

TURBOŞARJLI ÖN YANMA ODALI BİR DİZEL MOTORUNDA BENZİN-DİZEL YAKITI KARIŞIMLARININ KULLANILMASININ MOTOR PERFORMANS PARAMETRELERİ VE NO_x EMİSYONU ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Zehra ŞAHİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü TRABZON
zsahin@ktu.edu.tr

(Geliş/Received: 19.04.2014; Kabul/Accepted: 13.03.2015)

ÖZET

Sunulan çalışmada, Ford XLD 418T tipi turboşarjlı ön yanma odalı bir taşıt dizel motorunda benzin-dizel yakıtı karışımlarının (BDYK'larının) kullanılmasının yanma, motor performans karakteristikleri ve NO_x emisyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve geleneksel dizel yakıtı ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Deneysel çalışmalar; tam gazda, farklı motor devirlerinde ve % (2, 4, 6, 8 ve 10) gibi 5 farklı benzin oranında gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda; benzin oranının artması ile tutuşma gecikmesinin ve açığa çıkan ısı miktarının arttığı görülmüştür. Ayrıca BDYK'ları ile motor performans karakteristiklerinin ve azot oksit (NO_x) emisyonunun iyileştiği ve özellikle orta devirlerde sağlanan iyileşmelerin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Örneğin (2000, 2500 ve 3000) [d/d] gibi motorun orta devirlerinde; özgül yakıt tüketiminde (ÖYT'nde), ortalama olarak % 2,97, % 5,29 ve % 4,11 oranlarında azalma ve bunun sonucunda yakıt maliyetinde ise ortalama % 1,70, % 4,04 ve % 2,86 oranlarında azalma belirlenmiştir. Yine aynı devirlerde efektif güç; % 1,20, % 2,01 ve % 1,92 oranlarında artmıştır. Ayrıca söz konusu devirlerde NO_x emisyonunda da ortalama % 10,04, % 10,33 ve % 15,21 oranlarında azalma gözlenmiştir. Böylece söz konusu motorda benzinin % 10'dan düşük oranlarda dizel yakıtına karıştırılarak kullanılmasıyla yanmanın, motor performans karakteristiklerinin iyileştiği ve NO_x emisyonunun azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Benzin-dizel yakıtı karışımları, açığa çıkan ısı miktarı, NO_x emisyonu, yakıt maliyeti

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF USING GASOLINE- DIESEL FUEL BLENDS ON COMBUSTION, ENGINE PERFORMANCE PARAMETERS AND NO_x EMISSION IN A TURBOCHARGED PRE-CHAMBER DIESEL ENGINE

ABSTRACT

In the present study, the effects of gasoline-diesel fuel blends (GDFBs) on the combustion, engine performance parameters, and NO_x emission have been investigated in a Ford XLD 418 T type turbocharged pre-chamber automobile diesel engine. Experiments have been performed for (2, 4, 6, 8 and 10) % (by vol) gasoline ratios at different engine speeds for 1/1 fuel delivery rate. It is found that ignition delay and heat release rate increase with increasing gasoline ratios. Also, engine performance parameters and NO_x emission are improved by using GDFBs and improvement tendency becomes more obvious at moderate speeds. For example; brake specific fuel consumption and fuel cost decrease approximately 2.97 %, 5.29 % and 4.11 % and 1.70 %, 4.04 % and 2.86 % for all of the gasoline ratios at (2000, 2500 and 3000) rpms, respectively. Effective power increases at the levels of 1.20 %, 2.01 % and 1.92 % and NO_x emission decreases approximately 10.04 %, 10.33 % ve 15.21 % for all of the gasoline ratios at (2000, 2500 and 3000) rpms, respectively. As a result, combustion, engine performance parameters and NO_x emission of this engine have been improved by using (2-10) % GDFBs.

Keywords: Gasoline-diesel fuel blends, heat release rate, NO_x emission, fuel economy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorları; verimleri % 40'lara kadar çıkabilen en verimli termik makinelerdir ve dizel motorları bu özelliği nedeni ile karayolu taşıtlarının yanında gemilerde ve sanayinin diğer alanlarında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilim insanları ve otomobil firmaları, söz konusu motorların verimini daha da artırmak ve aynı zamanda çevre kirliliğini de daha da azaltmak için çalışmalarını sürdürmektedirler. Aynı zamanda, bilindiği gibi, içten yanmalı motorlarda ve sanayinin diğer alanlarında kullanılan fosil yakıtların rezervleri sınırlıdır ve yakın gelecekte tükenme tehlikesi vardır. Bu nedenle fosil yakıtların yerine geçebilecek veya dizel yakıtı ile birlikte kullanılacak alternatif yakıt arayışları yanında özellikle mevcut yakıtların ekonomik kullanımı da önem kazanmaktadır [1-2].

Bilindiği gibi benzin, fosil kökenlidir ve buji ateşlemeli motorların ana yakıtıdır. Bununla birlikte; benzin, fumigasyon ve karışım gibi iki farklı yöntemle dizel motorlarında da kullanılabilir ve söz konusu yöntemlerin uygulanması ile motor performans parametrelerinin iyileştiği ve çevre kirliliğinin azaldığı belirlenmiştir [4-9]. Benzinin emme kanalında emme havasının içerisine püskürtüldüğü *fumigasyon yöntemi* ile ilgili Durgun ve Şahin tarafından hem deneysel ve hem de sayısal çalışmalar yapılmıştır [2, 4, 5]. Ford XLD 418T tipi turboşarjlı dizel motorunda (yani sunulan çalışmada kullanılan motorda) benzin fumigasyonu incelenmiştir ve bu çalışma sonunda; ÖYT'inde ve maliyette ortalama % 5 oranında ve NO_x 'te % (5-10) ve is'te ise % (10-25) oranlarında azalmalar belirlenmiştir [2]. Ayrıca tek silindirli bir dizel motorunda 2, 4, 6, 8 10 % (hacimsel) benzin fumigasyonu, (900-1600 d/d) gibi değişik devirlerde incelenmiştir. Söz konusu çalışma sonunda; efektif gücün % (4-9) %, efektif verimin % (1,4-4) arttığı ve ÖYT'nin ise % (1,4-4) azaldığı belirlenmiştir [4]. İlgili çalışmalar sonunda benzin fumigasyonunun motor performans parametreleri ve NO_x ve is açısından ümit verici sonuçlar verdiği görülmüştür.

Benzinin dizel yakıtına doğrudan karıştırılarak kullanıldığı *karışım (benzin-dizel yakıtı karışımı) yöntemi* ile ilgili çalışmalar daha sınırlı sayıdadır [6-9]. Han ve arkadaşları [6], tek silindirli bir dizel motorunda, % 20 ve % 40 BDYK'larının NO_x ve is emisyonları üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. İlgili çalışmada, BDYK'larının NO_x ve is emisyonlarını önemli ölçüde azalttığı belirlenmiştir. Çalışmada, söz konusu azalmanın nedenleri aşağıdaki gibi açıklanmıştır: Benzinin setan sayısı dizel yakıttan düşük olduğundan, BDYK'ları ile tutuşma gecikmesi artmaktadır. Böylece, tutuşma gecikmesinin artması ile yakıt-hava karışımının yanmaya hazırlanması için geçen süre de arttığından, yakıt ile hava daha homojen karışmaktadır. Bunların sonucunda yanma iyileşmektedir [6]. Ayrıca, benzin

karışımları ile yanma odası içerisinde yüksek sıcaklıklı bölgelerin sıcaklıklarının azaldığı düşünülmektedir. BDYK'ları ile ilgili diğer bir çalışma da Park ve arkadaşları [7] tarafından gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada da BDYK'ları ile, NO_x ve is emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir ve bu gazların oranlarının azalma nedenlerinin yukarıda özetlenen açıklamalara benzer olduğu belirtilmiştir [7].

