

ÇİFT YAKITLI BİR DİZEL MOTORDA LPG YÜZDESİNİN PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİ

Abdurrazzak AKTAŞ ve Oğuzhan DOĞAN

*Makina Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050, Karabük
aaktas@karabuk.edu.tr, odogan@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 20.02.2009 ; Kabul/Accepted: 06.07.2009)

ÖZET

Bu çalışmada, tek silindirli, direkt püskürtmeli bir dizel motorda ikinci yakıt olarak %30 propan, %70 bütandan oluşan LPG'nin (Liquefied Petroleum Gas) dizel/LPG çift yakıtı içerisindeki oranının performans ve egzoz emisyonlarına etkisi araştırılmıştır. Testler, maksimum tork devrinde (2600 d/d), maksimum torkun %20, %40, %60, %80 ve %100'ünde olmak üzere değişen yüklerde saf dizel yakıtı ve kütleli olarak %20, %40, %60, %80 ve %90 LPG içeren çift yakıt ile gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, her orandaki çift yakıt ile is ve azot oksit (NOx) emisyonlarının azaldığını, karbonmonoksit (CO) ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının ise arttığını göstermiştir. Ayrıca, fren Özgül Yakıt Tüketiminin (ÖYT) %40 LPG ile yüke bağlı olarak dizel yakıtına göre %3,5-15 oranında azaldığı ve egzoz gaz sıcaklığının da genel olarak dizel yakıtından düşük çıktığı görülmüştür. LPG'nin yakıt olarak kullanılması sonucu tek olumsuz etki olarak ortaya çıkan bir miktar CO ve HC emisyon artışı herhangi bir yöntemle düşürülebildiği takdirde, dizel yakıtı ile birlikte %40-%60 oranında LPG'nin yakıt olarak kullanılabilmesi tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LPG, çift yakıtlı motor, emisyon, performans.

EFFECTS OF LPG PERCENTAGE TO PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS IN A DUAL FUEL ENGINE

ABSTRACT

In this study, an experimental investigation was presented to determine the effects of various ratios of Liquefied Petroleum Gas (LPG), containing 30% propane and 70% butane, on the performance and exhaust emission in a dual fuel engine with direct injection. The tests were performed at maximum torque speed of 2600 rpm with a various loads of maximum torque (20%, 40%, 60%, 80% and 100%) by using pure diesel fuel or dual fuel containing 20%, 40%, 60%, 80% and 90% of LPG. The test results showed that the smoke and Nitrogen oxide (NOx) emissions decrease, while carbon monoxide (CO) and hydrocarbon (HC) emissions increase at all mixtures of LPG and diesel fuel. Brake specific fuel consumption (bsfc) decreases by 3.5-15% with 40% LPG while the load increases. Exhaust gas temperatures at the mixture fuel were lower than that of diesel fuel in general. It was concluded that LPG can be used with diesel fuel as a mixture up to 40-60% of LPG, provided that CO and HC emissions can be lowered.

Keywords: LPG, dual fuel engine, performance, emission.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan sağlığı ve çevreyi tehdit eden kirletici emisyonların önemli bir kısmı fosil esaslı yakıtlarla çalışan benzinli ve dizel motorlu taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Dizel motorlar çalışma prensipleri gereği yüksek sıkıştırma oranına sahip oldukları için daha verimlidirler. Dolayısı ile güç, ekonomiklik ve yay-

dıkları emisyon bakımından benzinli motorlara göre daha avantajlı oldukları için yük ve yolcu taşımacılığında daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Yüksek sıkıştırma oranı ve kısımsız hava ile çalıştıklarından CO emisyonları benzinli motorlara göre oldukça düşüktür. Ancak, NOx ve is emisyonları yüksektir. Dolayısı ile dizel motorlardan kaynaklanan NOx ve is emisyonları çeşitli yöntemlerle aşağı

