıcaklıklar artar ve özgül yakıt tüketimi düşer [74]. Ancak diğer taraftan, pilot püskürtmeyle gönderilen dizel yakıtının düşmesi özellikle düşük yüklerde eksik yanmaya neden olarak özgül yakıt tüketiminin artmasına neden olur [74].

Şekil 4.148 ve 149’te emisyon grafikleri verilmiştir. Karbon monoksit miktarında gaz yakıt ilavesi ile artış gözlemlenmiştir.

Kullanılan gaz yakıt miktarı arttıkça, tam yanma gerçekleşemediğinden dolayı CO emisyonu artmaktadır. Motor yükü arttıkça karışım zenginleşmekte, hava miktarı azalıp oksidasyon zorlaşmaktadır [74]. Mittal vd. [70] yapmış olduğu çalışmada, katalitik susturucu kullanıldığında dizel-gaz yakıt çiftinin CO emisyonu tüm yüklerde motorinin

altına düşürülmektedir. Oksidasyon katalistinin kullanımında, özellikle orta ve yüksek yüklerde CO emisyonlarını sıfıra yakın olacak kadar azalttığı görülmektedir [70].

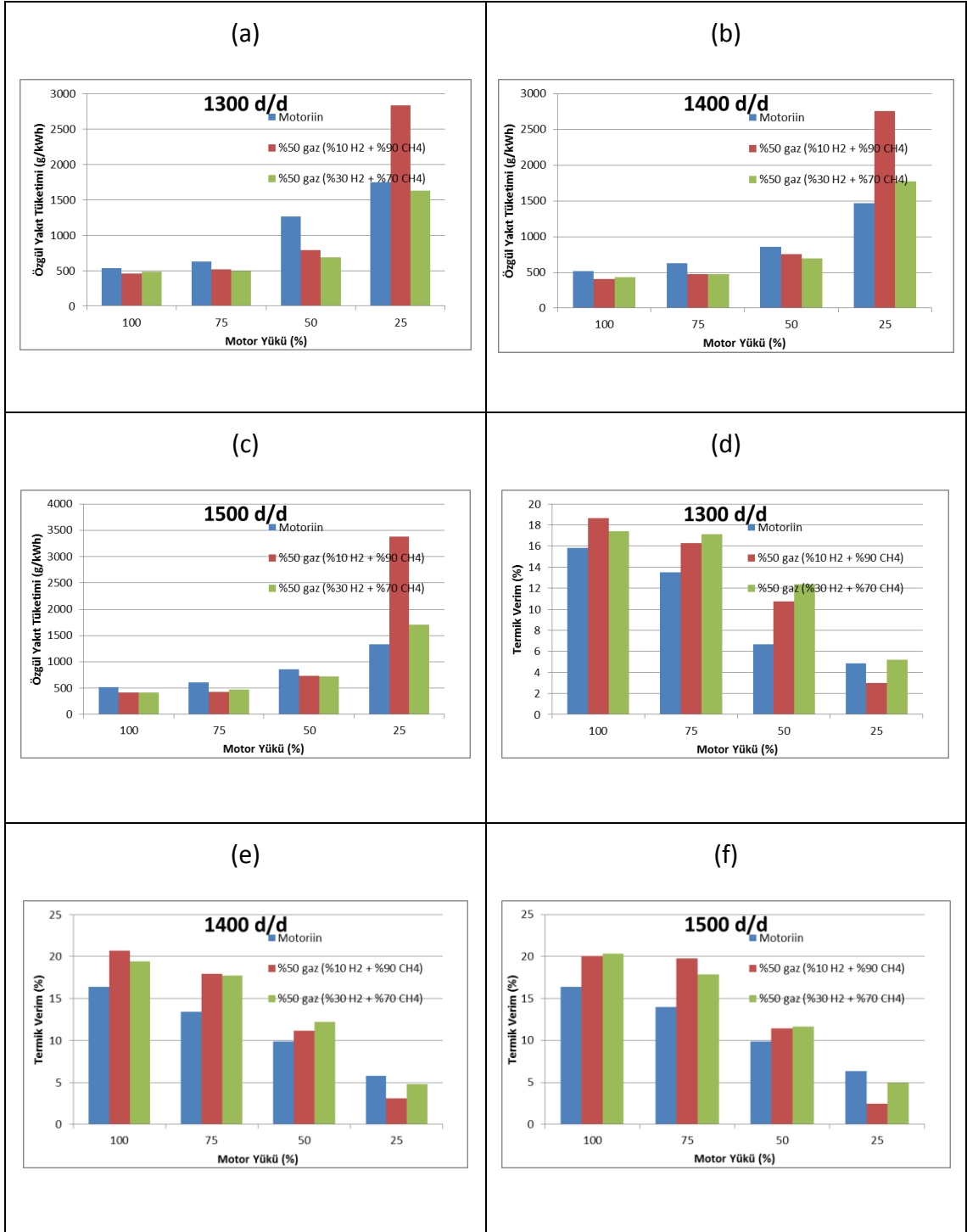
Karbondiyoksit miktarı bazı çalışma şartlarında gaz yakıt ilavesi ile artış gösterirken, bazı durumlarda ise düşüş göstermektedir.

CO₂ emisyon miktarı yanma kalitesi hakkında bilgi vermektedir. Fosil yakıtlarda, termik verim arttıkça CO₂ emisyonlarının artması kaçınılmazdır [70]. Ancak diğer taraftan, gaz yakıtın içeriğindeki yüksek H/C oranından dolayı CO₂ emisyon miktarı azalmaktadır [70]. Hidrokarbon miktarında, gaz yakıt ilavesi ile büyük artışlar gözlemlenmiştir. Küçük hacimler (crevis hacimleri), dizel motorda piston ve silindir cidarları arasındaki boşluklar ve üst segmandaki boşluklar daha fazla olduğu için artmaktadır. Yanmamış hidrokarbonlar bu ölü hacimde dizelden çift yakıtlıya dönüştürülen motorlarda daha fazla birikmekte dolayısıyla HC emisyonları artmaktadır [70].

NO_x emisyonu yüksek oranlı enerji içeriğinde gaz yakıt ilavesi ile artarken, düşük oranlı enerji içeriğinde azalmaktadır.

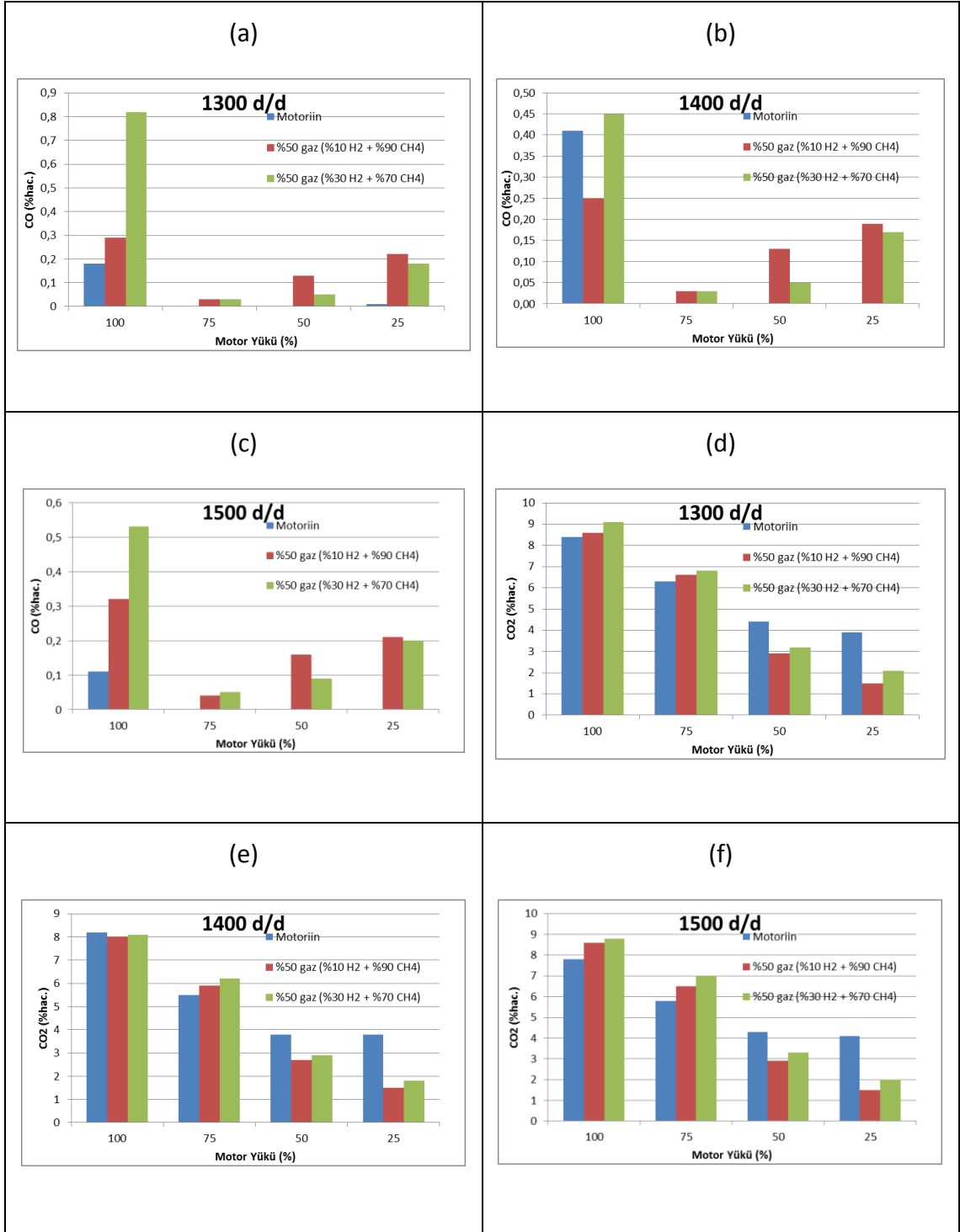
Gaz yakıtın ilavesiyle daha fazla ısı ortaya çıkmış olsa da, daha homojen hava-yakıt karışımının kullanılmış olması, lokal yüksek sıcaklık bölgelerinin oluşmasını engellemiş ve NO_x emisyonunu düşürmüştür. Öte yandan, silindir cidarları gaz yakıt kullanımı sebebiyle daha yüksek sıcaklıklara ulaşmış, gaz yakıt tüm yanma odasına dağılarak daha yüksek ısı salınımının açığa çıkmasına ve NO_x emisyonunun artmasına neden olmuştur. Birbirine zıt olan bu parametreler sonucu NO_x emisyonlarında artış, düşüş veya ciddi bir değişiklik meydana gelmemesi gözlemlenebilir [75].

İs miktarı tüm çalışma noktalarında, gaz yakıt ilavesi ile düşüş göstermiştir. Motor yükü arttıkça, silindire alınan yakıt arttığı için motor yükü arttıkça is emisyonu da artmaktadır. CH₄'ün daha az is oluşumuna yatkın olduğu bilinmektedir. Dahası püskürtülen CH₄ miktarı büyük oranda dizel yakıtla yer değiştirdiği için daha az is emisyonu açığa çıkmaktadır. Diğer taraftan, H₂'nin karbon atomu içermemesi sebebiyle, is emisyonlarının düşmesinde önemli rol oynar. Gaz yakıt ilavesiyle, ani olarak yükselen silindir içi sıcaklık ve basınç değerleri nedeniyle, yakıt hava karışımının daha iyi yanması sağlanır ve böylece is emisyonu azalmaktadır [74].