Yukarıdaki açıklamalardan benzinin, fumigasyon veya karışım yöntemlerinden birisi ile dizel motorlarında kullanılması ile NO_x ve is emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı anlaşılmaktadır. Fakat literatürde benzin-dizel yakıtı karışımları ile ilgili çalışmalar sınırlı sayıdadır ve BDYK'larının daha çok eksoz gazları üzerinde etkileri incelenmiş ve motor karakteristikleri ve yakıt maliyet analizi ile ilgili bilgiler çok sınırlı biçimde verilmiştir. Bu nedenle, sunulan çalışmada, benzin-dizel yakıtı karışımlarının, yanma, motor performans karakteristikleri, yakıt maliyeti ve NO_x emisyonu üzerindeki etkilerinin turboşarjlı ön yanma odalı bir dizel motorunda deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ön yanma odalı dizel motorları günümüzde pek kullanılmamaktadır. Buna karşın, common-rail püskürtme sisteminin geliştirilmesiyle direkt püskürtmeli dizel motorlar yaygınlaşmış ve özellikle binek taşıtlarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, ön yanma odalı motorlarda yapılabilecek iyileşmeler ile ilgili motorların kullanımı da yaygınlaştırılabilir ve daha düşük basınçlı püskürtme sistemine sahip daha ucuz motorlar geliştirilebilir. Bu nedenle ön yanma odalı dizel motorları üzerinde bilimsel çalışmaların devam etmesi de önem taşımaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1 Deneysel Sistemi (Experimental Setup)

Sunulan çalışmada, benzin-dizel yakıt karışımlarının yanma, motor performans karakteristikleri ve NO_x emisyonu üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, KTÜ Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Böl. İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvar'ında bulunan ve Cussons firması tarafından üretilmiş olan deney düzeneği kullanılmıştır ve deneyler Ford XLD 418T tipi turboşarjlı ön yanma odalı bir taşıt dizel motorunda gerçekleştirilmiştir. İlgili motorun başlıca teknik özellikleri Tablo 1'de ve deney donanımının şematik resmi ise Şekil 1'de sunulmuştur.

Deneysel sistemde yükleme, Şekil 1'de 13 numara ile gösterilmiş olan su freni ile gerçekleştirilmektedir. Deneysel düzeneğinde bulunan çok fonksiyonlu yakıt debi ölçeri ile, Δm [gr] şeklinde ayarlanan yakıt miktarının harcanma süresi Δt [s] olarak ölçülerek, yakıt debisi belirlenmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun başlıca teknik özellikleri
(Main technical specifications of the test engine)

Motor	Ford XLD 418 T turboşarjlı ön yanma odalı
Strok hacmi ve silindir sayısı	1,753 [litre], 4
Çap ve strok	82 ve 82,5 [mm]
Sıkıştırma oranı ve püskürtme basıncı	21,5 ve 150 [bar]
Maksimum güç	55 [kW], 4500 [d/d]'da
Maksimum moment	152 [Nm], 2200 [d/d]'da
Biyelin eksenleri arasındaki uzaklık	130 [mm]

Bilindiği gibi motorlardaki deneysel çalışmalarda; basınç-hacim (p-V) veya basınç-krank mili açısı (p-θ) diyagramlarının (indikatör diyagramının) deneysel olarak elde edilmesi çok önemlidir. Sunulan çalışmada kullanılan deney sisteminden indikatör diyagramı da elde edilebilmektedir. İndikatör diyagramının elde edilebilmesi için motorun 1. silindirinde mevcut olan kızdırma bujisi sökülmüş ve yerine AVL firmasından sağlanan basınç algılayıcısı (sensörü) takılmıştır. Böylece silindir basıncı; ilgili basınç sensörü ile elektrik sinyalleri şeklinde algılanabilmekte ve bu sinyaller indikatör sistemi ve veri derleme kartı ile bilgisayara aktararak sayısal basınç değerlerini dönüştürülmektedir [1]. NO_x emisyonunun ölçülmesi Horiba firması tarafından üretilmiş olan MEXA-720 NO_x eksoz gazı analiz cihazı ile gerçekleştirilmiştir ve söz konusu cihazın teknik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

2.2 Saf Dizel Yakıtı ve Benzin-Dizel Yakıtı Karışımları İçin Yapılan Deneyler (Performed Experiments for NDF and GDFBs)

Benzin-dizel yakıtı karışımları (BDYK'ları) deneylerine başlamadan önce, saf dizel yakıtı (SDY) ile ilgili deneyler yapılmıştır. SDY ve BDYK deneylerinde, deney sisteminde ve motorda herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. SDY ile ilgili deneyler tamamlandıktan sonra BDYK'ları ile ilgili deneylere geçilmiştir. Hem SDY ve hem de BDYK ile ilgili deneylerde, (1500, 2000, 2500, 3000, 3500 ve 4000) [d/d] olmak üzere farklı 6 devir sayısı seçilmiştir ve deneyler tam gaz durumunda yapılmıştır. SDY deneyleri tamamlandıktan sonra çeşitli BDYK'ları ile ilgili deneysel çalışmaya geçilmiştir. Söz konusu deneylere başlamadan önce ilgili her bir deney için yakıt karışımının hazırlanmasında, dizel yakıtı için 6000 [ml]'lik A tipi mezur (hacimsel deney tüpü), benzin yakıtı için 1000 [ml]'lik A tipi mezur kullanılarak % (2, 4, 6, 8 ve 10) hacimsel oranlarında beş farklı karışım hazırlanmıştır. BDYK çalışmasında deney sisteminde ve motorda başka herhangi bir değişiklik yapılmamıştır ve motor, dizel ilkesine göre çalıştırılmıştır. Her hacimsel orandaki deneye başlamadan önce yakıt filtresi temizlenmiştir. Daha sonra motor yeni BDYK ile ilgili hız ve yüklemeye altında 15 dakika çalıştırılmıştır.

Böylece yakıt borularında önceki hacimsel oranlı karışımdan kalmış olabilecek yakıt artıklarının tamamen temizlenmesi sağlanmıştır.

SDY ve BDYK deneyleri tam gaz durumunda 6 farklı devir sayısında yapılmıştır. BDYK deneylerinde ise; hacimsel olarak % (2, 4, 6, 8 ve 10) benzin oranları kullanılmıştır ve deneylerde ölçümler 3'er kez tekrarlanmıştır.