seviyelere çekilmeye çalışılmaktadır. Bunun için; egzoz gazı geri geri çevrimi (EGR), yeni yakıt püskürtme teknikleri ve daha temiz yanar alternatif yakıt kullanılması gibi yöntemlere baş vurulmaktadır. Sorunun çözümü için temiz yanar gaz yakıtların kullanılması ümit verici görülmektedir. Bol bulunması, ucuz olması, yüksek sıkıştırma oranlarında vuruntusuz ve temiz yanması nedeniyle doğal gaz (metan), dizel motorlarda kullanılabilir alternatif yakıtlardan birisi olarak görülmektedir. Ancak setan sayısının çok düşük olması ve kendi kendine tutuşmasının zor olması nedeniyle doğalgaz, dizel motor sıkıştırma oranı düşürülüp motora bir ateşleme sistemi ilave edilerek veya çift yakıt uygulaması şeklinde olmak üzere iki farklı yöntemle kullanılabilir [1-3]. Bunlardan ilki, dizel motorun yaklaşık bir benzinli motor çalışma biçimine dönüştürülmesi nedeniyle dizel motorun yüksek sıkıştırma oranına sahip olma avantajını azaltması, büyük çaplı modifikasyon gerektirmesi ve oldukça maliyetli olması nedeniyle pek tercih edilmemektedir. İkinci yöntem ise çift yakıt uygulamasıdır. Çift yakıt uygulamasında ise gaz yakıt atmosfer basıncının biraz üstünde bir basınçta emme havasına karıştırılarak silindire gönderilmekte [4-9], sıkıştırma zamanının sonunda orijinal dizel yakıt sistemiyle silindire püskürtülen pilot dizel yakıtı ile gaz yakıt ateşlenmektedir. Pilot dizel yakıtı ile sağlanan ateşleme enerjisi buji ile ateşlemede sağlanan enerjiden daha büyüktür. Bu çift yakıtlı motorun yeterince fakir hava yakıt oranlarında çalışmasına imkan vermektedir. Çift yakıt uygulaması motor yüküne göre yakıtların oransal olarak ayarlanmasından başka önemli bir modifikasyon gerektirmediği için daha düşük dönüştürme maliyetine sahip olmakta ve istenildiği zaman motor saf dizel yakıtı ile çalıştırılabilmektedir. Dezavantajları ise, dizel yakıt sisteminin bulundurulmaya devam edilmesi ve bir miktar enerjinin dizel yakıtından sağlanması nedeniyle emisyon iyileştirmelerini bir miktar sınırlandırabileceği şeklinde ifade edilmiştir [10].

Çift yakıt yöntemi yüksek oranda doğal gazın kullanılmasına imkan vermektedir. Önceki çalışmalar, dizel yakıtı ve metan (doğal gaz) çift yakıtının birlikte kullanılmasının toplam verimi önemli miktarda değiştirmeden NO_x ve is emisyonunu iyileştirdiğini, ancak özellikle düşük yüklerde HC ve CO emisyonunu arttırdığını göstermiştir [4, 11-16]. Dizel motorlarda doğalgazın ikinci yakıt olarak kullanılması halinde artan CO, HC emisyonunun azaltılması amacıyla püskürtme avansının performans ve emisyonlara etkisinin araştırıldığı bir çok çalışmada; püskürtme zamanının öne alınması ile yanma veriminin arttığı, CO ve HC emisyonunun azaldığı ve NO_x emisyonunun ise bir miktar arttığı ifade edilmiştir [6, 7, 17-18].

Bol bulunması, ucuz olması, temiz yanması ve birçok gaz yakıtı göre daha kolay ve güvenli depola-