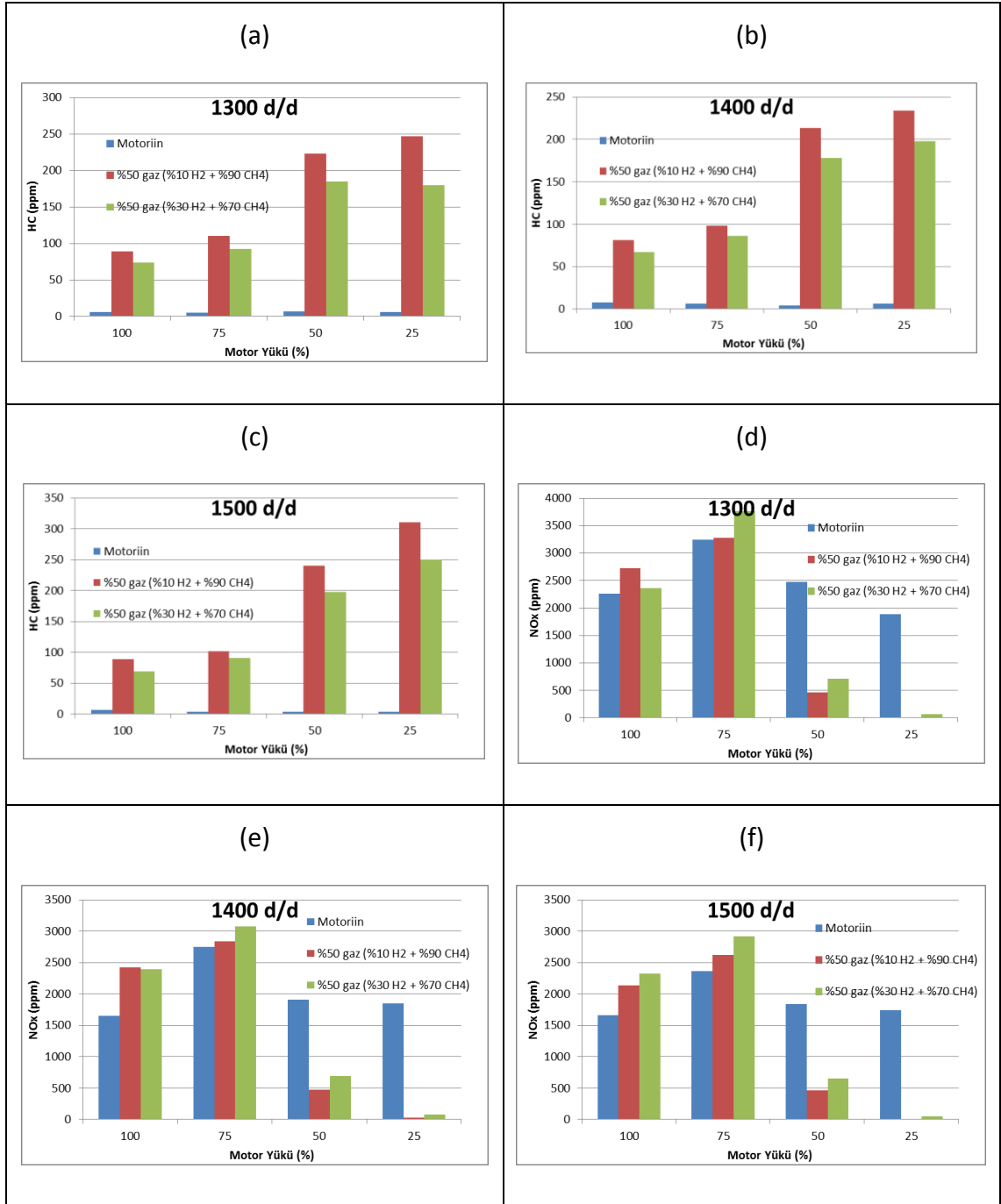
Sekil 4. 147 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor performans sonuçları

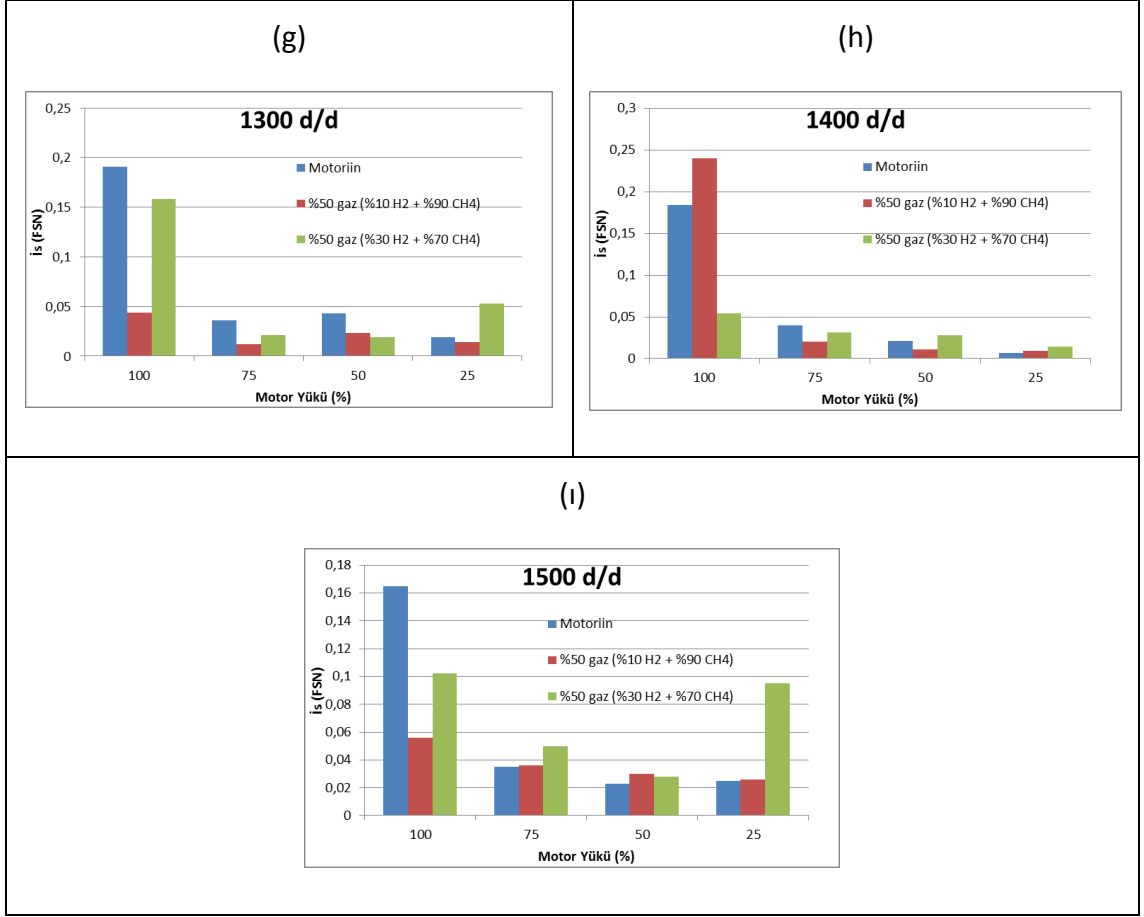
- (a) 1300 d/d motor hızındaki özgül yakıt tüketimi grafiği
- (b) 1400 d/d motor hızındaki özgül yakıt tüketimi grafiği
- (c) 1500 d/d motor hızındaki özgül yakıt tüketimi grafiği
- (d) 1300 d/d motor hızındaki termik verim grafiği
- (e) 1400 d/d motor hızındaki termik verim grafiği
- (f) 1500 d/d motor hızındaki termik verim grafiği



Şekil 4. 148 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor emisyonları sonuçları

- (a) 1300 d/d motor hızındaki CO emisyonu grafiği
 (b) 1400 d/d motor hızındaki CO emisyonu grafiği
 (c) 1500 d/d motor hızındaki CO emisyonu grafiği, (d) 1300 d/d motor hızındaki CO2 emisyonu grafiği
 (e) 1400 d/d motor hızındaki CO2 emisyonu grafiği
 (f) 1500 d/d motor hızındaki CO2 emisyonu grafiği





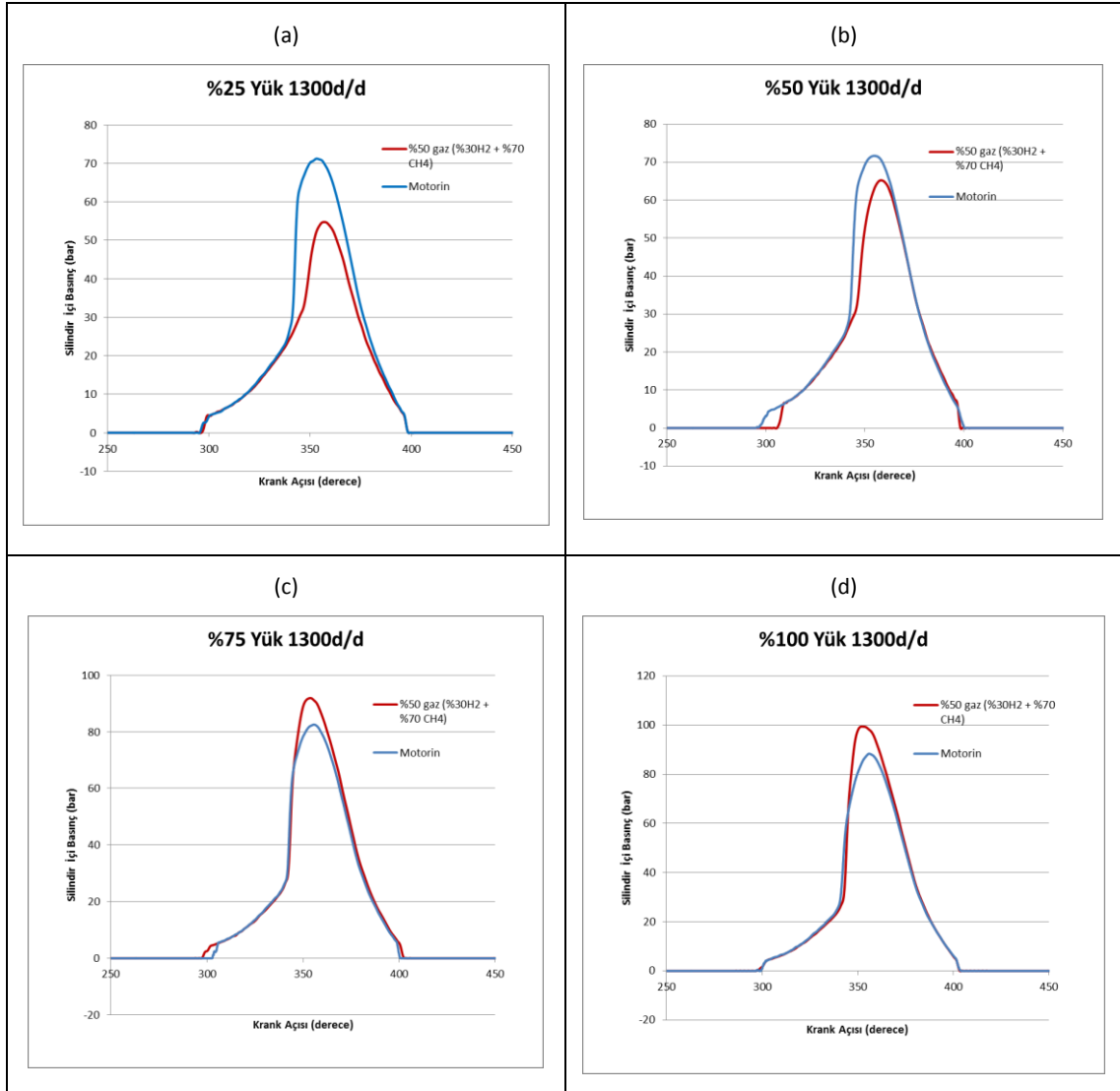
Şekil 4. 149 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde motor emisyonu sonuçları