2.3 Motor Karakteristiklerinin Hesabı (Calculation of Engine Characteristics)

Deney sonuçlarının SDY ve BDYK'ları için değerlendirilmesinde ayrıntıları Durgun [3, 10]'da verilmiş olan hesap yöntemi uygulanmıştır. Motor milinden elde edilen efektif güç standart koşullara dönüştürülmüş ve nem düzeltmesi yapılmış olarak aşağıdaki bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$N_e[\text{kW}] = \frac{M_d \cdot \omega}{1000} \cdot \frac{0,1013}{p_0} \cdot \frac{T_0}{293} \cdot X_{nem} \quad (1)$$

Burada ω [rad/s] açısal hız, n [d/d] motor devir sayısı ve M_d [Nm] döndürme momenti, p_0 [MPa] ve T_0 [K] dış ortam basıncı ve sıcaklığı ve X_{nem} nem düzeltme faktörüdür. Deneylerde; $\Delta m = 40$ [gr] yakıtın Δt [s] harcanma süresi ölçülerek yakıt tüketimi belirlenmiştir. Buna göre saatlik toplam yakıt tüketimi, özgül yakıt tüketimi (ÖYT) ve efektif verim;

$$B[\text{kg/h}] = \frac{\Delta m_y}{\Delta t}, \quad b_e[\text{kg/kWh}] = \frac{B}{N_e},$$

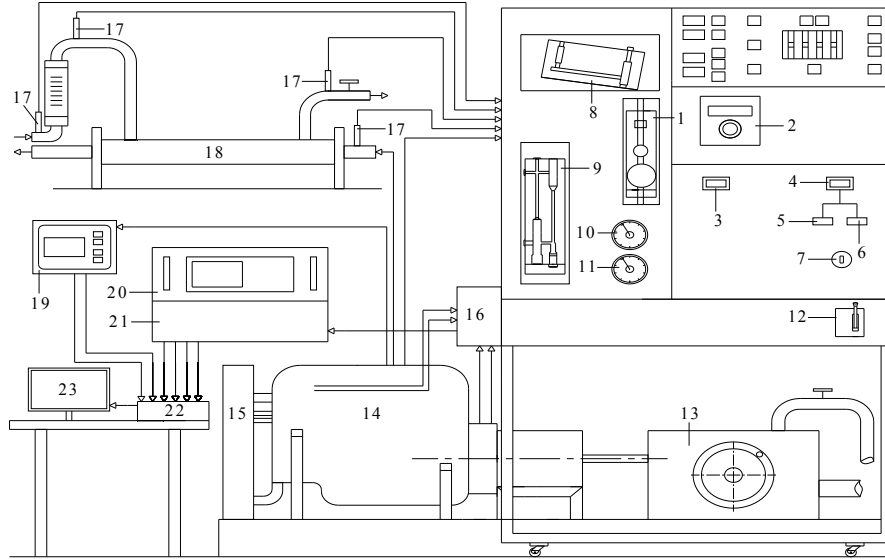
$$\eta_e = \frac{3600}{H_u \cdot b_e} \quad (2)$$

bağıntılarından hesaplanmıştır. Ayrıca yakıtın alt ısı değeri çok iyi bilinen

$$H_u[\text{kJ/kg}] = [33,91 \cdot c' + 125,6 \cdot h' - 10,89 \cdot (o_y' - s') - 2,51 \cdot (9 \cdot h' + w')] \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Mendeleyev formülünden belirlenmiştir [10, 11]. Isıl değerinin hesabında ve diğer yanma hesaplarında gerekli olan; yakıtın elemansel bileşimi ile ilgili c' , h' , o_y' , s' ve w' değerleri yakıtın kapalı (kimyasal) formülünden yararlanarak hesaplanmıştır. Söz konusu değerler ve dizel yakıtının ve benzinin başlıca özellikleri de Tablo 3'te sunulmuştur. Efektif güç ve diğer motor performans karakteristiklerinin SDY'na göre değişim oranları ile eksoz emisyonları oranlarının değişim oranları aşağıda efektif güç için verilen bağıntıya benzer şekilde hesaplanmıştır.

$$\frac{\Delta N_e}{N_e} 100[\%] = \frac{N_{e,BDYK} - N_{e,SDY}}{N_{e,SDY}} 100 \quad (4)$$



Şekil 1. Deney sisteminin şematik görünüşü. 1-yakıt ölçme ünitesi, 2-sıcaklık göstergesi, 3-hız, 4-kuvvet, (5-6)-yükleme ünitesi, 7-başlatma düğmesi, 8-eğik manometre, 9-civalı U manometresi, 10-yağlama yağı basıncı, 11-emme manifoldu basıncı, 12-gaz kolu, 13-hidrolik dinamometre, 14-motor, 15-soğutma ünitesi, 16-basınç sensörü ara yüzey ünitesi, 17-termik çift (termokupul) soketleri, 18-eksoz gazı kalorimetresi, 19-NO_x analiz cihazı, 20-osiloskop, 21-elektronik indikatör ünitesi, 22-veri derleme kartı, 23-bilgisayar (Schematic view of the test system. 1-fuel measurement unit, 2-digital display for temperatures, 3-speed, 4-force, (5,6)-loading unit, 7-start switch, 8-inclined manometer, 9-coolant flow meter, 10-oil temperature, 11-inlet manifold pressure, 12-gas throttle, 13-hydraulic dynamometer, 14-engine, 15-cooling package, 16-inference unit for gas pressure, fuel line pressure and crank angle pick-up sensors, 17-termocouples, 18-exhaust gas calorimeter, 19-gas analyzer, 20-oscilloscope, 21-electronic indicating system, 22-data acquisition card, 23-computer)

Tablo 2. MEXA-720 NO_x eksoz gazı analiz cihazının ölçüm aralıkları (Target component and ranges and accuracies of the measurements of the MEXA-720 NO_x gas analyzer)

Azot oksit (NO _x)	(0-3000) [ppm] ; ±(3-5) [%] [ppm]
Hava yakıt oranı (A/F)	(9,5-200) ; ±(0,15-3,7)
Hava fazlalık katsayısı (λ)	(0,65-13,7)
Oksijen (O ₂)	Hacimsel % (0- 20) ; ± 0,5 % O ₂

Tablo 3. Dizel yakıtının ve benzinin başlıca özellikleri [12, 13] (Main properties of diesel fuel and gasoline)

	Dizel yakıtı	Benzin
Kimyasal formül	C _{14,342} H _{24,75}	C ₇ H ₁₇
Molekül kütlesi [kg/kmol]	197,21	101,2130
Yoğunluk [kg/m ³]	0,814*	0,737*
Alt ısı değer [kJ/kg]	42685,7**	45609,07**
Elemensel bileşim, %	c' = 0,873	c' = 0,831
	h' = 0,127	h' = 0,169
Fiyat [TL/lit], Kasım 2014	4,78	5,20

Buradaki N_{e,BDYK} ve N_{e,SDY} sırasıyla BDYK ve SDY deneylerinden belirlenen efektif güç değerleridir.

2.4 BDYK'larının Bazı Yanma Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of the Combustion Main Properties of BDFBs)

Farklı BDYK'larının yoğunluklarının, alt ısı değerlerinin ve teorik hava miktarlarının hesaplanmasıyla ilgili bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$\rho_{BDYK} \text{ [kg/m}^3\text{]} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \rho_i)}{100} \quad (5a)$$

$$H_{u,BDYK} \text{ [kJ/kg]} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \rho_i \cdot H_{u,i})}{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot \rho_i)} \quad (5b)$$

$$h_{min,BDYK} \text{ [kg}_{\text{hava}}/\text{kg}_{\text{yakıt}}\text{]} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_i \cdot h_{min,i}}{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \rho_i} \quad (5c)$$

Buradaki x_i dizel yakıtının ve benzinin karışımdaki hacimsel oranları, ρ_i dizel yakıtının ve benzinin yoğunlukları, $H_{u,i}$ dizel yakıtının ve benzinin alt ısı değerleri, $h_{min,i}$ ise dizel yakıtının ve benzinin teorik hava miktarı değerleridir.