nabilmesi gibi özellikleri nedeniyle LPG'nin de dizel motorlarda kullanılabilirliği araştırılmaya başlanmıştır. Yapılan araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Yapılan bir çalışmada, esas yakıtın metan ya da propan ve pilot yakıtın dizel olduğu çift yakıtlı tek silindirli bölünmüş yanma odalı bir araştırma dizel motorunda (Ricardo E6), tam yükte artan pilot dizel yakıtın vuruntuya sebep olduğu, düşük yükte düşük olan verim ve yüksek emisyonun pilot dizel yakıt miktarının artırılması ile düzeltilebileceği tespit edilmiştir [11]. Aynı yazarlar tarafından, pilot yakıt olarak dizel yakıtın ve ikinci yakıt olarak metan ya da propanın kullanıldığı çift yakıtlı bir dizel motorda püskürtme zamanının motor performansına etkisinin incelendiği diğer bir çalışmada da düşük yükte düşük verim ve kötü emisyonun püskürtme zamanının öne alınması ile düzeltilebileceği ifade edilmiştir [19]. Tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorda ağırlıksal olarak %30 LPG ve %70 dizel yakıtının, performans ve emisyon parametrelerine etkisinin incelendiği çift yakıtlı çalışmada tek yakıtlı motor çalışmasına göre motor torku ve gücünün %5,8 oranında arttığı, NO_x emisyonunun %5,9, is emisyonunun ise 1/9 oranında azaldığı belirlenmiştir [20]. LPG-dizel karışımı ile çalışan sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorun yanma ve egzoz emisyon karakteristiklerinin incelendiği bazı çalışmalarda, Dizel/LPG karışımı yakıtın dizel yakıtın yaydığı NO_x ve is emisyonundan daha düşük emisyon yaydığı ve LPG'nin NO_x ve is emisyonunu kontrol altına almak için dizel motorlarda yakıt olarak kullanılabilirliğini göstermiştir [8, 21]. Başka bir çalışmada ise NO_x seviyesi dizel yakıtından yüksek bulunmuştur [22]. Sonuçların farklı olması araştırmacıların farklı LPG oranı ve emisyonu etkileyen farklı parametreler altında araştırma yapmalarından kaynaklandığı sanılmaktadır. LPG, saf Metan ve CNG (Compressed Natural Gas) gaz-yakıt karışımları için çift yakıtlı motorun yanma ve vuruşu sınırlarının belirlenmesine yönelik bir çalışmada, yanma gürültüsünün, vuruşu ve ateşleme sınırlılıklarının gaz çeşitleri, motor tasarımı ve çalışma parametreleriyle ilişkili olduğu tespit edilmiştir [5, 23]. Aynı yazar ve arkadaşları tarafından, esas yakıt olarak doğalgaz ya da LPG'nin kullanıldığı bir dizel motorda pilot yakıt olarak jojoba biyodizelinin kullanılması ile motorun performansının arttığı, gürültü emisyonunun azaldığı, yanma süresinin kısaldığı ve vuruşu limitinin genişlediği tespit edilmiştir [9]. İndirekt enjeksiyonlu bir dizel motoru ile hem saf dizel hem de dizel LPG ile tam yük koşullarında gerçekleştirilen performans testlerinde, çift yakıt içersindeki LPG miktarının artırılmasının özgül yakıt tüketimini, egzoz gaz sıcaklığını ve isi düşürdüğü, ancak yanmamış HC ve CO gibi kirleticileri, maksimum silindir basıncını ve basınç artış oranını yükselttiği tespit edilmiştir [24].

Bu çalışmada; Türkiye ve Avrupa'nın bir çok ülkesinde buji ile ateşlemeli motorlarda kullanılan ağırlıklı olarak %30 propan + %70 bütandan oluşan LPG'nin kütleli olarak farklı oranlarda pilot dizel yakıtı ile birlikte tek silindri ve direkt püskürtmeli bir motorda kullanılmasının performans ve emisyon karakteristiklerine etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır.

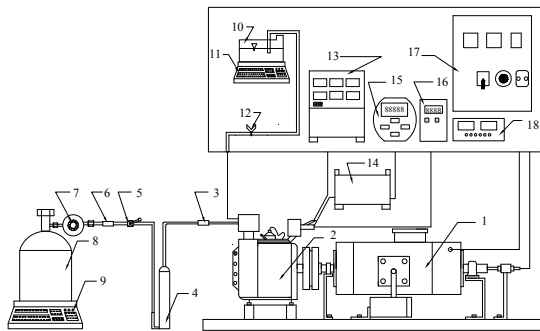
2. DENEY MATERYALİ VE YÖNTEM (EXPERIMENTAL APPARATUS AND METHOD)

Deneysel çalışmayı gerçekleştirmek için, Çizelge 1'de özellikleri verilen motorun çift yakıt ile çalışması için dizel yakıt sistemi aynen muhafaza edilmiş. Ancak, planlanan deney koşullarına uygun bir şekilde LPG yakıt gereksinimini karşılamak için LPG tankı, basınç regülatörü, alev geri tepme valfleri (iki adet), sulu güvenlik, LPG kontrol valfi ve emme manifolduna takılan nozuldan oluşan bir gaz yakıt sistemi kurulmuştur. Deney düzeneği Şekil 1'de görülmektedir.

Çizelge 1. Deney motoruna ait teknik özellikler
(The technical specifications of the test engine)

Model	Katana KM 170F
Motor genel özellikleri	4 Zamanlı, sıkıştırma ile ateşlemeli, direkt püskürtmeli
Çap x Strok (mm)	70 x 55
Kurs hacmi (cm ³)	199,28
Silindir sayısı	1
Sıkıştırma Oranı	18/1
Yakıt Sistemi	Direkt püskürtme
Çıkış Gücü (2600 d/d da) (kW)	1,937
Soğutma Sistemi	Cebri Hava Soğutmalı
Enjektör basıncı (MPa)	19

LPG gaz yakıtı Şekil 1'de görüldüğü gibi regülatör ile basıncı düşürüldükten sonra miktarı da kontrol valfi ile ayarlanarak sulu güvenlik ve alev geri tepme



Şekil 1. Deney tesisatının şematik görünüşü (Schematic view of the engine test bed)