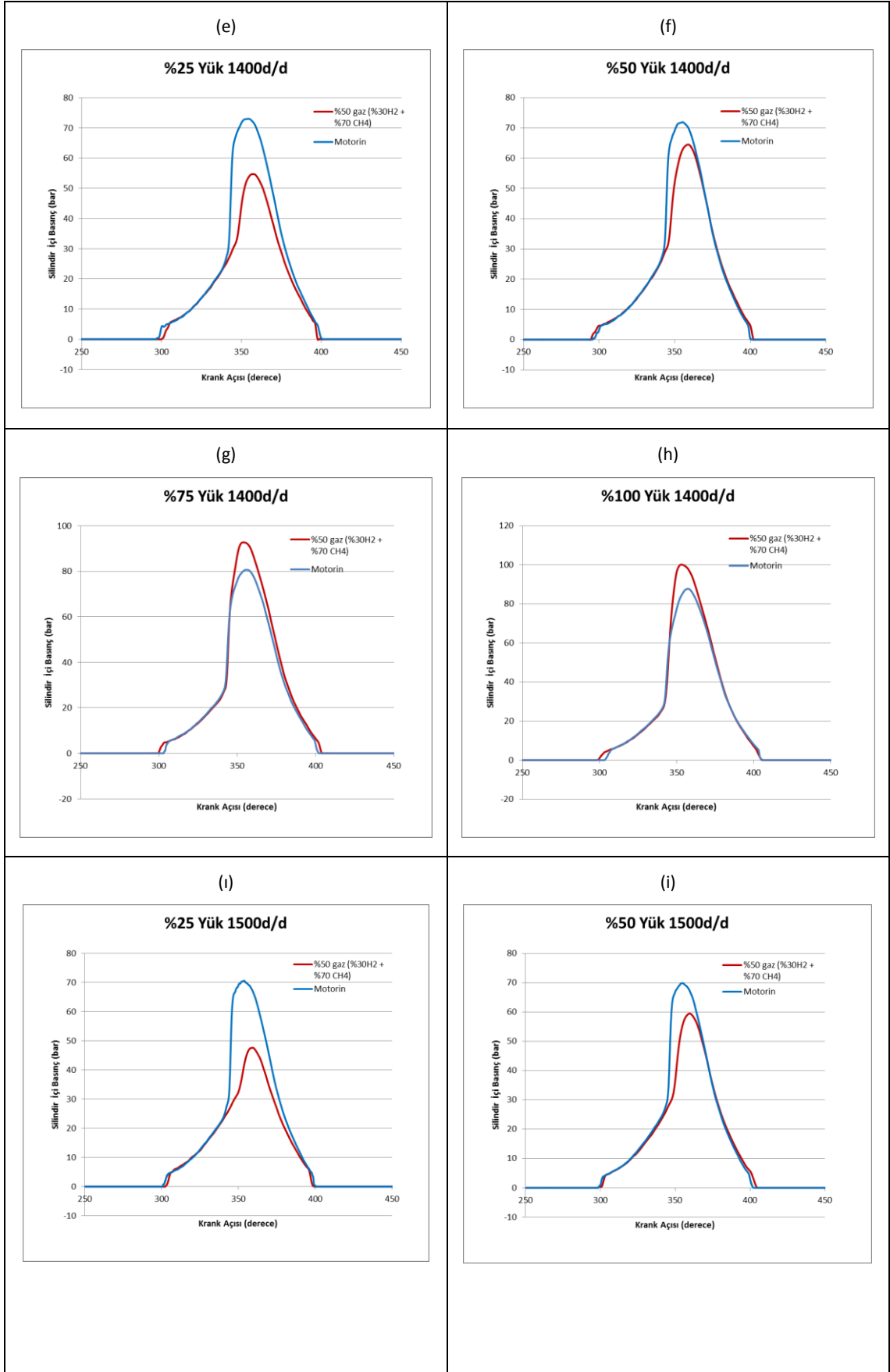
- (a) 1300 d/d motor hızındaki HC emisyonu grafiği
- (b) 1400 d/d motor hızındaki HC emisyonu grafiği
- (c) 1500 d/d motor hızındaki HC emisyonu grafiği
- (d) 1300 d/d motor hızındaki NOx emisyonu grafiği
- (e) 1400 d/d motor hızındaki NOx emisyonu grafiği
- (f) 1500 d/d motor hızındaki NOx emisyonu grafiği
- (g) 1300 d/d motor hızındaki is emisyonu grafiği
- (h) 1400 d/d motor hızındaki is emisyonu grafiği
- (i) 1500 d/d motor hızındaki is emisyonu grafiği

Şekil 4.150'de silindir içi basınç grafiği verilmiştir. Silindir içi gaz basıncı yüksek yük koşullarında motorin yakıtında fazla iken, düşük yük koşullarında %50 gaz içerikli çift yakıtta daha fazladır. Şekil 4.151'de ısı açığa çıkış oranı grafikleri verilmiştir. Isı açığa çıkış oranı düşük yük koşullarında motorin yakıtında fazla iken, yüksek yük koşullarında %50 gaz - motorin çift yakıtında fazladır.

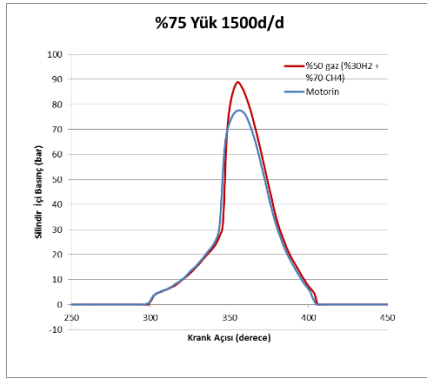
Daha fazla H₂ içeren gaz yakıtlar daha fazla reaktiflik ve H radikali içermektedirler. Bu nedenle bu yakıtların kullanımında, karışımın basınç ve sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir [66]. CH₄ ilavesinde, CH₄'ün gaz yakıt olmasından dolayı yakıt homojenliği saf dizelin kullanımına göre daha fazladır. CH₄ kullanımında alev hızı H₂'ye

göre daha düşük olsa da saf dizele göre daha yüksektir. CH_4 'ün kullanılması, H_2 'nin kontrolsüz yanmayı arttırıcı özelliğini baskılaması nedeniyle önemlidir. Gaz yakıtlarda silindir basıncının artmasının temel nedeni daha yüksek özgül enerji içeriğine ve daha yüksek alev hızına sahip olmalarıdır. Gaz yakıtlar kontrolsüz yanma fazındaki açığa çıkan enerjiyi arttırmaktadırlar. Daha uzun bir kontrolsüz yanma ve daha kısa kontrollü yanma fazı açığa çıkmaktadır [68].

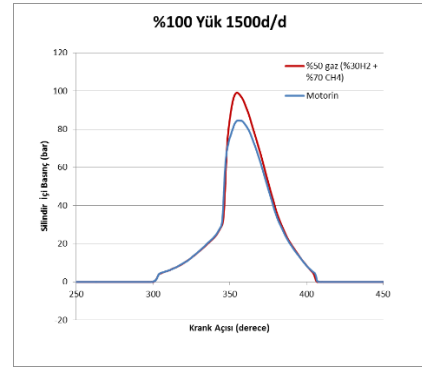




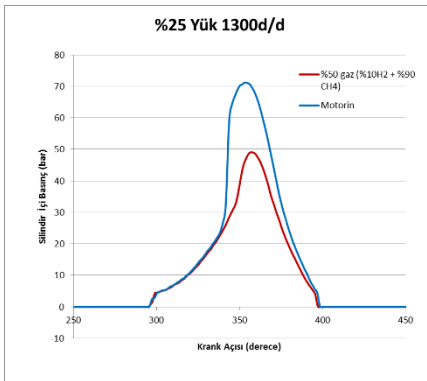
(j)



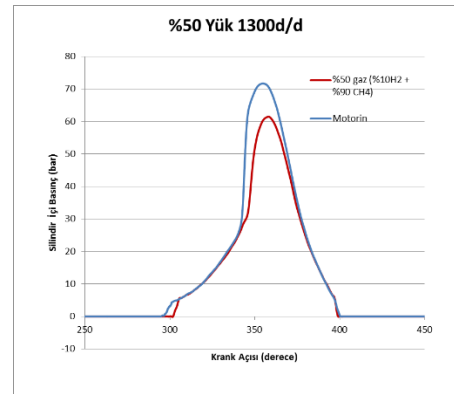
(k)



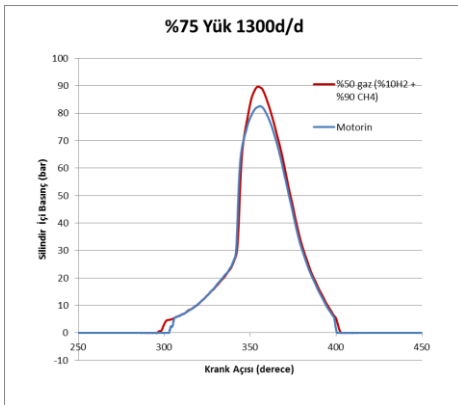
(l)



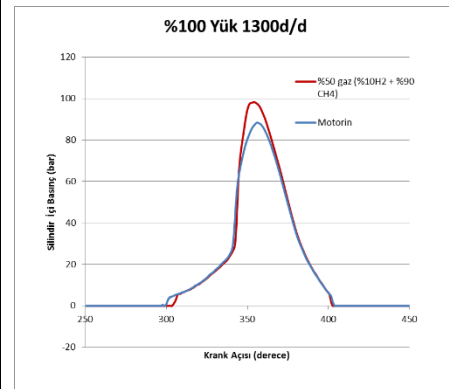
(m)



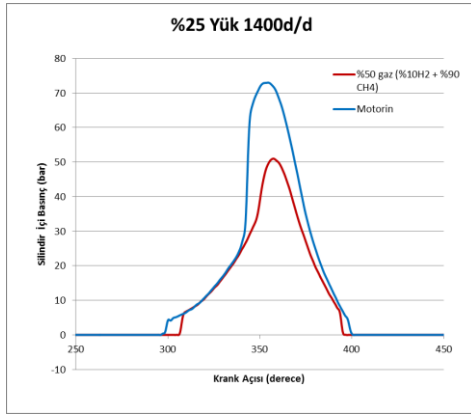
(n)



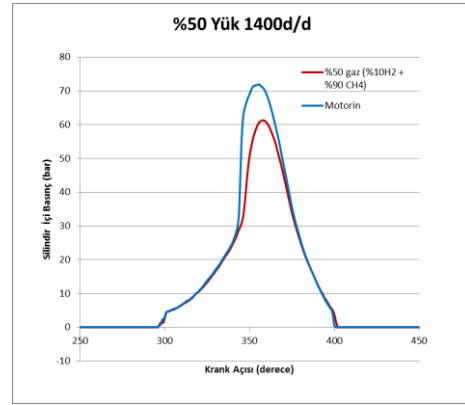
(o)



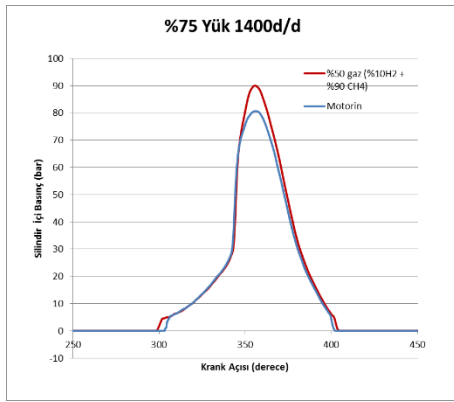
(ö)



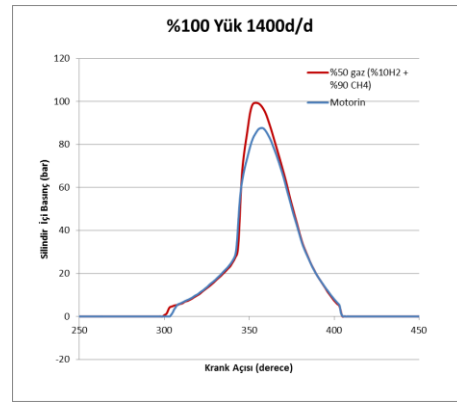
(p)