2.5 Yakıt Maliyet Analizi (Fuel Cost Analysis)

Burada, Durgun [3] tarafından geliştirilmiş olan pratik bir maliyet analizi bağıntısı kullanılarak benzin karışımları için maliyet analizi yapılmıştır ve yakıt maliyetindeki değişim oranları belirlenmiştir.

$$\frac{\Delta F}{F_1} \cdot 100[\%] = \frac{F_2 - F_1}{F_1} \cdot 100 = \left[\frac{x_1 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot r_i}{2} \left(1 + \frac{\Delta b_e}{b_e}\right) - 1 \right] \cdot 100 \quad (6)$$

$$\frac{x_1 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot s_i}{2}$$

$$r_1 = F_1/F_1, \quad r_1 = F_1/F_1 = 1$$

$$r_2 = F_2/F_1 = 4,63/4,12 = 1,124$$

$$s_1 = \rho_i/\rho_d, \quad s_1 = \rho_d/\rho_d = 1$$

$$s_2 = \rho_b/\rho_d = 734/810 = 0,906$$

Buradaki F_1 dizel yakıtının, F_2 ise benzinin fiyatıdır, ρ_d ve ρ_b sırasıyla dizel yakıtının ve benzinin yoğunluklarıdır. $\Delta b_e/b_e$ ise ÖYT'nin değişim oranıdır. (F_1 , F_2), (ρ_d , ρ_b) ve b_e büyüklüklerinin birimleri sırasıyla [TL/l], [kg/m³] ve [kg/kWh]'dir.

2.6 Açığa Çıkan Isı Miktarının Hesaplanması (Heat Release Analysis)

Sunulan çalışmada, açığa çıkan ısı miktarı (heat release) Heywood [12] tarafından verilen yöntemle hesaplanmıştır. Çok iyi bilindiği gibi, bu yöntemde, açığa çıkan ısı miktarını hesaplamak için deneysel olarak ölçülen silindir basıncı verileri kullanılmaktadır. Sunulan çalışmada, silindir basıncı 0,4 derecelik adımlarla ölçülmüştür. Böylece Termodinamiğin 1. Kanunundan yararlanarak, açığa çıkan ısı miktarı (J/der.) için aşağıdaki bağıntı düzenlenmiştir.

$$\frac{dQ}{d\theta} [J/KMA] = \frac{\lambda}{\lambda-1} p \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\lambda-1} V \frac{dp}{d\theta} \quad (7)$$

Burada λ özgül ısıların oranı [$c_p/(c_v - R)$], p silindir basıncı, V silindir hacmi, $dp/d\theta$ basınç değişimi ve $dV/d\theta$ ise hacim değişimidir. Ayrıca, açığa çıkan ısı miktarını hesaplamak için aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır. Sunulan çalışmada ön yanma odalı dizel motoru kullanılmıştır. Bununla birlikte, ön yanma odasını ana yanma odasına bağlayan dar boğazdaki kayıplar ihmal edilmiştir. Ayrıca, silindir içindeki gaz karışımının homojen olduğu ve gaz karışımının ideal

gaz şeklinde davrandığı, silindir içinde basınç dalgalanmalarının ve yüksek sıcaklık değişimlerinin olmadığı ve silindirden gaz kaçaklarının olmadığı varsayılmıştır. Ayrıca, açığa çıkan ısı miktarı, emme supabının kapandığı an ile eksoz supabının açıldığı an arasındaki zaman dilimi için hesaplanmıştır [12, 14, 15].

2.7 Hata Analizi ve Belirsizlikler (Error Analysis and Uncertainties)

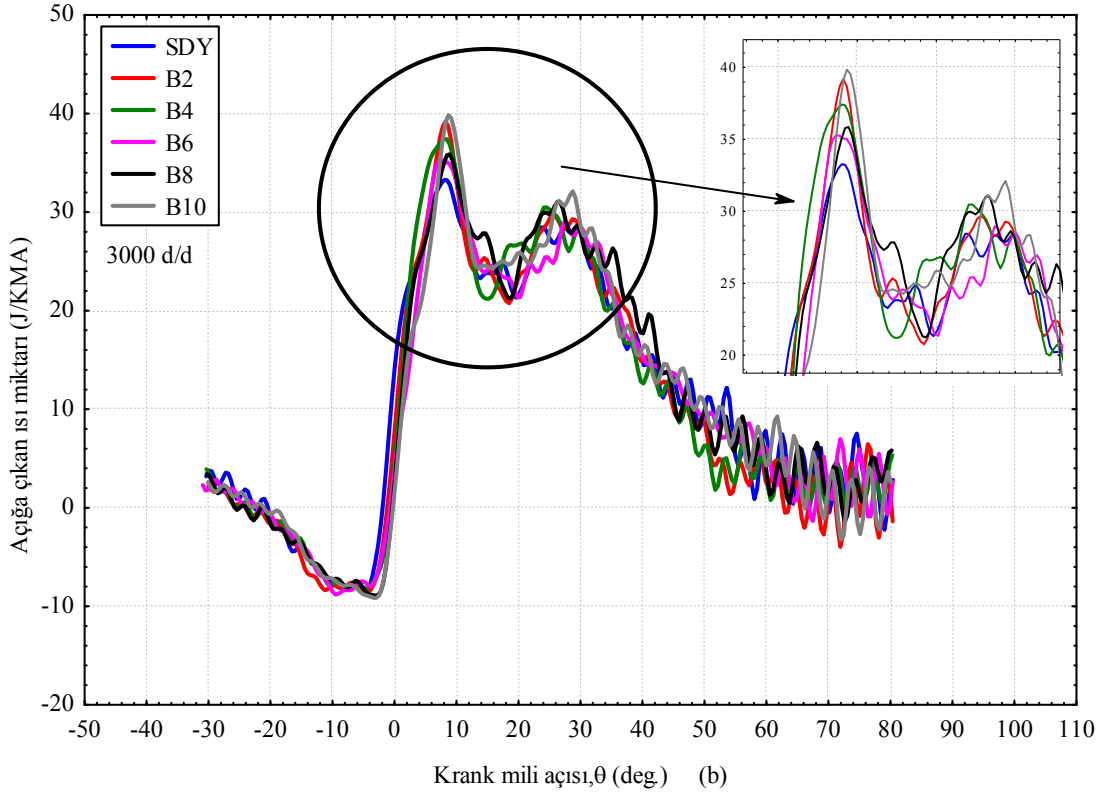
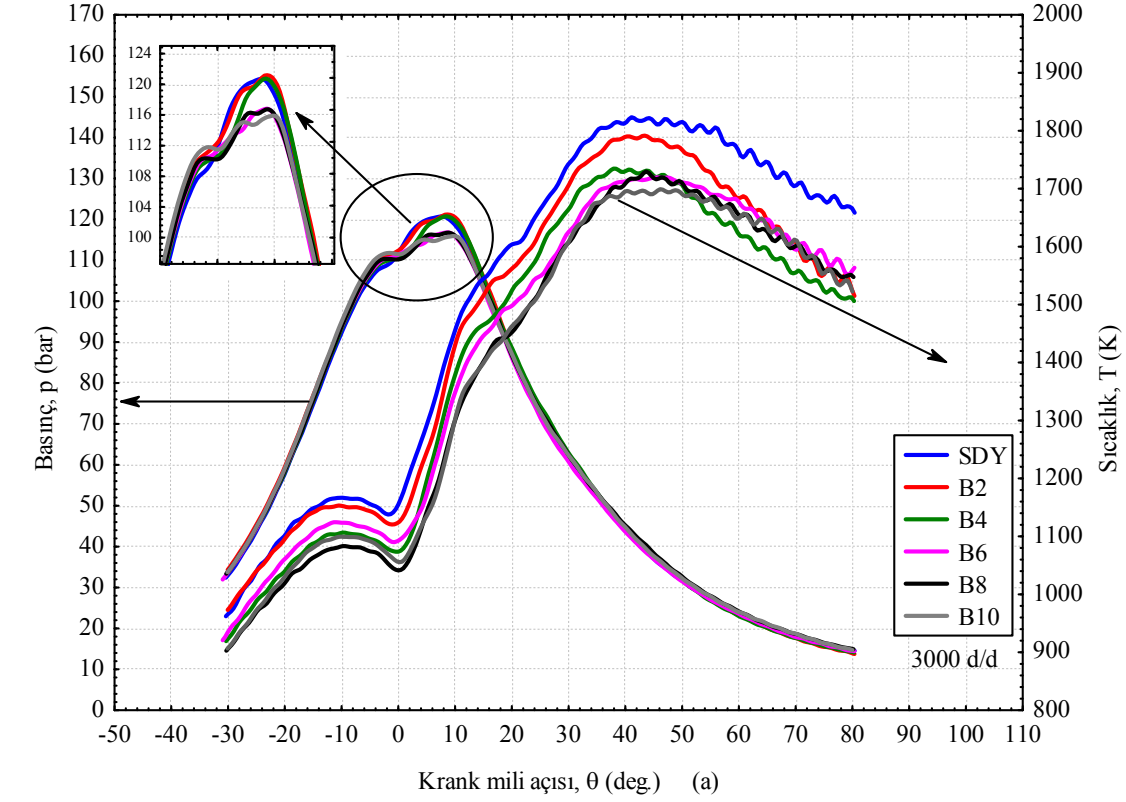
Ölçülen değerlere Kline ve McClintock'un [16] yöntemi uygulanarak hata analizi yapılmıştır. Hata analizinde, her bir değer için 3'er kez ölçüm yapıldığı için, deney sonuçlarına Student's-t dağılımı uygulanmıştır. Çeşitli terimlerdeki hatalar, iyi bilinen deneysel verilerin analizi yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Örneğin moment değerlerinin belirsizlik aralığı % (0,1-0,5) olarak bulunmuştur. Efektif güç, ÖYT ve efektif verim gibi türetilmiş büyüklükler için de hata analizi uygulanmıştır. Kline ve McClintock'un yönteminin uygulanması ile yapılan hata analizi sonucunda; örneğin efektif güçteki belirsizlik aralığının % (0,02-1,2) olduğu belirlenmiştir. Diğer hata analizi sonuçları incelendiğinde temel ölçümlerin tahmin edilen hatalarının, ÖYT ve efektif verimdeki belirsizliklerin % (0,002-0,5) aralığında olduğu açıkça görülebilir. Buradan temel büyüklüklerin ölçülmesindeki ve türetilmiş büyüklüklerdeki tahmin edilen hataların sonuçların belirsizliğini belirgin şekilde etkilemeyeceği söylenebilir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Sunulan çalışmada; BDYK'larının kullanılmasının basınç-krank mili açısı ($p-\theta$) diyagramı, sıcaklık değişimi, yanmada açığa çıkan ısı miktarı, motor performans karakteristikleri, NO_x emisyonu, eksoz sıcaklığı ve hava fazlalık katsayısı üzerindeki etkileri farklı devirlerde deneysel olarak sistematik şekilde incelenmiştir. Bu bölümde şekillerde dizel yakıtına karıştırılan benzin oranları örneğin, % 2 B2, % 4 B4, % 6 B6, % 8 B8 ve %10 B10 şeklinde gösterilmiştir.