1- Dinamometre 2- Deney Motoru 3-Alev Geri Tepme Valfi 4-Sulu Güvenlik 5- LPG Vanası 6- Alev Geri Tepme Valfi 7- Basınç Regülatörü 8- LPG Tüpü 9- Elektronik Terazi 10- Dizel Yakıt Deposu 11- Elektronik Terazi 12- Yakıt Vanası 13- Emisyon Ölçüm Cihazı 14- İS Emisyon Ölçüm Cihazı 15- İS Emisyon Ölçüm Cihazı İndikatörü 16- Dijital Termometre 17- Dinamometre Kontrol Panosu 18- Load Cell İndikatörü

valflerinden geçtikten sonra bir nozuldan emme subabı arkasına püskürtülmüştür. Pilot dizel yakıtı ise aynen muhafaza edilen motorun orijinal yakıt enjeksiyon sistemi ile silindir içine püskürtülmüştür. Sıvı ve gaz yakıt tüketimleri 0.01 g hassasiyete sahip Precisa marka XB serisi 4200C model elektronik terazi ve kronometre yardımı ile kütleli olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan dizel ve LPG yakıt özellikleri Çizelge 2 ve Çizelge 3'te verilmiştir.

Çift yakıt içerisindeki gaz yakıt yüzdesini (Z) ifade etmek için aşağıda verilen (1) numaralı eşitlik kullanılmıştır.

$$Z = \frac{\dot{m}_{LPG}}{\dot{m}_{dizel} + \dot{m}_{LPG}} \quad (1)$$

Buna göre Z=%0 saf dizel yakıtı olduğunu, Z=%20 ise çift yakıtın %20'sinin LPG, %80'ninin dizel yakıtından oluştuğunu ifade etmektedir.

Çizelge 2. Dizel yakıtının özellikleri (The properties of diesel fuel used in the experiments)

Özellikler	Dizel ^a
Yoğunluk, kg/m ³ , at15°C	828
Kinematik viskozite, mm ² /s, 40°C de	2.6
Parlama noktası, °C	60
Su, mg/kg	218.1
CFPP, °C	-5
Setan sayısı	55.6
Alt ısıl değer, (MJ/kg)	43.76

^aDizel yakıt özellikleri: Şeyhoğlu Tic. Ltd. Şti.'den alınmıştır (Shell İst. Atatürk Bulvarı Karabük).

Çizelge 3. LPG yakıtının teknik özellikleri (The properties of the LPG fuel used in the experiments)

Özellikler	Propan-Bütan	Karışım LPG
Kapalı Kimyasal Formülü	C ₃ H ₈ C ₄ H ₁₀	- %30C ₃ H ₈ + %70C ₄ H ₁₀
Molekül Ağırlığı (g/mol)	44,09 58,12	- 53,91
Likid Halinde	Birim	Miks LPG^b
Normal Kaynama Noktası	°C	-13
Normal Erime Noktası	°C	-154
Normal Parlama Noktası	°C	-74
Normal Donma Noktası	°C	-153
Özgül Kütle (15°C'da)	kg/dm ³	0,56
Özgül Hacim (15°C'da)	dm ³ /kg	1,786
Tam yanma için gerekli hava miktarı	Nm ³ /kg	12,06
Buharlaşma Gizli Isısı	MJ/kg	383,302
Alt Isıl Değeri	MJ/kg	45,908

^b LPG yakıt özellikleri:

<http://www.ipragaz.com.tr/docs/teknik.pdf>

Egzoz gaz sıcaklıkları K tipi termokupul ve dijital termometre ile ölçülmüştür. Egzoz emisyonlarının ölçülmesinde MRU DELTA 1600L egzoz gaz analizörü ve MRU oprans 1600 duman ölçer kullanılmıştır. Deneysel çalışma sırasında olası bir LPG gaz kaçağını tespit etmek için DRAGER MSI SENSIT HXG marka gaz kaçak tespit cihazı kullanılmıştır. Ölçü aletlerinin kullanma kılavuzlarından tespit edilen hassasiyetleri ve hesaplanan belirsizlikler Çizelge 4'te verilmiştir. Tork, güç, ve özgül yakıt tüketiminin belirsizlik analizi (δ);

$$z = f(x, y) \text{ olmak üzere,}$$

$$\delta_z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} \delta y\right)^2} \quad (2)$$

eşitliğine göre hesaplanmıştır [10].