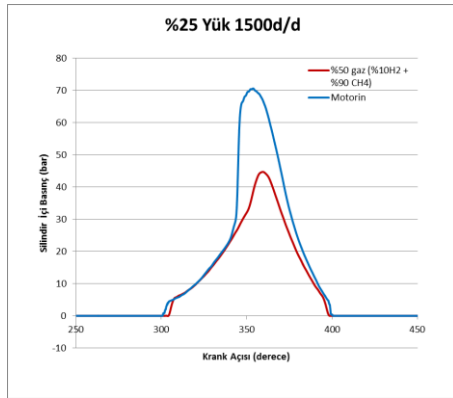
(r)



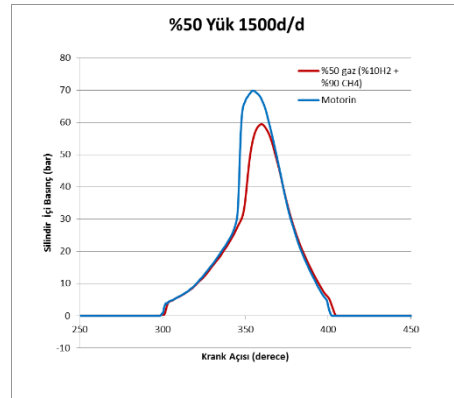
(s)

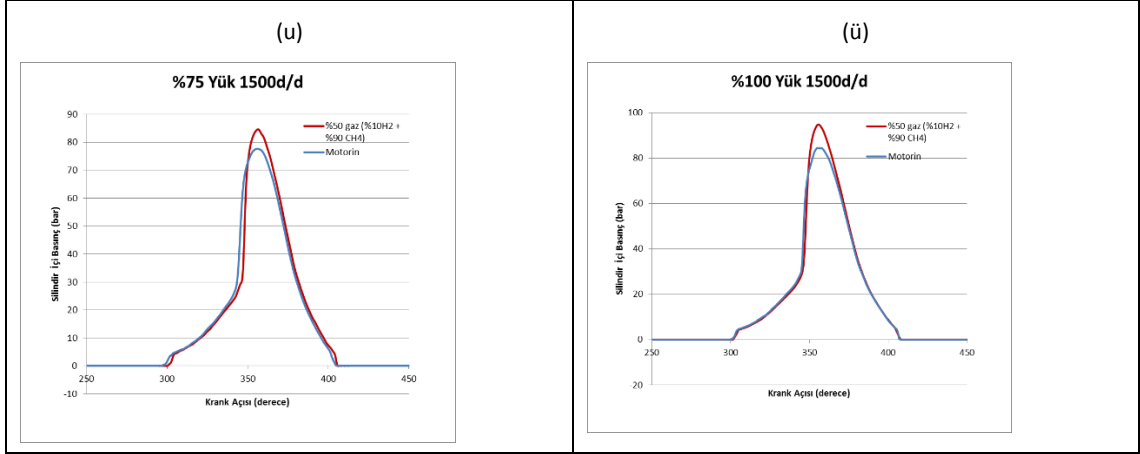


(ş)



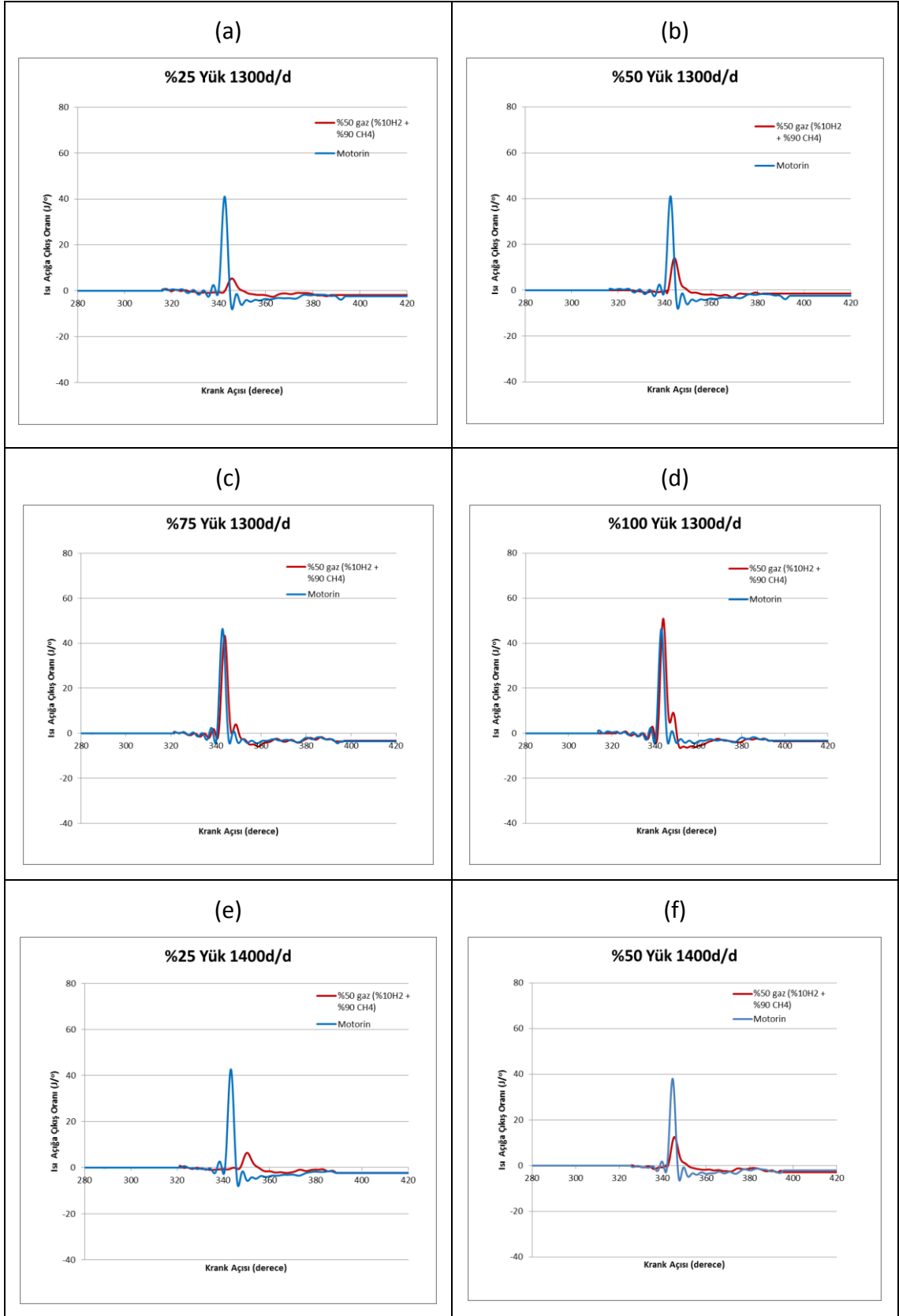
(t)



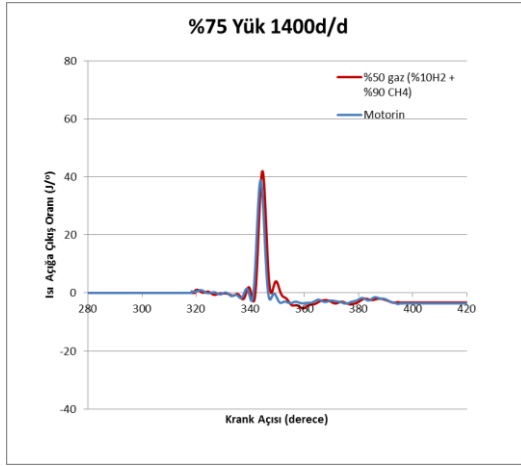


Sekil 4. 150 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde silindir içi gaz basıncı sonuçları

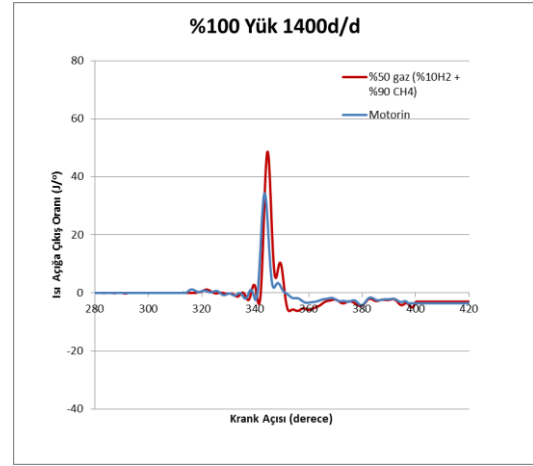
- (a) 1300d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (b) 1300d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (c) 1300d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (d) 1300d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (e) 1400d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (f) 1400d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (g) 1400d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (h) 1400d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (i) 1500d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (j) 1500d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (k) 1500d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (l) 1500d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (m) 1300d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (n) 1300d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (o) 1300d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (p) 1400d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (q) 1400d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (r) 1400d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (s) 1400d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (t) 1500d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- (u) 1500d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- () 1500d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi
- () 1500d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun silindir içi basıncı eğrisi



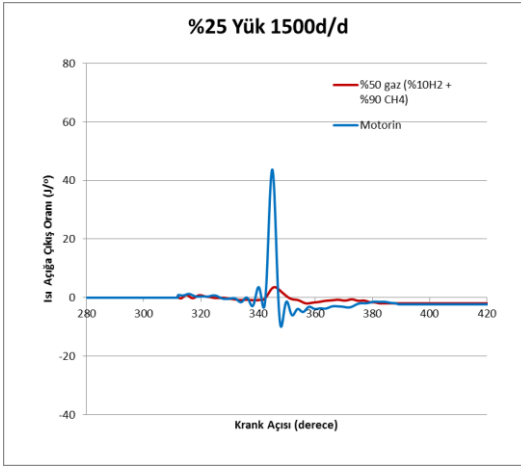
(g)



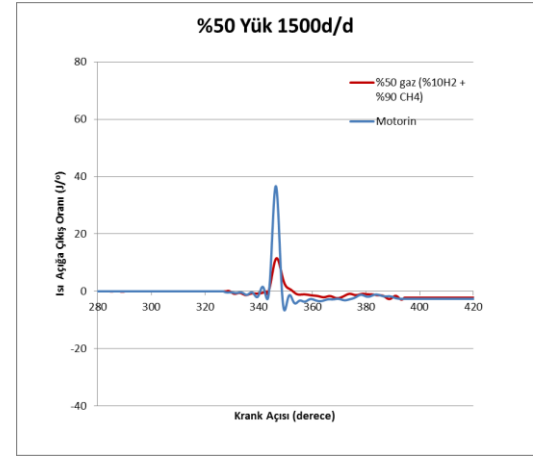
(h)



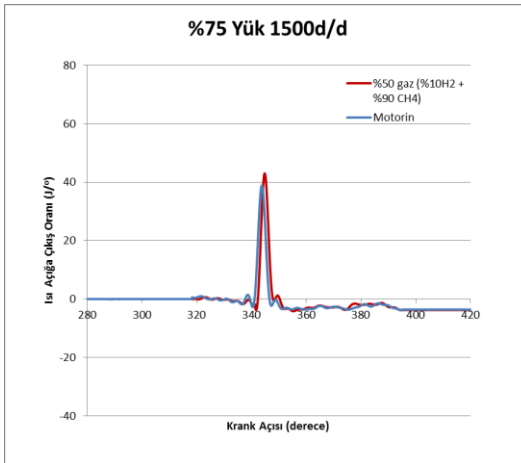
(i)



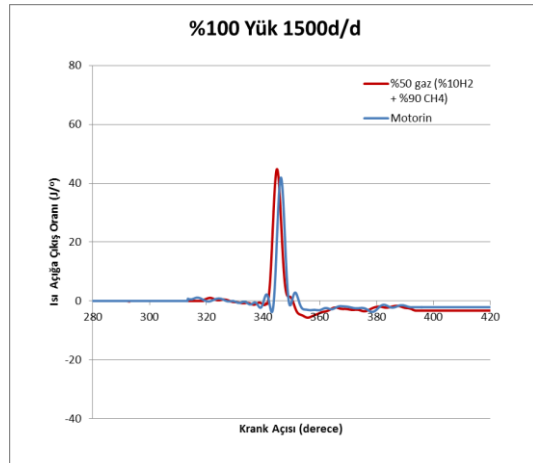
(i)