3.1 BDYK'larının Silindir Basıncı, Sıcaklığı ve Açığa Çıkan Isı Miktarı Üzerindeki Etkileri (Effects of GDFBs on Cylinder Pressure, Temperature and Heat Release Rate)

Şekil 2a'dan görülebileceği gibi; üst ölü nokta (ÜÖN) civarındaki silindir basıncı değerleri, B2 ve B4 benzin oranları için SDY'nin değerlerinden daha yüksek, B6, B8 ve B10 benzin oranları için daha düşük çıkmıştır. Yalnız tüm karışım oranları için tutuşma gecikmesi sonundaki basınç değerlerinin SDY'nikinden daha yüksek çıktığı ilgili şekilden açıkça görülebilir. Bu sonuçlar, benzin karışımı ile tutuşma gecikmesinin arttığını göstermektedir. Yine Şekil 2a'dan görülebileceği gibi benzin karışımları ile silindir içindeki gaz karışımının sıcaklıkları azalmıştır.



Şekil 2. Farklı BDYK'ları için; (a) silindir basıncı ve sıcaklığının, (b) açığa çıkan ısı miktarının krank mili açısına göre değişimleri ((a) variation of cylinder pressure and temperature (b) variation of heat release rate versus engine speeds for different GDFBs)

Benzeri sonuçlar Park ve arkadaşları [7] ve Benajes ve arkadaşları [9] tarafından da bulunmuştur. Şekil 2b'de farklı benzin karışımları için açığa çıkan ısı miktarının krank mili açısına göre değişimleri sunulmuştur. SDY durumunda yanmanın daha önce başladığı ilgili şekilden açıkça görülebilir. Yani bu durumda benzin karışımı ile tutuşma gecikmesinin arttığı söylenebilir. Literatürde de benzeri sonuçlar bulunmuştur [6-9]. Ayrıca söz konusu şekilden benzin karışımları ile açığa çıkan ısı miktarının arttığı da görülebilir. Tutuşma gecikmesi süresince meydana gelen yanmanın hızlı yanma veya 1. yanma fazını oluşturduğu, daha sonra meydana gelen yanmanın ise difüzyon yanması veya ikinci yanma fazını oluşturduğu literatürden bilinmektedir [12]. Sonuç olarak BDYK'ları ile, hem 1. yanma fazında hem de ikinci yanma fazında açığa çıkan ısı miktarının arttığı söylenebilir.

Bu durumun benzin karışımları ile yanmanın iyileşmesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir. BDYK'ları ile tutuşma gecikmesinin arttığı ilgili şekillerden açıkça görülebilir. Tutuşma gecikmesinin vuruntu oluşturmayacak şekilde artması ile yakıt-hava karışımının yanmaya hazırlanması için daha fazla süre kalacaktır. Böylece, daha homojen yakıt-hava karışımı meydana geleceğinden, yanmanın iyileştiği söylenebilir. Ayrıca tutuşma gecikmesinin artması ile bölgesel yakıt-hava oranları azalacağından yanma daha fakir karışımda meydana gelecektir. Böylece, hem ÖYT'nin hem de NO_x emisyonunun azalacağı tahmin edilebilir. Bu durum; aşağıda sunulan motor performans karakteristiklerinin değişimlerinden de gözlenebilir. Ayrıca yanmanın daha fakir karışımda meydana gelmesi ile is oluşumunun da azalacağı tahmin edilebilir. Zaten literatürde yapılan çalışmalarda BDYK'ları ile hem isin ve hem de NO_x emisyonlarının birlikte önemli düzeyde azaldığı bilinmektedir [6, 7].

3.2 BDYK'larının Motor Performans Karakteristikleri ve Yakıt Maliyeti Üzerindeki Etkileri (Effects of GDFBs on Engine Performance Characteristics and Fuel Economy)

Bu bölümde farklı BDYK'ları için efektif gücün, ÖYT'in, efektif verimin ve yakıt maliyetin devir sayısına göre değişimleri sunulmuştur. Ayrıca ilgili motor karakteristiklerinde, benzin karışımı ile meydana gelen artma ve azalma oranları da bar şeklindeki eğriler ile de verilmiştir. Şekil 3(a-b)'de BDYK'larının efektif güç üzerindeki etkileri sunulmuştur. Şekil 3b'de görülebileceği gibi; efektif güç, seçilen tüm BDYK'ları için 1500 [d/d]'da azalmıştır. Bununla birlikte, efektif güç diğer devir sayılarında genel olarak artmıştır. Efektif güçteki maksimum artış, B2 ve B4 benzin oranlarında olmuştur ve B4 benzin oranında efektif güçte ortalama olarak % 2,41 oranında artış belirlenmiştir.