Çizelge 4. Ölçüm hassasiyetleri ve hesaplanan sonuçların belirsizlikleri (Accuracies of the measurements and the uncertainties in the calculated results)

Ölçümler	Hassasiyet
Yük	$\pm 0,6$ N
Yük kolu	$\pm 0,1$ m
Hız	± 1 rpm
Zaman	± 1 s
Sıcaklık	± 1 °C
CO (%vol)	$\pm 0,06$ %
CO ₂ (%vol)	$\pm 0,5$ %
NO _x (ppm)	± 5
HC (ppm)	± 12
O ₂ (%vol)	$\pm 0,1$
Sıcaklık (°C)	± 1 °
Duman koyuluğu (%)	± 2
Hesaplanan sonuçlar	Belirsizlik
Tork	$\pm 0,4$
Güç	$\pm 0,4$
Özgül yakıt tüketimi	$\pm 0,7$

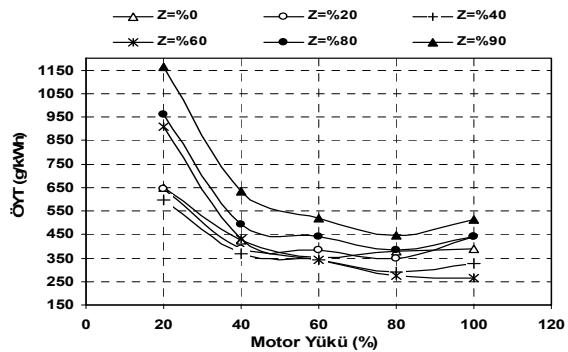
Motorun sağladığı maksimum tork ve tork devri baz alınarak deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi planlandığından ilk önce motorun maksimum tork ve tork devri deneysel olarak belirlenmiştir. Bunun için firma değerlerine göre ayarları yapılan ve dinamometreye bağlanan tek silindirli deney motoru, orijinal yakıt sistemi ve saf dizel yakıtı ile tam yükte (gaz kolu tam açık ve sabit) çalıştırılmış ve motor dinamometre ile yüklenerek maksimum güç devri olan 3600 d/d'dan başlanarak 200'er d/d aralıklarla (her defasında dinamometre ile uygulanan yük değiştirilerek) motorun sağladığı torklar tespit edilmiştir. Bu ön çalışma sonucunda maksimum torkun 2600 d/d da sağlandığı tespit edilmiş ve ondan sonra veriler almak üzere deneylere başlanmıştır. Bunun için; ilk önce saf dizel yakıtı ile 2600 d/d'da elde edilen maksimum torkun %20, 40, 60, 80 ve

%100'ünde veriler kaydedilmiştir. Sonra, yine 2600 d/d'da sağlanan maksimum torkun sırasıyla %20, %40, %60, %80 ve %100'ünde kütleli olarak tüketilen toplam yakıt debisinin %20, 40, 60, 80 ve %90'ı LPG olacak şekilde deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek veriler kaydedilmiştir. Çift yakıtlı çalışmada her bir yükte tüketilen dizel ve LPG yakıtları %1 g hassasiyetinde ölçüm yapılabilen elektronik terazi ve kronometre yardımıyla belirlenmiştir. Gerekli dizel/LPG yakıt oranı ise gaz kontrol valfi ve dizel yakıt koluna ayrı ayrı kumanda edilerek (örneğin LPG kontrol valfi ile bir miktar gaz verirken dizel yakıt sistemi kolu bir miktar stoba çekilerek) sağlanmıştır. Hem dizel yakıtlı hem de çift yakıtlı her bir çalışma durumunda motorun kararlı çalışması sağlandıktan sonra kuvvet, egzoz gaz sıcaklığı (EGS), CO, HC, NO_x, is emisyonları ve hava fazlalık kat sayısı (λ) kaydedilmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞILMASI (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

Dizel ve çift yakıtlı çalışmadaki özgül yakıt tüketimi değişimi Şekil 2'de yükün fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

Görüldüğü gibi, çift yakıt içerisindeki LPG oranı %20, %40 seviyesinde iken bütün yüklerde ÖYT dizel yakıtına göre düşüktür. Ancak LPG oranı %60'a çıktığında ÖYT dizel yakıtından fazla olmaktadır ve oran arttıkça fark da artmaktadır. %60 ve üzerinde LPG içeren çift yakıtlı çalışmada düşük yüklerde fazla olan ÖYT farkı yük arttıkça azalmaktadır. Düşük yüklerdeki farkın; karışımın fakir olması, silindir sıcaklığının düşük olması, gaz yakıtı tutuşturmak için ateşleyici dizel yakıtın az olması gibi nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yük arttıkça ÖYT'nin azalarak dizel yakıtına yaklaşmasının sebebi ise, yanmaya katılan toplam yakıtın ve ateşleyici pilot dizel yakıtın artması sonucu yanmanın iyileşmesi ve dizel yakıtın yerini alan ve ısı değeri daha yüksek olan LPG'nin kütleli olarak tüketilen yakıt miktarını azaltmasıdır. Bu çalışmada gücün en az yakıt ile elde edildiği yani verimin yüksek olduğu LPG oranının %40 civarı olduğu görülmüştür. Örneğin %40 LPG ile