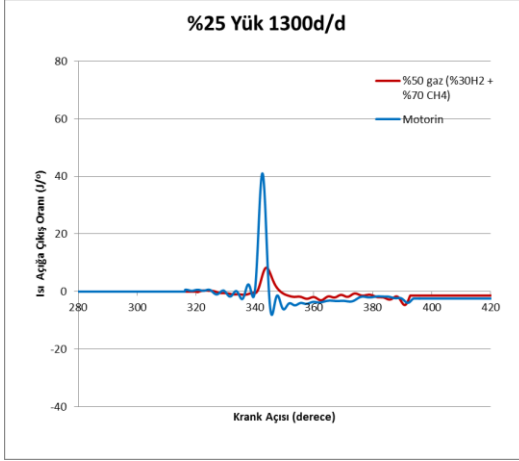
(j)



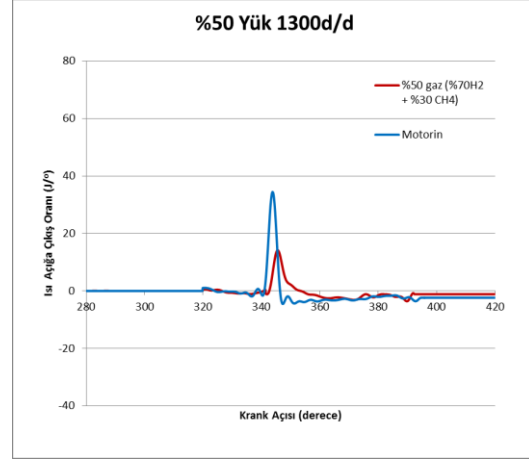
(k)



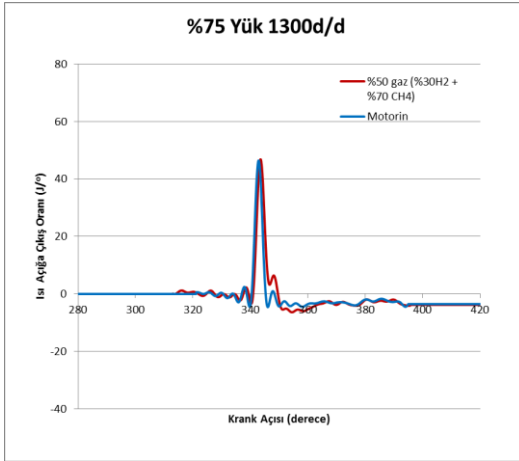
(l)



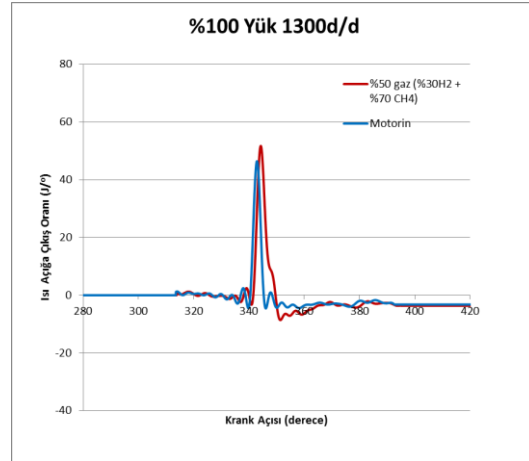
(m)



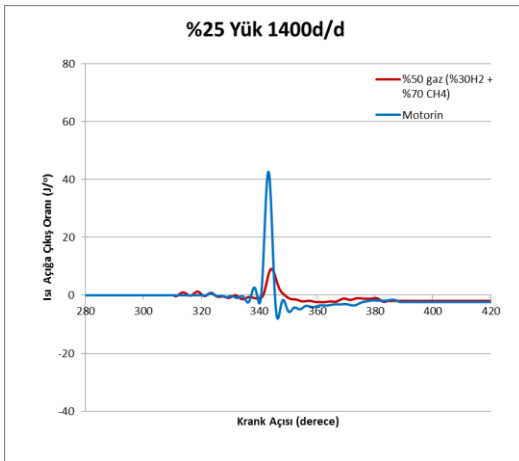
(n)



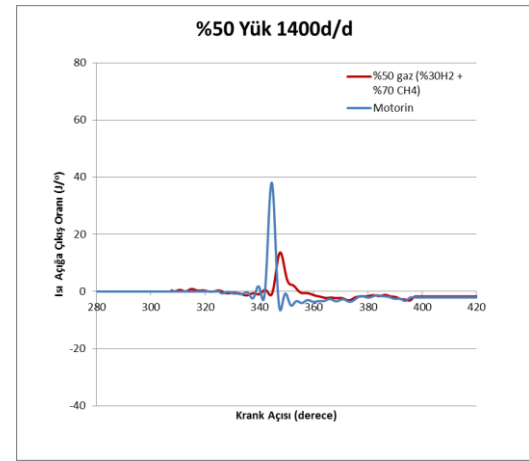
(o)

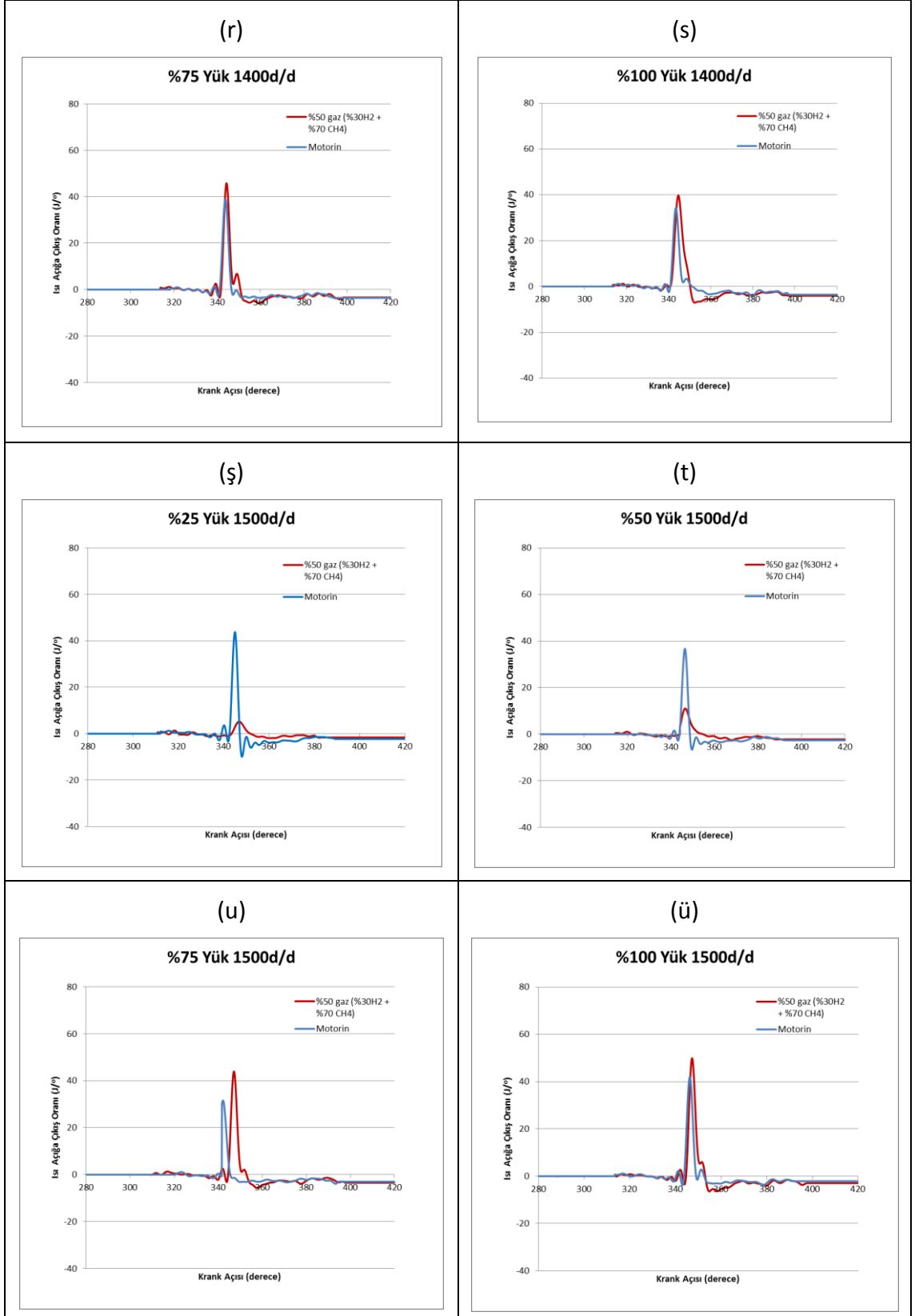


()



(p)





Sekil 4. 151 Farklı motor hızlarında, farklı yüklerde ısı açığa çıkış oranı sonuçları

- (a) 1300d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (b) 1300d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (c) 1300d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
 (d) 1300d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi

- (e) 1400d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (f) 1400d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (g) 1400d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (h) 1400d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ı) 1500d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (i) 1500d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (j) 1500d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (k) 1500d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (l) 1300d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (m) 1300d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (n) 1300d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (o) 1300d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ö) 1400d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (p) 1400d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (r) 1400d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (s) 1400d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ş) 1500d/d motor hızında ve %25 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (t) 1500d/d motor hızında ve %50 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (u) 1500d/d motor hızında ve %75 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi
- (ü) 1500d/d motor hızında ve %100 motor yükünde common-rail yakıt sistemli motorun ısı açığa çıkış oranı eğrisi

Elde edilen sonuçlardan, %50 gaz yakıt ilavesi ile tam yük şartında yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarında artış gözlemlenirken, özellikle kısmi yüklerde NO_x emisyonlarında ciddi miktarda düşüş meydana geldiği sonucuna varılmıştır. Özellikle kısmi yüklerde gaz yakıt ilavesiyle, hem NO_x, hem de is emisyonlarında düşüş meydana gelmesi, daha yüksek emisyon regülasyonları karşılanabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca, gaz yakıt ilavesi ile kısmi yüklerde bazen is emisyonlarında artış olduğu gözlemlensede, motorun is emisyonu değerlerinin yalnız motorin kullanıldığı şartlarda dahi oldukça düşük, regülasyonların altında olmasından dolayı, is emisyonlarındaki artış önemsizdir. Elde edilen sonuçlardan, %10H₂+%90CH₄ karışım gaz yakıtı ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 21 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 12 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 2 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %61.1 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 40 kat arttığı, %50 motor yükü şartında

gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 30 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 21 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 14 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %99.6 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %81.3 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %1 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %20.4 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık %26.3 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %46.5 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %66.6 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %76.9 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 18 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 12 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 2 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %39 azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 38 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 52 kat arttığı,

%75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 15 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 9 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %98.7 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %75.3 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %3 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %46.3 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %28,6 oranında arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %47.6 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %50 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %30.4 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 20 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 15 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 3 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun yaklaşık 2 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 77 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 59 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız

motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 25 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 12 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NOx emisyonlarının %99.5 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NOx emisyonlarının %74.8 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NOx emisyonlarının %10.7 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NOx emisyonlarının %28.3 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %4 oranında arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %30.4 oranında arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %2.8 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %66 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, %30H₂+%70CH₄ karışım gaz yakıtı ile elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 17 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 4 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 2 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun yaklaşık 4 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 29 kat arttığı, %50 motor yükü şartında

gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 25 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 17 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 11 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %96.1 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %71.1 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %16.1 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %4.6 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1300d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık %178 oranında arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %55.8 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %41.7 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %17.3 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 16 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 4 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 2 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun %9.7 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 32 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 44 kat arttığı,

%75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 13 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun 7 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %98.7 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %75.3 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %3 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %46.3 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1400d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %100 oranında arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %33.3 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %22.5 oranında azaldığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %70.6 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 19 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 8 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun 4 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre CO emisyonunun yaklaşık 4 kat arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 62 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 49 kat arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız

motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 22 kat arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre HC emisyonunun yaklaşık 9 kat arttığı sonucuna varılmıştır.

- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %97 oranında azaldığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %64.7 oranında azaldığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %23.5 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre NO_x emisyonlarının %39.6 oranında arttığı sonucuna varılmıştır.
- 1500d/d motor hızında, %25 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun yaklaşık 2 kat arttığı, %50 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %21.7 oranında arttığı, %75 motor yükü şartında gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %42.8 oranında arttığı, %100 motor yükü şartında (tam yük şartında) gaz yakıt ilavesiyle yalnız motorin yakıtına göre is emisyonunun %38.2 oranında azaldığı sonucuna varılmıştır.

4.3 Sonuç ve Öneriler

Gerçekleştirilen çalışmada, doğal emişli, tek silindirli, direkt püskürtmeli, dört stroklu bir dizel test motorunun mekanik dizel yakıt sistemi, ilk aşamada yüksek basınçlı ortak hat (common-rail) yakıt sistemine dönüştürülmüştür. Ardından, teorik ve deneysel olarak, metan, doğalgaz, hidrojen+doğalgaz ve biyogaz gaz yakıtlarının dizel motorda, motorinle beraber çift yakıt olarak kullanılması detaylı olarak araştırılmıştır. Farklı motor hızlarında (1100d/d ila 2700d/d arasında) ve farklı motor yüklerinde (%100 ila %25 arasında), farklı püskürtme avanslarında (ÜÖN'dan 16, 20, 24 ve 28°KMA önce), farklı püskürtme sürelerinde (1.5ms, 1.75ms ve 2ms dizel enjektörü püskürtme süresi) ve ralanti şartında gaz yakıt + motorin çift yakıtının, termik verim, özgül yakıt tüketimi, emisyonlar (CO, CO₂, HC, NO_x ve is emisyonları) ve yanma karakteristiği (silindir içi

basınç dataları ve ısı açığa çıkış oranı) incelenmiştir. Elde edilen sonuçlardan, doğalgaz (veya biyogaz/metan) ilavesi ile özellikle de düşük yüklerde, termik verimlerde genel olarak bir miktar düşüş meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ancak, en uygun gaz yakıt / motorin oranı belirlenerek ve en uygun dizel püskürtme avansı belirlenerek, bu artışın minimize edilebileceği öngörülmüştür. Aşağıdaki Çizelge 4.3'te, NO_x-is ve termik verim-güç açısından farklı devirlerde elde edilen en iyi sonuçlar verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, 1.5 ms motorin püskürtme eşdeğeri yakıt püskürtmede, 28° püskürtme avansında ve %50 doğalgaz enerji içeriğinde çalışma şartlarının, hemen hemen tüm devirlerde en iyi sonuçlar arasında yer aldığı sonucuna varılmıştır. Bu sebeple, diğer ESC çalışma noktalarında, kısmi yüklerde ve farklı gaz yakıt enerji oranlarında, 1.5 ms motorin püskürtme eşdeğeri yakıt püskürtmede, 28° püskürtme avansında ve %50 doğalgaz enerji içeriği çalışma şartlarında motor çalıştırılmıştır.

Çizelge 4. 3 En iyi motor çalışma şartları ve performans-emisyon değerleri

Motor devri (d/d)	Motor Çalışma Şartı	Güç (kW)	Termik Verim (%)	NO _x (ppm)	İs (FSN)
2700	1,5ms 24derece %25doğalgaz	14,98	20,54	566	1,607
	1,5ms 28derece %50doğalgaz	17,7	20,47	941	0,9
2500	1,5ms 28derece %50doğalgaz	16,44	21,96	1205	0,448
	1,5ms 24derece %50doğalgaz	16,14	21,36	930	0,668
2300	1,5ms 28derece %50doğalgaz	15,22	20,26	1194	0,671
	1,5ms 24derece %50doğalgaz	15,16	19,66	982	0,908
2100	1,5ms 24derece %50doğalgaz	14,94	20,5	1174	1,351
	1,5ms 20derece %50doğalgaz	14,98	20,43	1018	2,06
	1,5ms 28derece %50doğalgaz	14,78	19,85	1267	0,468
1900	1,5ms 28derece motorin	12,94	24,97	1322	1,523
	1,5ms 24derece motorin	13,77	23,36	1036	2,8
	1,5ms 20derece motorin	12,83	23	854	2,512
	1,5ms 28derece %25doğalgaz	13,95	21,15	1315	0,621
	1,5ms 24derece %50doğalgaz	14,85	21,54	1539	0,382
	1,5ms 20derece %50doğalgaz	15,4	21,28	1277	1,294
	1,5ms 16derece %50doğalgaz	14,65	22,40	1169	1,94
	1,5ms 24derece motorin	12,76	25,52	1268	1,222
	1,5ms 20derece %25doğalgaz	12,88	21,95	1046	0,729

Çizelge 4. 3 En iyi motor çalışma şartları ve performans-emisyon değerleri(devamı)

1700	1,5ms 28derece %25doğalgaz	12,28	20,67	1534	0,154
	1,5ms 20derece %50doğalgaz	14,45	20,32	1288	0,814
	1,5ms 24derece %50doğalgaz	13,65	20,60	1675	0,182
1500	1,5ms 24derece motorin	11,2	24,35	1592	0,467
	1,5ms 20derece motorin	11,26	24,64	1328	0,992
	1,5ms 16derece %25doğalgaz	11,19	21,4	991	0,329
	1,5ms 24derece %50doğalgaz	12,3	21,03	2000	0,274
	1,5ms 20derece %50doğalgaz	13,07	21,04	1738	0,572
1300	1,5ms 16derece motorin	9,14	24,41	1624	0,155
	1,5ms 20derece motorin	10,06	24,59	1866	0,371
	1,5ms 16derece %25doğalgaz	10,66	20,66	1309	0,103
	1,5ms 16derece %50doğalgaz	11,28	19,98	1870	0,648
1100	1,5ms 16derece motorin	8,68	25,16	2080	0,074
	1,5ms 20derece motorin	8,5	22,8	2182	0,215
	1,75ms 20derece motorin	8,16	21,77	1119	1,672
	1,5ms 16derece %25doğalgaz	8,51	19,13	1811	0,04
	1,5ms 20derece %25doğalgaz	8,69	19,15	1920	0,068

Elde edilen en iyi sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2700d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 16,81 kW değerinden 17,7 kW Değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda, yalnız motorin kullanımına göre 15,67 kW değerinden 16,44 kW değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 13,89 kW değerinden 15,22 kW değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 13,89 kW değerinden 14,94 kW Değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1900d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 12,94 kW değerinden 13,95 kW Değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1700d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 12,25 kW değerinden 12,28 kW Değerine yükseldiği

görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 24° püskürtme avansı, 1500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 11,2 kW değerinden 12,3 kW değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 16o püskürtme avansı, 1300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 9,14 kW değerinden 11,28 kW Değerine yükseldiği görülmüştür. Motor gücü değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 20o püskürtme avansı, 1100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 8,5 kW değerinden 8,69 kW Değerine yükseldiği görülmüştür.

- Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2700d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 18,19 değerinden % 20,47 Değerine yükseldiği görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 20,91 değerinden % 21,96 Değerine yükseldiği görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28o püskürtme avansı, 2300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 20,33 değerinden % 20,26 Değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 21,31 değerinden % 20,5 Değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1900d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 24,97 değerinden % 21,15 Değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1700d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 24,79 değerinden % 20,67 Değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 24° püskürtme avansı, 1500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 24,35 değerinden % 21,03 değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 16° püskürtme avansı, 1300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 24,41 değerinden % 19,98

Değerine düştüğü görülmüştür. Termik verim değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 20° püskürtme avansı, 1100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre % 22,8 değerinden % 19,15 Değerine düştüğü görülmüştür.

- NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2700d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 636 ppm değerinden 941 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 753 ppm değerinden 1205 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 821 ppm değerinden 1194 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 909 ppm değerinden 1174 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1900d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1322 ppm değerinden 1315 ppm değerine düştüğü görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1700d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1491 ppm değerinden 1534 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 24° püskürtme avansı, 1500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1592 ppm değerinden 2000 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 16° püskürtme avansı, 1300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1624 ppm değerinden 1870 ppm değerine yükseldiği görülmüştür. NOx değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 20° püskürtme avansı, 1100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 2182 ppm değerinden 1920 ppm değerine düştüğü görülmüştür.
- İs değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2700d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 5,671 FSN

değerinden 0,9 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 5,14 FSN değerinden 0,448 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28o püskürtme avansı, 2300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 5,145 FSN değerinden 0,671 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 2100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda, yalnız motorin kullanımına göre 4,455 FSN değerinden 1,351 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1900d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1,523 FSN değerinden 0,621 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 28° püskürtme avansı, 1700d/d motor hızı, %25 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 1,08 FSN değerinden 0,154 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 24o püskürtme avansı, 1500d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 0,467 FSN değerinden 0,274 FSN değerine düştüğü görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 16° püskürtme avansı, 1300d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 0,155 FSN değerinden 0,648 FSN değerine yükseldiği görülmüştür. İş değeri; 1.5 ms püskürtme süresi, 20° püskürtme avansı, 1100d/d motor hızı, %50 doğalgaz ilaveli durumda ,yalnız motorin kullanımına göre 0,215 FSN değerinden 0,068 FSN değerine düştüğü görülmüştür.

Diğer taraftan, bir diğer çözüm olarak, deney sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, doğalgaza hidrojen ilave ederek, özellikle de yüksek hidrojen oranlarında (hacimsel olarak %30 hidrojen) termik verimde iyileşme sağlanabileceği görüşmüştür. Diğer taraftan, doğalgaz (veya metan) ve biyogaz ilavesi ile CO emisyonlarında ciddi miktarda artışlar meydana gelmiştir. Ancak, meydana gelen artışın oksidasyon katalisti ile önlenebileceği öngörülmektedir. Diğer bir çözüm olarak hidrojen ilavesi gerçekleştirilen çalışmada denenmiş ancak, beklenen iyileşme sağlanamamasına rağmen, hidrojen

oranının arttırılması ile iyileşmenin sağlanabileceği öngörülmektedir. HC emisyonları açısından gerçekleştirilen çalışmada, doğalgaz (veya metan) ve biyogaz ilavesi ile HC emisyonlarında ciddi miktarda artışlar meydana geldiği tespit edilmiştir. Yine, oksidasyon katalisti kullanımı ile HC emisyonlarında ciddi iyileşmeler sağlanabileceği öngörülmektedir. NO_x emisyonları açısından gerçekleştirilen incelemede, düşük yüklerde gaz yakıt ilavesi ile (doğalgaz veya metan) NO_x emisyonlarının yalnız motorin şartından daha düşük değerlerde olduğu gözlemlenirken, artan motor yükü ile NO_x emisyonlarında ciddi miktarda artış meydana geldiği görülmüştür. Gerçekleştirilen çalışmada, tam yük ve yüksek motor yüklerinde NO_x emisyonlarında meydana gelen artışı önlemek amacıyla biyogaz kullanılmıştır. Farklı CO₂ oranlarına sahip biyogazda, artan CO₂ ilavesi ile NO_x emisyonlarının kontrol altına alınabildiği sonucuna varılmıştır. CO₂ emisyonu açısından elde edilen sonuçlarda, gaz yakıt ilavesi ile bazen artış, bazen ise düşüş gözlemlenmiştir. Metan C/H oranı düşük bir yakıt olmasına rağmen, gaz yakıt ilavesi ile artan yanma verimi ile CO₂ formasyonunda artış meydana gelmesi beklenir. İS emisyonları açısından bakıldığında ise, hemen hemen tüm çalışma şartlarında gaz yakıt ilavesi ile İS miktarında ciddi iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca, doğalgaza hidrojen ilavesi ile beklendiği üzere, İS miktarında daha da iyileşme meydana geldiği görülmüştür. Yanma karakteristiği açısından yapılan incelemede, doğalgaz veya metan ilavesi ile silindir içi gaz basınçlarında ciddi miktarda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, hidrojen ilavesiyle silindir içi gaz basıncı değerleri daha da artarken, biyogaz kullanımı ile özellikle artan CO₂ oranı ile basınç artışı azalmıştır. Gaz yakıt ilavesi ile kontrolsüz yanma fazında açığa çıkan ısı miktarı artarak, kontrolsüz yanma dominantlığında bir yanma karakteristiği gözlemlenmiştir.