Şekil 4 (a-b)'den görülebileceği gibi; ÖYT, BDYK'ları ile azalmıştır. Özellikle (2000, 2500 ve 3000) [d/d] gibi motorun orta devirlerinde ÖYT'indeki azalma oranları daha yüksek çıkmıştır. Söz konusu devirlerde; ÖYT'nde, ortalama olarak % 2,97, % 5,29 ve % 4,11 oranlarında azalma görülmüştür. Bununla birlikte; ÖYT, 1500 [d/d]'da seçilen BDYK'ları için artmıştır. Benzer şekilde, efektif verim, seçilen tüm BDYK'ları için 1500 [d/d] dışındaki diğer tüm devir sayılarında artmıştır, Şekil 5(a-b).

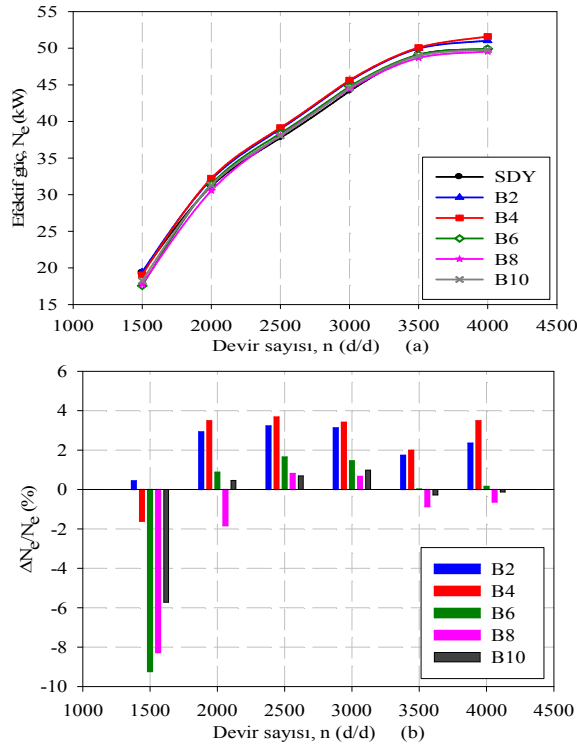
Şekil 6'da görülebileceği gibi, yakıt maliyeti BDYK'ları ile azalmıştır. (2000, 2500 ve 3000) [d/d] gibi motorun orta devir sayılarında yakıt maliyetindeki azalma oranları daha yüksek çıkmıştır ve yakıt maliyetinde bu devirlerde ortalama olarak sırasıyla % 1,70, % 4,04 ve % 2,86 oranlarında azalma belirlenmiştir.

BDYK'larının motor performans parametrelerini iyileştirmesine; benzinin alt ısıl değerinin dizel yakıtınınkinden biraz daha yüksek olması ve daha homojen yakıt-hava karışımının meydana gelmesi ile yanmanın iyileşmesinin katkıda bulunduğu düşünülmektedir [6,7].

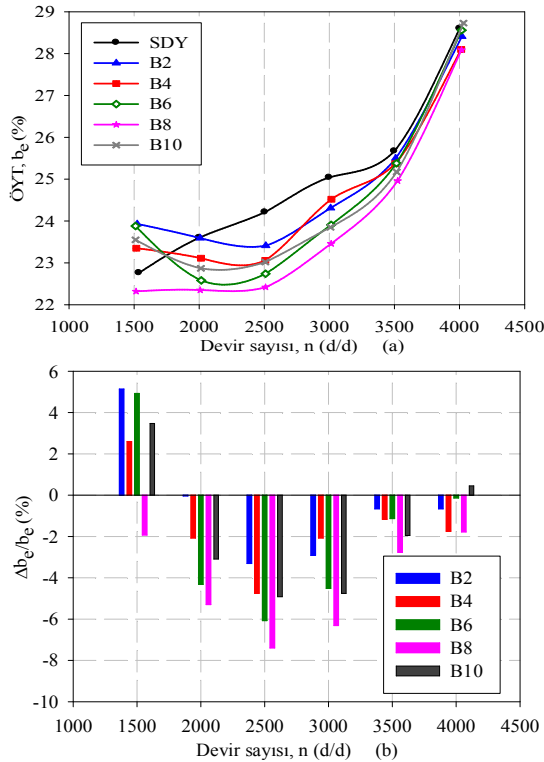
3.3 BDYK'larının NO_x, Eksoz Sıcaklığı ve Hava Fazlalık Katsayısı Üzerindeki Etkileri (Effects of GDFBs on NO_x Emission, Exhaust Temperature and Excess Air Coefficient)

BDYK'larının NO_x emisyonu üzerindeki etkileri Şekil 7'de gösterilmiştir. İlgili şekilden görülebileceği gibi, BDYK'ları ile NO_x emisyonu önemli düzeyde azalmıştır ve (2000, 2500 ve 3500) [d/d] gibi orta devir sayılarında NO_x emisyonunda sırasıyla % 10,04, % 10,33 ve % 15,21 oranlarında azalma görülmüştür. NO_x emisyonunun oluşumuna birçok faktör etki etmekle birlikte; burada sıcaklık ve hava fazlalık katsayısı en etkili parametrelerdir. Sıcaklığın azalması ile NO_x emisyonunun azaldığı bilinmektedir.

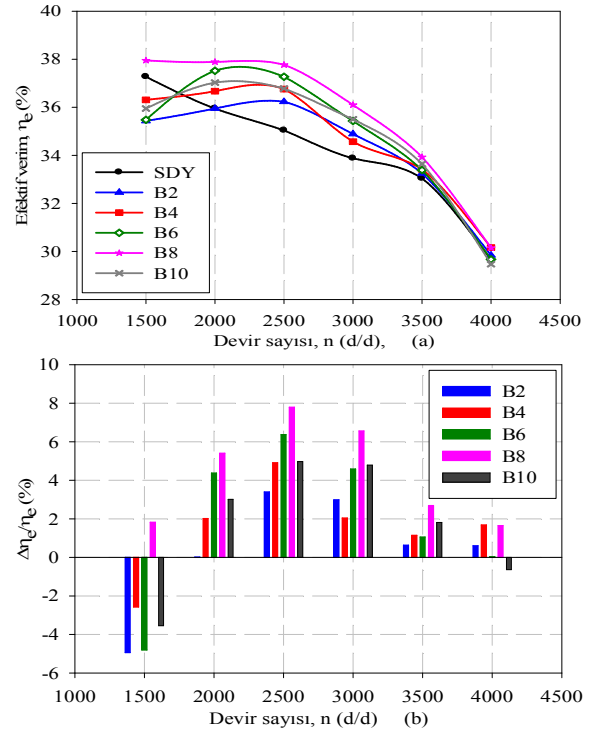
Şekil 2a'da ve Şekil 8'de görüldüğü gibi; benzin karışımları ile yanma ve eksoz gazı sıcaklıkları azalmaktadır. Bunun sonucunda da; NO_x emisyonunun azaldığı düşünülebilir. Bununla birlikte, benzin karışımları için hava fazlalık katsayısı değerlerinin SDY'nin değerlerinden yüksek çıktığı Şekil 9'dan görülebilir. Fakat burada sıcaklıklardaki azalmaların hava fazlalık katsayısındaki artmaya göre daha baskın olduğu düşünülmektedir. Ayrıca yukarıda da söylendiği gibi, BDYK'ları ile tutuşma gecikmesi artmıştır ve böylece yakıt-hava karışımının yanmaya hazırlanması için gereken sürenin biraz artması ve yakıt ile havanın daha hızlı ve homojen biçimde karışması ile yanmanın iyileştiği söylenebilir. Bunların sonucunda NO_x emisyonunun azaldığı düşünülebilir. Literatürde de benzeri sonuçlar bulunmuştur [6, 7, 9].