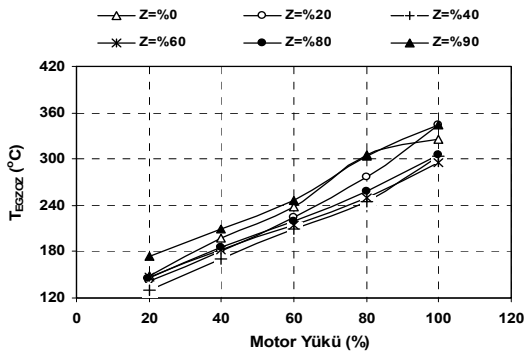


Şekil 2. Yükün fonksiyonu olarak özgül yakıt tüketimi değişimi (Variation of specific fuel consumption with engine load)

%60 yükte LPG ÖYT'ı dizel yakıtından %3,5 ve tam yükte ise yaklaşık %15 oranında daha düşük çıkmıştır. Çift yakıtlı bir dizel motorda LPG içeriğinin (propan, butan) ve çift yakıt içerisindeki LPG oranının emisyon ve performans etkisinin incelediği bir çalışmada, yük arttıkça dizel ve çift yakıtlı çalışmada verimin arttığı ve %40 oranında LPG içeren çift yakıtlı çalışmada tam yükte verimin %2.3 oranında dizel yakıtından yüksek olduğu tespit edilmiştir [8].

Egzoz gaz sıcaklığı Şekil 3'te görüldüğü gibi %20-80 oranında LPG içeren çift yakıt çalışmalarında dizel yakıtından daha düşüktür. Ancak LPG oranı arttıkça EGS'nin da artarak dizel yakıtına yaklaştığı ve LPG oranı %90 olduğunda dizel yakıtı EGS'nin üstüne çıktığı görülmektedir. Sabit bir motor yükünde LPG oranı arttıkça EGS'nin artması iki önemli sebeple açıklanabilir. Birincisi, ısı değeri yüksek olan LPG'nin çift yakıt içerisindeki miktarının artması nedeniyle silindir içi sıcaklığın artmasıdır. İkincisi, kendi kendine tutuşma sıcaklığı yüksek olan LPG oranı arttıkça tutuşma gecikmesi süresinin artması ve yanmanın genişleme kursuna sarkması sonucu EGS'nin artmasıdır.

Dizel ve farklı oranlarda LPG içeren Dizel/LPG çift yakıtı için yükün fonksiyonu olarak CO emisyon değişimi Şekil 4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi hafif yükte çift yakıtlı çalışmalarda CO emisyonu, dizel yakıtına göre oldukça yüksektir. Çift yakıtlı dizel motor egzozunda Yüksek CO emisyonu konsantrasyonu eksik yanmayı ifade etmektedir. Bunun sebebi hafif yüklerde karışımın fakir olması, silindir içi sıcaklığın düşük olması nedeniyle gaz yakıtın ayrışmaması ve oksitlenememesidir [25]. Yük arttıkça, LPG ve püskürtülen yakıt miktarı arttığı için daha iyi yanan zengin bir karışım oluşmakta, sıcaklık artmakta ki bu da CO emisyonunun azalması dizel yakıtına yaklaşmasına neden olmaktadır. Belirli bir yükte LPG oranı arttıkça da CO emisyonunun arttığı görülmektedir. Bunun birkaç sebebi olabilir; birincisi silindire giren yakıt içerisinde kendi kendine tutuşmaya karşı direnci yüksek olan LPG'nin artması, ikincisi tutuşmayı sağlayan dizel yakıtın azalması, üçüncüsü emme zamanında silindire giren gaz yakıtın genişleyerek daha az havanın silindire girmesine

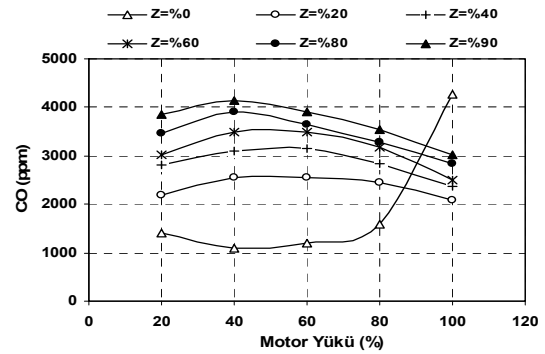


Şekil 3. Yükün fonksiyonu olarak egzoz gaz sıcaklığı değişimi (Variation of exhaust gas temperature with engine load)