Kısacası, gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmadan, doğalgaz, biyogaz gibi gaz yakıtların, dizel motorlarda çift yakıt olarak kullanılması ile en uygun gaz yakıt/motorin oranının belirlenmesiyle ve de en uygun dizel püskürtme avansının belirlenmesi ile daha eski yanma sonrası iyileştirme sistemleri kullanılarak, performans, emisyon ve yanma karakteristiğinde iyileşme sağlanabileceği; böylece hem yakıt maliyetlerinde (doğalgazın düşük maliyetinden dolayı), hem de motor üretim maliyetlerinde (katalist malzemelerin maliyetinden dolayı) ciddi iyileşme sağlanabileceği öngörülmüştür. Diğer taraftan, elde edilen sonuçlardan, doğalgazın dizel motorlarda motorin yakıtı ile

beraber kullanılmasıyla, daha ekonomik ve daha eski sistem yanma sonrası iyileştirme sistemleri kullanılarak, yüksek emisyon regülasyonlarının sağlanabileceği öngörülmüştür. DPF sistemine ihtiyaç duyulmadan is emisyonlarında regülasyonların rahatlıkla karşılanabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency(2011)., CO2 Emissions From Fuel Combustion, 2011, IEA Publications, Paris, France.
- [2] Sopena, C., Dieguez, P. M., Sainz, D., Urroz, J.C., Guelbenzu, E.i ve Gandia, L.M., (2010) "Conversion Of A Commercial Spark Ignition Engine To Run On Hydrogen: Performance Comparison Using Hydrogen And Gasoline", Int. J. Hydrogen Energy, 35:1420-1429.
- [3] EEA (European Environment Agency) Report(2013)., "Trends And Projections In Europe 2013: Tracking Progress Towards Europe's Climate And Energy Targets Until 2020." Report No 10/2013.
- [4] Yoon, S.H. ve Lee, C.S., (2011). "Experimental Investigation on The Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Biogas–Biodizel Dual-Fuel Combustion in a CI Engine", Fuel Processing Technology, 92: 992-1000.
- [5] McTaggart-Cowan, G.P., Jones, H.L., Rogak, S.N., Bushe, W.K., Hill, P.G. ve Munshi, S.R., (2006). "Direct-Injected Hydrogen-Methane Mixtures In A Heavy-Duty Compression Ignition Engine", SAE paper no. 2006-01-065.
- [6] Sayın, C., (2013). "Dizel Engine Emissions Improvements By The Use Of Sun Flower Methyl Ester /Dizel Blends", Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi - J. of Thermal Science and Technology, 33: 83-88.
- [7] Ott, T., Onder, C. ve Guzzela, L., (2013). "Hybrid-Electric Vehicle with Natural Gas-Dizel Engine", Energies, 6: 3571-3592.
- [8] Garg, S., Parmar, A.J., Puri, S. ve Kumar, N., (2013). "Potential Utilization of CNG in Stationary HCCI Engine" SAE paper no. 2013-01-2508.
- [9] Zhou, J.H., Cheung, C.S. ve Leung, C.W., (2014). "Combustion, Performance And Emissions Of A Dizel Engine With H2, CH4 And H2-CH4 Addition" Int. J. Hydrogen Energy, 39:4611-4621.
- [10] Briggs, I., McCullough G., Spence, S. ve Douglas, R., (2014). "Whole-Vehicle Modelling Of Exhaust Energy Recovery On A Dizel-Electric Hybrid Bus", Energy, 65:172-181.

- [11] Barik, D. ve Murugan, S., (2014). "Investigation On Combustion Performance And Emission Characteristics Of A DI (Direct Injection) Dizel Engine Fueled With Biogasedizel In Dual Fuel Mode", *Energy*, 72:760-771.
- [12] Köse, H. ve Ciniviz, M., (2013). "An Experimental Investigation Of Effect On Dizel Engine Performance And Exhaust Emissions Of Addition At Dual Fuel Mode Of Hydrogen", *Fuel Processing Technology*, 114: 26–34.
- [13] Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F. ve Tırıs, M.,(2003). "Elektrikli Araçlar", TÜBİTAK – Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze-Kocaeli.
- [14] Bari, S. ve Esmail, M., (2010). "Effect Of H₂/O₂ Addition In Increasing The Thermal Efficiency Of A Dizel Engine", *Fuel*, 89: 378–383.
- [15] Çeper, B.A., (2009). Hidrojen-Doğalgaz Karışımlarının İçten Yanmalı Motorlarda Kullanılması, Doktora Tezi, Erciyes üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- [16] Hairuddin, A. A., Yusaf, T. ve Wandel, A.P., (2014). "A Review Of Hydrogen And Natural Gas Addition In Dizel HCCI Engines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32:739–761.
- [17] Wang, A., Ge, Y., Tan, J., Fu, M., Shah A.N., Ding, Y., Zhao, H. ve Liang, B., (2011). "On-Road Pollutant Emission And Fuel Consumption Characteristics Of Buses In Beijing J Of Environmental Science", 23:419-426.
- [18] Cacua K., Amell, A. ve Cadavid, F., (2012). " Effects of of Oxygen Enriched Air on The Operation and Performance of a Dizel-biogas Dual Fuel Engine", *Biomass and Bioenergy*, 45:159-167.
- [19] Mustafi, N.N. ve Raine, R.R., (2008). "A Study of the Emissions of a Dual Fuel Engine Operating with Alternative Gaseous Fuels", *SAE paper no. 2008-01-1394*.
- [20] Kaya, D., Çağman, S., Eyidoğan, M., Aydoner, C., Çoban, V. ve Tırıs, M., (2009). "Türkiye'nin Hayvansal Atık Kaynaklı Biyogaz Potansiyeli ve Ekonomisi", *Atık Teknolojileri Dergisi*, 1:48-51.
- [21] Koçer, N. N., Öner, C. ve Sugözü İ., (2006). Türkiye'de Hayvancılık Potansiyeli ve Biyogaz Üretimi, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 17:20.
- [22] IEA Bioenergy Task 37., (2011). Anaerobic Digestion Report Turkey's Situation in Biogas. IEA Biogas.
- [23] Ertem, F.C., Türkiye'de Biyogaz Yatırımları İçin Geçerli Koşulların Ve Potansiyelin Değerlendirilmesi, Biyogaz (Türk-Alman Biyogaz Projesi),
- [24] Alibaş, K., Biyogaz Nedir ve Nasıl Üretilir, Ziraat Uludağ Üniversitesi.
- [25] Carlucci, A.P., de Risi, A., Laforgia, D. ve Naccarato, F., (2008). "Experimental Investigation And Combustion Analysis Of A Direct Injection Dual-Fuel Diesel– Natural Gas Engine", *Energy*, 33:256–263.

- [26] Liu, J., Yang, F., Wang, H., Ouyang, M. ve Hao, S., (2013). "Effects Of Pilot Fuel Quantity On The Emissions Characteristics Of A CNG/Dizel Dual Fuel Engine With Optimized Pilot Injection Timing", *Applied Energy*, 110:201–206.
- [27] Bose, P.K. ve D. Maji, D., (2009). "An Experimental Investigation On Engine Performance And Emissions Of A Single Cylinder Dizel Engine Using Hydrogen As Inducted Fuel And Dizel As Injected Fuel With Exhaust Gas Recirculation", *Int. J. Hydrogen Energy*, 34:4847-4854.
- [28] Duc, P.M. ve Wattanavichien K., (2007). "Study On Biogas Premixed Charge Dizel Dual Fuelled Engine", *Energy Conversion and Management*, 48:2286-2308.
- [29] Königsson, F. P. S., H. A., (2011). "Combustion Modes in A Dizel-CNG Dual Fuel Engine", 2011-01-1962.
- [30] Umierski, M. ve Stommel, P., (2000). "Fuel Efficient Natural Gas Engine with Common-Rail Micro-Pilot Injection", 2000-01-3080.
- [31] Zhang, Y., Liu, X., Yang, Q., Han, X. Ve Cheng C., (2001). "The Studies Of An Electronically Controlled CNG System For Dual Fuel Engines" , 2001-01-0145.
- [32] Wong W.Y., Clark M.K. ve Stuart R.B., (1991). "Performance And Emissions of A NG Dual-Fueled, Indirect Injected Dizel Engine", 911766.
- [33] Selim, M.Y.E., (2004). "Sensitivity Of Dual Fuel Engine Combustion And Knocking Limits to Gaseous Fuel Composition", *Energy Conversion and Management*, 45:411–425.
- [34] Slawomir, L., (2001). "The Influence Of Regulating Parameters Of Dual Fuel Compression Ignition Engine Fuelled With LPG On Its Maximum Torque, Overall Efficiency And Emission", 2001-01-3264.
- [35] Chengji, Z.M.Y., (1999). "Operating Characteristics And Description Of A Dual Fuel Engine For Dizel–NG Heavy-Duty Operation", 1999-01-3523.
- [36] Kusaka, J., Daisho, Y., Kihara, R. ve Saito, T., (1998). "Combustion and exhaust gas emissions characteristics of a dizel engine dual-fueled with NG", In: *Proceedings of the COMODIA, Japan*.
- [37] IEA Bioenergy, 100% Biogas For Urban Transport In Linköping. Sweden Biogas In Buses, Cars And Trains. Biogas In The Society Information From IEA Bioenergy Task 37 Energy From Biogas And Landfill Gas.
- [38] Abd-Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. ve Abd-Rabbo, M.F., (2000). "Effect Of Pilot Fuel Quantity On The Performance Of A Dual Fuel Engine", *Energy Conversion and Management*, 41:559–72.
- [39] Abd-Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. ve Abd-Rabbo, M.F., (2002). "Effect Of Injection Timing On The Performance Of A Dual Fuel Engine", *Energy Conversion and Management*, 43:269–77.
- [40] Shinichi, G., Hirohide, F. ve Rafael, D.D., (1992). "Dual Fuel Dizel Engine Using Butane", 920690.