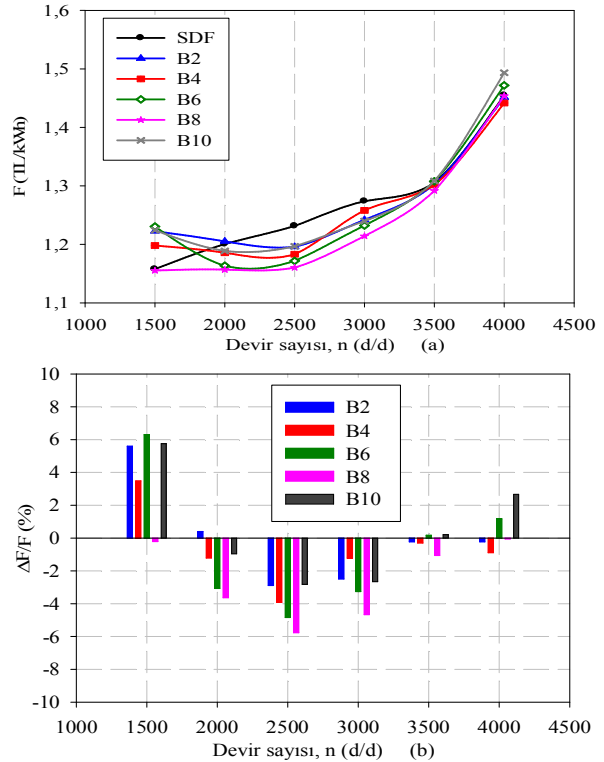
Şekil 3. Farklı BDYK'ları için; (a) efektif gücün, (b) SDY'na göre efektif güçteki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of effective power (b) variation ratios of effective power versus engine speeds for different GDFBs)



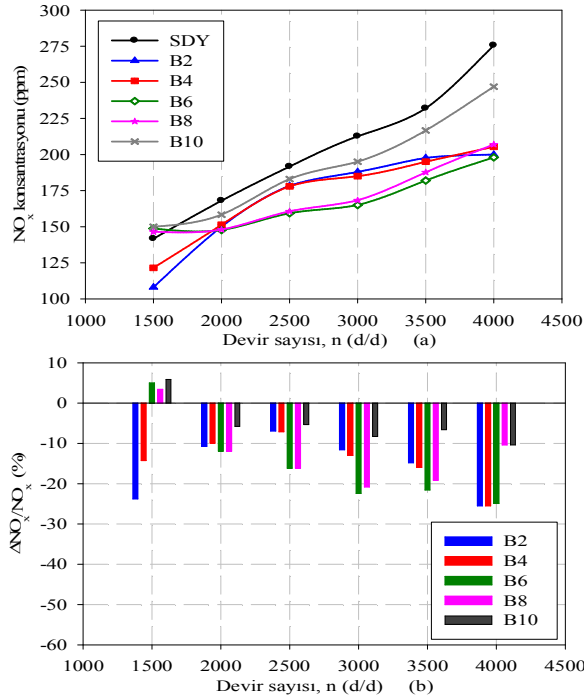
Şekil 4. Farklı BDYK'ları için; (a) ÖYT'nin (b) SDY'na göre ÖYT'ndeki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of bsfc (b) variation ratios of bsfc versus engine speeds for different GDFBs)



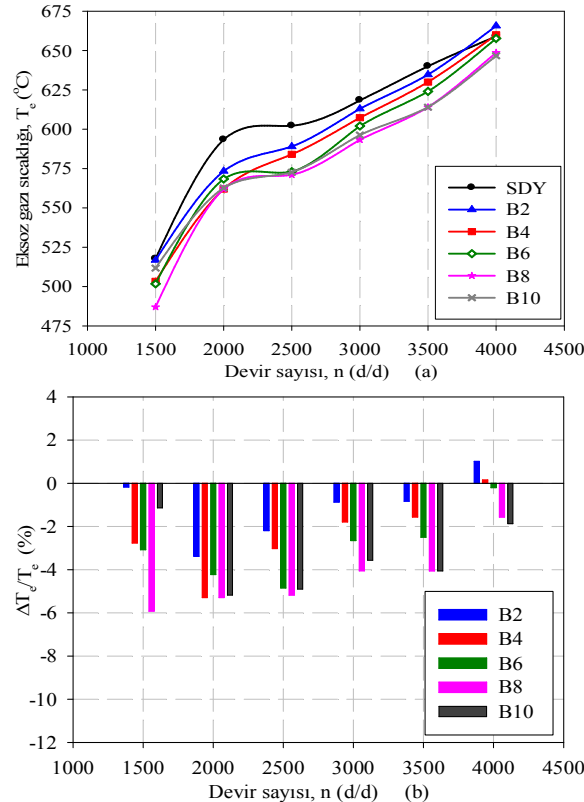
Şekil 5. Farklı BDYK'ları için; (a) efektif verimin (b) SDY'na göre efektif verimindeki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of effective efficiency (b) variation ratios of effective efficiency versus engine speeds for different GDFBs)



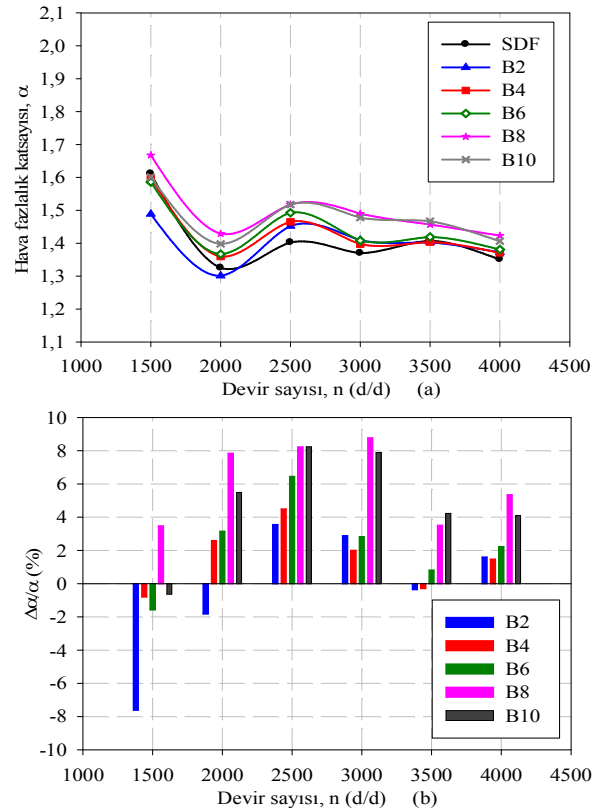
Şekil 6. Farklı BDYK'ları için; (a) maliyetin (b) SDY'na göre maliyetteki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of fuel cost (b) variation ratios of fuel cost versus engine speeds for different GDFBs)



Şekil 7. Farklı BDYK'ları için; (a) NO_x emisyonunun (b) SDY'na göre NO_x emisyonundaki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of NO_x emission (b) variation ratios of NO_x emission versus engine speeds for different GDFBs)



Şekil 8. Farklı BDYK'ları için; (a) eksoz gazı sıcaklıklarının (b) SDY'na göre eksoz gazı sıcaklıklarındaki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variations of exhaust temperature (b) variation ratios of exhaust temperature versus engine speeds for different GDFBs)



Şekil 9. Farklı BDYK'ları için; (a) hava fazlalık katsayısının (b) SDY'na göre hava fazlalık katsayısındaki artma ve azalma oranlarının devir sayısına göre değişimleri ((a) variation of excess air coefficient (b) variation ratios of excess air coefficient versus engine speeds for different GDFBs)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Benzin karışımları için silindir gaz basıncı değişiminin SDY'na benzer karakterde olduğu görülmüştür. Ancak ÜÖN civarındaki gaz basıncı değerlerinin, B2 ve B4 benzin karışımları için SDY'ndan daha yüksek, B6, B8 ve B10 karışım oranları için ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, seçilen tüm benzin karışım oranları için sıcaklıkların SDY'ndan düşük çıktığı görülmüştür. Bunların yanında, benzin karışımları ile açığa çıkan ısı miktarının da SDY'ndan yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sunulan çalışmadan, basınç-krank mili açısı değişimlerinin ve açığa çıkan ısı miktarının-krank mili açısına göre değişimlerini gösteren eğrilerin incelenmesi sonucunda; benzin karışımlarının kullanımı ile tutuşma gecikmesinin arttığı ve karışımdaki benzin oranı arttıkça tutuşma gecikmesinin de arttığı belirlenmiştir.