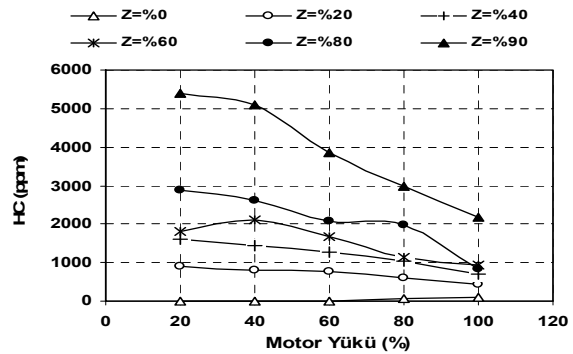
neden olması ve dolayısı ile yanmanın kalitesinin birkaç yönden olumsuz etkilenmesidir.

Dizel ve dizel/LPG çift yakıt için yanmamış hidrokarbon (HC) emisyonu yükün fonksiyonu olarak Şekil 5'te verilmiştir.

HC emisyonu da CO emisyonuna benzer şekilde hafif yükte çift yakıtlı çalışmalarda dizel yakıtına göre oldukça yüksektir. Yük arttıkça çift yakıtlı çalışmada HC emisyonunun dizel yakıtına yaklaştığı görülmektedir. Örneğin; %20 yükte dizel yakıtı HC emisyonu 11 ppm iken %100 yükte 107 ppm'e ulaşmaktadır. %80 LPG içeren çift yakıt ile %20 yükte HC emisyonu 2880 ppm iken yükün artması ile azalmakta ve %100 yükte 842 ppm'e düşmektedir. Ancak, yine de HC emisyonu olması gereken seviyenin çok üzerindedir. Sabit bir yükte (örneğin; %40 yükte) LPG oranı arttıkça da HC emisyonunun önemli miktarda arttığı görülmektedir. Çift yakıtlı dizel motor performansına gaz çeşidi ve motor parametrelerinin etkisi adlı literatür değerlendirmesi çalışmasında; dizel yakıtla çalışan motorlarda yanma dört kademededen oluşurken, gaz dizel çift yakıtla çalışan motorlarda ise gaz yakıtın da ayrı bir tutuşma gecikmesi olması nedeniyle yanmanın beş kademededen oluştuğu, gaz yakıtın difüzyon yanma kademesinin genişleme kursuna sarktığı ve bu yüzden bir miktar gaz hava karışımının oksijen eksikliğinden yanma fırsatı bulamayıp CO ve HC emisyonunu



Şekil 4. Yükün fonksiyonu olarak CO emisyonu değişimi (Variation of CO emissions with engine load)

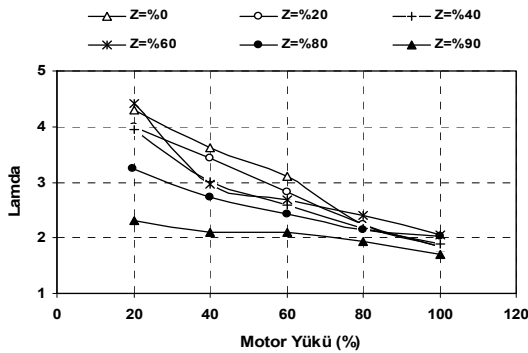


Şekil 5. Yükün fonksiyonu olarak CO ve HC emisyonu değişimi (Variation of CO and HC emissions with engine load)

arttırabileceği ifade edilmiştir [26]. Gerek dizel/biyodizel gerekse dizel/gaz çift yakıtlı dizel motorlarda püskürtme zamanının emisyonlara etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda püskürtme zamanının bir miktar öne alınması ile özellikle CO ve HC emisyonlarının azaldığı belirtilmiştir [6, 7, 17-18, 27]. Dolayısı LPG/dizel çift yakıtlı motorlarda, yanma fırsatı bulamayan gaz yakıttan kaynaklandığı düşünülen yüksek CO ve HC emisyonunu düşürmek için püskürtme zamanının bu emisyonlara etkisinin araştırılması önem arz etmektedir.