- [41] Sudhir, C.V., Desai, V., Kumar, S.Y. ve Mohanan, P., (2003). "Performance And Emission Studies On The Effect Of Injection Timing And Dizel Replacement On A 4-S LPG–Dizel Dual-Fuel Engine", 2003-01-3087.
- [42] William, P.J., John, B.N., Van der Lee, A., Lovkov, O., Koshin, V.K. ve Piatov, I.S., (1990). "All Electronic Dual Fuel Injection System For The Belarus D-144 Dizel Engine", 901502.
- [43] Poonia, M.P., Ramesh, A. ve Gaur R.R., (1998). "Effect Of Intake Air Temperature And Pilot Fuel Quantity On The Combustion Characteristics Of A LPG Dizel Dual Fuel Engine", 982455.
- [44] Dong-Jian, G.X., Li G. ve Zhang, X., (2001). "Study On Dizel–LPG Dual Fuel Engines", 2001-01-3679.
- [45] Ishida, M., Amimoto, N., Tagai, T. ve Sakaguchi D., (2001). "Effect Of EGR And Preheating On NG Combustion Assisted With Gas–Oil In A Dizel Engine", In: Proceedings of the COMODIA, Nagoya, Japan.
- [46] Nathan, S.S., Mallikarjuna J.M. ve Ramesh, A., (2010). "An Experimental Study Of The Biogasedizel HCCI Mode Of Engine Operation", Energy Conversion and Management, 51:1347-1753.
- [47] Luijten, C.C.M. ve Kerkhof, E., (2011). "Jatropha Oil and Biogas in a Dual Fuel CI Engine for Rural Electrification", Energy Conversion and Management, 52:1426-1438.
- [48] Pirouzpanah, V., Saray, R., Sohrabi, A. ve Niaei, A., (2007). "Comparison Of Thermal And Radical Effects Of EGR Gases On Combustion Process In Dual Fuel Engines At Part Loads", Energy Conversion and Management, 48:1909-1918.
- [49] Alçiçek, A. ve Demiruluş, H., (1994). "Çiftlik Gübrelerinin Biyogaz Teknolojisinde Kullanılması", Ekoloji Çevre Dergisi, 13:5-9.
- [50] Abd-Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. ve Abd-Rabbo, M.F., (2001). "Effects Of Diluent Admissions And Intake Air Temperature In Exhaust Gas Recirculation On The Emissions Of An Indirect Injection Dual Fuel Engine", Energy Conversion and Management, 42:1033–1045.
- [51] Pirouzpanah, V., Saray, R., Sohrabi, A. ve Niaei, A., (2007). "Comparison Of Thermal And Radical Effects Of EGR Gases On Combustion Process In Dual Fuel Engines At Part Loads", Energy Conversion and Management, 48:1909–1918.
- [52] Chandler, K., Kalkowicz, K. ve Eudy, L. "New York City Transit Dizel Hybrid-Electric Buses: Final Results"
- [53] Nwafor, O.M.I., (2007). "Effect Of Advanced Injection Timing On Emission Characteristic Of Dizel Engine Running On Natural Gas", Renewable Energy, 32:2361–2368.
- [54] Gunee, C., Razavi, M.R. ve Karim, G.A., (1998). "The Effects of Pilot Fuel Quality on Dual Fuel Engine Ignition Delay". 982453.

- [55] Makareviciene, V., Sendzikiene, E., Pukalskas, S., Rimkus, A. ve Vegneris, R., (2013). "Performance and Emission Characteristics of Biogas Used in Dizel Engine Operation", *Energy Conversion and Management*, 75:224-233.
- [56] IEA Bioenergy. "100% Biogas For Urban Transport In Linköping. Sweden Biogas In Buses, Cars And Trains. Biogas In The Society Information From IEA Bioenergy Task 37 Energy From Biogas And Landfill Gas". http://www.iea-biogas.net/_download/, 27.12.2014
- [57] Sahoo B.B., Sahoo N. ve Saha U.K., (2009). "Effect Of Engine Parameters And Type Of Gaseous Fuel On The Performance Of Dual-Fuel Gas Dizel Engines – A Critical Review". *Renew Sust Energy Rev*, 13:1151–84.
- [58] Subramanian, K.A., Vinaya, C., Mathad, V.K., Vijay, P. ve Subbarao, M.V., (2013). "Comparative Evaluation Of Emission And Fuel Economy Of An Automotive Spark Ignition Vehicle Fuelled With Methane Enriched Biogas And CNG Using Chassis Dynamometer", *Applied Energy*, 105:17–29.
- [59] Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R. ve Wright, I., (2008). "Progress In Carbon Dioxide Separation And Capture: A Review" *Journal of Environmental Science* 2008, 20:14–27.
- [60] Yuan, W. ve Bandosz, T.J., (2007). "Removal Of Hydrogen Sulphide From Biogas On Sludge Derived Adsorbents", *Fuel*, 86:2736–2746.
- [61] Aroonsrisopon, T., Salad, M., Wirosakunchai, E., Wannatong, K., Siangsanoth, S. ve Akarapanjavit, N., (2009). "Injection Strategies for Operational Improvement of Dizel Dual Fuel Engines under Low Load Conditions", 2009-01-1855.
- [62] Papagiannakis, R.G., Rakopoulos, C.D., Hountalas, D.T., Rakopoulos, D.C., (2010). "Emission Characteristics Of High Speed, Dual Fuel, Compression Ignition Engine Operating In A Wide Range Of Natural Gas/Dizel Fuel Proportions", *Fuel*, 89:1397-1406.
- [63] Hernandez, J.J., Lapuerta, M., Barba, J., (2016). "Seperate Effect Of H₂, CH₄ And CO On Dizel Engine Performance And Emissions Under Partial Dizel Fuel Replacement", *Fuel*, 165:173-184
- [64] Wang, Z., Zhao, Z., Wang, D., Tan, M., Han, Y., Liu, Z., Dou, H., (2016). "Impact Of Pilot Dizel Ignition Mode On Combustion And Emissions Characteristics Of A Dizel/Natural Gas Dual Fuel Heavy-Duty Engine", *Fuel*, 167:248-256.
- [65] Li, W., Liu, Z., Wang, Z., Dou, H., Wang, C., Li, J., (2016). "Experimental And Theoretical Analysis Of Effects Of Equivalence Ratio On Mixture Properties, Combustion, Thermal Efficiency And Exhaust Emissions Of A Pilot-Ignited NG Engine At Low Loads", *Fuel*, 171:125-135.
- [66] Shan, X., Qian, Y., Zhu, L., Lu, X., (2016). "Effects Of EGR Rate And Hydrogen/Carbon MoNOxide Ratio On Combustion And Emission Characteristics Of Biogas/Dizel Dual Fuel Combustion Engine", *Fuel*, 181:1050-1057.

- [67] Yilmaz, I.,T., Gumus, M., (2017). "Investigation Of The Effect Of Biogas On Combustion And Emissions Of TBC Dizel Engine", *Fuel*, 188:69-78.
- [68] Mansor, M., R., A., Abbood, M., M., Mohamad, T., I., (2017). "The Influence Of Varying Hydrogen-Methane-Dizel Mixture Ratio On The Combustion Characteristics And Emissions Of A Direct Injection Dizel Engine", *Fuel*, 190:281-291.
- [69] Xu, M., Cheng, W., Zhang H., An, T., Zhang, S., (2016). " Effect Of Dizel Pre-Injection Timing On Combustion And Emission Characteristics Of Compression Ignited Natural Gas Engine", *Energy Conversion and Management*, 117:86-94.
- [70] Mittal, M., Donahue, R., Winnie, P., Gilette, A., (2015). " Exhaust Emission Characteristics Of A Multi-Cylinder 18.1-L Dizel Engine Converted To Fueled With Natural Gas And Dizel Pilot", *Journal of the Energy Institute*, 88:275-283.
- [71] Zhang, Q., Li, M., Shao, S., (2015). " Combustion Process And Emissions Of A Heavy-Duty Engine Fueled With Directly Injected Natural Gas And Pilot Dizel", *Applied Energy*, 157:217-218.
- [72] Kakaee, A., Rahnama, P., Paykani, A., (2015). "Influence Of Fuel Composition On Combustion And Emissions Characteristics Of Natural Gas/Dizel RCCI Engine", *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 25:58-65.
- [73] Bora, B., J., Saha, U., K., (2016). "Experimental Evaluation Of A Rice Bran Biodizel – Biogas Run Dual Fuel Dizel Engine At Varying Compression Ratios", *Renewable Energy*, 87:782-790.
- [74] Zhang, C., Song., J., (2016). "Experimental Study Of Co-Combustion Ratio On Fuel Consumption And Emissions Of NG-Dizel Dual-Fuel Heavy-Duty Engine Equipped With A Common Rail Injection System", *Journal of Energy Institute*, 89:578-585.
- [75] Yang, W., M., An, H., Duan, L., (2015). "Impact Of Methane Addition On The Performance Of Biodizel Fueled Dizel Engine", *Applied Energy*, 160:784-792.
- [76] AVL,(2013). "Boost Version 2013.2", Graz, Austria.
- [77] Merker G.P., Schwarz, C., Stiesch, G., Otto, F. (2006).Simulation of combustion and pollutant formation for engine-development, Springer, Verlag Berlin Heidelberg.
- [78] Heywood,J.B.,(1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw Hill International Editions,New York.
- [79] Ji,C. ve Wang,S.,(2009)." Effect of Hydrogen Addition on the Idle Performance of a Spark Ignited Gasoline Engine at Stoichiometric Condition", *Int. J. Hydrogen Energy*, 34:3546-3556.
- [80] Demidow,K. ve Kolchin,A.,(1984).Design of Automotive Engines, Mir Publishers,Moscow.
- [81] Ji,C., Wang,S. ve Zhang,B.,(2010)." Combustion and Emissions Characteristics of a Hybrid Hydrogen Gasoline Engine Under Various Loads and Lean Conditions", *Int. J. Hydrogen Energy*,35:5714-5722.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Yasin KARAGÖZ
Doğum Tarihi ve Yeri :24.08.1986 İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :karagozzyasin@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Makine Mühendisliği / Enerji Programı	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Makine Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-Devam ediyor	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

YAYINLARI

Makale

1. Karagöz Y.,Sandalci T.,Yüksek L.,Dalkiliç A. S.,Wongwises S. (2016). Effect of hydrogen diesel dual fuel usage on performance emissions and dizel combustion in dizel engines. Advances in Mechanical Engineering, 8(8), 1-13., Doi: 10.1177/1687814016664458
2. Karagöz Y.,Sandalci T.,Köylü Ü.,Dalkiliç A. S.,Wongwises S.(2016). Effect of the use of natural gas dizel fuel mixture on performance emissions and combustion characteristics of a compression ignition engine. Advances in Mechanical Engineering, 8(4), 1-13., Doi: 10.1177/1687814016643228
3. Karagöz Y.,Güler İ.,Sandalci T.,Yüksek L.,Dalkiliç A. S. (2016). Effect of hydrogen enrichment on combustion characteristics emissions and performance of a dizel engine. International Journal of Hydrogen Energy, 41(1), 656-665., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.09.064
4. Karagöz Y.,Güler İ.,Sandalci T.,Yüksek L.,Dalkiliç A. S.,Somchai W. (2016). Effects of hydrogen and methane addition on combustion characteristics emissions and performance of a CI engine. International Journal of Hydrogen Energy, 41(2), 1313-1325., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.112
5. Sandalci T.,Karagöz Y. (2015). Kismi yük şartlarında hidrojen zenginleştirilmiş dizel yanmasının motor performansi ve emisyonlar üzerindeki etkisi. ISI Bilimi ve Teknigi Dergisi-Journal of Thermal Science and Technology, 35(2), 107-117. (Yayın No: 1854343)
6. Karagöz Y.,Yuca N.,Sandalci T.,Dalkiliç A. S. (2015). Effect of hydrogen and oxygen addition as a mixture on emissions and performance characteristics of a gasoline engine. International Journal of Hydrogen Energy, 40(28), 8750-8760., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.039
7. Karagöz Y.,Sandalci T.,Dalkiliç A. S. (2015). Effects of hydrogen and oxygen

enrichment on performance and emissions of an SI engine under idle operating condition. International Journal of Hydrogen Energy, 40(28), 8607-8619., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.05.006

8. Karagöz Y.,Sandalci T.,Yüksek L.,Dalkılıç A. S. (2015). Engine performance and emission effects of dizel burns enriched by hydrogen on different engine loads. International Journal of Hydrogen Energy, 40(20), 6702-6713., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.03.141
9. Karagöz Y.,Orak E.,Yüksek L.,Sandalci T. (2015). Effect of hydrogen addition on exhaust emissions and performance of a spark ignition engine. environmental engineering and management journal, 14(3), 665-672.
10. Karagöz Y.,Yüksek L.,Sandalci T.,Dalkılıç A. S. (2015). An experimental investigation on the performance characteristics of a hydroxygen enriched gasoline engine with water injection. International Journal of Hydrogen Energy, 40(1), 692-702., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.11.013
11. Sandalci T.,Karagöz Y. (2014). Experimental investigation of the combustion characteristics emissions and performance of hydrogen port fuel injection in a dizel engine. International Journal of Hydrogen Energy, 39(32), 18480-18489., Doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.09.044
12. Sandalci T.,Karagöz Y.,Orak E.,Yüksek L. (2014). An Experimental Investigation of Ethanol Dizel Blends on Performance and Exhaust Emissions of Dizel Engines. Advances in Mechanical Engineering, 6(0), 409739-409739., Doi: 10.1155/2014/409739