Benzin karışımları ile 1500 [d/d]'da motor performans parametrelerinin kötüleştiği ancak seçilen diğer tüm devir sayılarında iyileştiği görülmüştür. Özellikle benzin karışımları ile, motorun (2000, 2500 ve 3000) [d/d] gibi orta devirlerinde efektif gücün ve efektif verimin arttığı ve ÖYT'nin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca ilgili devirlerde yakıt maliyeti de azalmıştır. Söz konusu devirlerde; ÖYT'nde, ortalama olarak % 2,97,

% 5,29 ve % 4,11 oranlarında azalma ve bunun sonucunda da yakıt maliyetinde de ortalama % 1,70, % 4,04 ve % 2,86 oranlarında azalma belirlenmiştir. Yine aynı devirlerde efektif güç; % 1,20, % 2,01 ve % 1,92 oranlarında artmıştır.

Benzin karışımları ile NO_x emisyonu önemli ölçüde azalmıştır ve (2000, 2500 ve 3500) [d/d] gibi orta devir sayılarında NO_x emisyonunda sırasıyla % 10,04, % 10,33 ve % 15,21 oranlarında azalma görülmüştür. Böylece dizel yakıtına % 10'dan düşük oranda benzinin karıştırılması ile hem motor performans parametrelerinin iyileştiği ve hem de NO_x emisyonunun azaldığı belirlenmiştir. Bu nedenle bu motorda dizel yakıtına % 10'dan düşük oranda benzinin karıştırılarak kullanılması önerilebilir. Ancak sonuçların genelleştirilebilmesi için benzin karışımlarının değişik tip motorlarda ve özellikle direkt püskürtmeli, common-rail püskürtme sistemli motorlarda da deneysel olarak incelenmesinin gerektiği söylenebilir. Ayrıca benzin karışımlarının kullanılması durumunda is ve toplam hidrokarbon gibi diğer eksoz emisyonlarındaki değişimlerin de incelenmesinin yararlı olacağı düşünülmektedir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

BDYK	: Benzin-dizel yakıtı karışımı
B2	: %2 benzin-%98 dizel yakıtı karışımı
KMA	: Krank mili açısı
NO_x	: Azot oksit [ppm]
ÖYT	: Özgül yakıt tüketimi [kg/kWh]
SDY	: Saf dizel yakıtı
ÜÖN	: Üst ölü nokta

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Sunulan deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi ve makalenin hazırlanmasındaki yönlendirici katkılarından dolayı **Prof. Dr. Orhan DURGUN**'a, deneysel çalışmaya yardımlarından dolayı **Yrd. Doç. Dr. Coşkun BAYRAM**'a, laboratuardaki her türlü desteğinden dolayı **Tek. Şenol DÜBÜŞ**'e, veri derleme kartı için gerekli programı yazan **Dr. Elektrik-Elektronik Müh. Mehmet TURHAL**'a, çok teşekkür ederim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Durgun, O., Sahin, Z. ve Bayram, C., **Taşıt-Gemi Dizel Motorlarında Hafif Yakıt Fumigasyonu ve Mekanik Kayıpların Motor Performansı ve Çevre Kirliliği Üzerindeki Etkilerinin Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi**, K.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projesi Raporu, Trabzon, 2010.
2. Sahin, Z., Durgun, O. ve Bayram C., "Experimental Investigation of Gasoline Fumigation in a Turbocharged IDI Diesel Engine", **Fuel**, Cilt 95, 113–121, 2012.
3. Durgun, O. ve Ayvaz, Y., "The Use of Diesel Fuel-Gasoline Blends in Diesel Engines", **Proceeding of the First Trabzon International**

4. Sahin, Z., Durgun, O. ve Bayram C. "Experimental Investigation of Gasoline Fumigation in a Single Cylinder Direct Injection (DI) Diesel Engine", **Energy**, Cilt 33, No 8, 1298–1310, 2008.
5. Sahin, Z. ve Durgun, O., "High Speed Direct Injection (DI) Light-fuel (Gasoline) Fumigated Vehicle Diesel Engine", **Fuel**, Cilt 86, No 3, 388–399, 2007.
6. Han, D., Ickes, A.M., Bohac, S.V., Huang, Z. ve Assanis, D.N., "Premixed Low-Temperature Combustion of Blends of Diesel and Gasoline in a High Speed Compression Ignition Engine", **Proceedings of the Combustion Institute**, Cilt 33, 3039-3046, 2011.
7. Park, S.H., Youn, I.M., Lim, Y. ve Lee, C.S., "Influence of the Mixture of Gasoline and Diesel Fuels on Droplet Atomization, Combustion, and Exhaust Emission Characteristics in a Compression Ignition Engine", **Fuel Processing Technology**, Cilt 106, 392–401, 2013.
8. Sahin, Z., "Experimental and Theoretical Invest. of the Effects of Gasoline Blends on Single-Cylinder Diesel Engine Perf. and Exhaust Emis.", **Energy&Fuels**, Cilt 22 (5), 3201–3212, 2008.
9. Benajes, J., Broatch, A., Garcia, A. ve Muñoz, L.M., "An Experimental Investigation of Diesel-Gasoline Blends Effects in a Direct-Injection Compression- Ignition Engine Operating in PCCI Conditions", **SAE**, 2013-01-1676, 2013.
10. Durgun, O., **Motorlarda Deneysel Yöntemler**, Laboratuvar Ders Notları, K.T.Ü., Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1990, <http://www.ktu.edu.tr/makina-laboratuvarfoyeri>.
11. Durgun, O., "Motor Çevrimlerinin Hesabı İçin Pratik Bir Yöntem", **Mühendis ve Makine**, Cilt 383, 12-28, 1991.
12. Heywood, J.B., **Internal Combustion Engine Fundamentals**, McGraw-Hill Book Company, 1988.
13. Ferguson, C.R., **Internal Combustion Engines. Applied Thermosciences**, New York: John Wiley & Sons; 1986.
14. Turkcan, A., ve Çanakci, M., "Combustion Characteristics of an Indirect Injection (IDI) Diesel Engine Fueled with Ethanol/Diesel and Methanol/Diesel Blends at Different Injection Timings", **World Renewable Energy Congress**, Sweden, 8-11 Mayıs 2011.
15. Soloiu, V., Weaver, J., Ochieng, H., Vlcek, B., Butts, C. ve Jansons, M., "Evaluation of Peanut Fatty Acid Methyl Ester Sprays, Combustion, and Emissions, for Use in an Indirect Injection Diesel Engine", **Energy&Fuels**, Cilt 27(5), 2608-2618, 2013.
16. Holman, J.P., **Experimental Methods for Engineers**, Seventh ed., McGraw-Hill, New York, 2011.