Test verilerine bakıldığında gaz yakıtın hava fazlalık katsayısını önemli miktarda etkilediği görüldüğünden hava fazlalık kat sayısının motor yüküne göre değişimi Şekil 6'da verilmiştir. Görüldüğü gibi özellikle düşük yüklerde LPG oranı arttıkça hava fazlalık kat sayısı önemli miktarda düşmektedir. Örneğin %20 yükte hava fazlalık kat sayısı (λ) dizel yakıtına göre yaklaşık %100 oranında azalmaktadır. Hava fazlalık kat sayısının azalması, silindire giren gazın genişmesi ve artan gaz oranının daha çok yer kaplamasının doğal bir sonucudur. Ancak bu kısılsız hava ile çalışan dizel motorlar için istenmeyen bir durumdur. Gaz/dizel çift yakıtı ile çalışan motorlarda özellikle düşük yüklerde, gaz yakıt oranı arttıkça CO ve HC emisyonlarının artmasının en önemli sebebinin azalan hava miktarı olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden gaz/dizel çift yakıtı ile çalışan motorlarda artan CO ve HC emisyonlarının motora aşırı hava verilerek bir miktar düşürülebileceği düşüncesi oluşmuştur.

Dizel ve çift yakıt için NOx emisyonlarının motor yüküne göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Yük arttıkça hem dizel yakıtı ile hem de her oranda LPG içeren çift yakıtlar ile NOx emisyonu artmaktadır. NOx oluşumunun yüksek yanma sıcaklığında yüksek oksijen konsantrasyonu tarafından desteklendiği ifade edilmiştir [25]. Dolayısı ile yük arttıkça NOx emisyonunun artması, çevrim başına yanmaya katılan yakıt miktarının artmasının silindir içi sıcaklığını arttırmasının doğal bir sonucudur. Diğer bir önemli durum, sabit yükte çift yakıt içerisindeki LPG oranı arttıkça NOx emisyonunun artmasıdır. Ancak, LPG oranı arttıkça NOx emisyonu artsa da yine de dizel yakıt

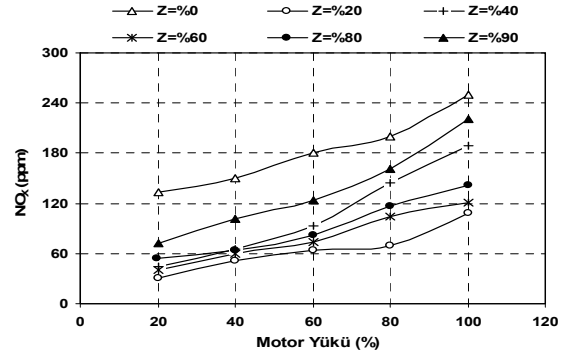


Şekil 6. Yükün fonksiyonu olarak hava fazlalık kat sayısının değişimi (Variation of lambda with engine load)

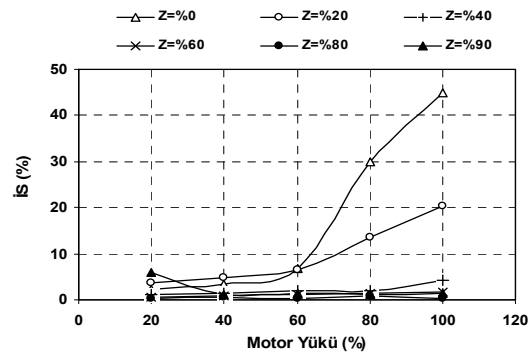
emisyonu seviyesinden düşüktür. Dizel yakıtı ile birlikte ikinci yakıt olarak doğal gaz, LPG veya hava gazının (producer gas) kullanıldığı bir çok çalışmada da NOx emisyonunun dizel yakıtı göre azaldığı tespit edilmiştir [4, 6, 8, 28-29]. Çift yakıt NOx emisyonunun dizel yakıtına göre düşük olmasının, gaz yakıtın tutuşma gecikmesi nedeniyle yanmasının genişleme kursuna sarkması nedeni ile maksimum basınç ve sıcaklığın düşmesinden kaynaklandığı ifade edilmiştir [26].

Dizel ve çift yakıt için is emisyonunun motor yüküne göre değişimi Şekil 8'de görülmektedir.

İs oluşumunun başlıca nedeni dizel yakıtın silindir içinde yeterli hava bulamaması veya zamanında hava ile hızlı bir şekilde karışamaması ve buharlaşmaması şeklinde ifade edilmiştir [30]. Bu çalışmadaki is emisyon oluşumu bu düşünceye uymaktadır. Yani belirli bir yük için ihtiyaç duyulan yakıt içinde LPG arttıkça, is oluşumuna daha çok sebep olan, hava ile daha zor karışan, daha zor buharlaşan dizel yakıtı azaldığı için is emisyonu önemli miktarda düşmektedir. Örneğin %80 yükte dizel yakıtı ile %30 olan is emisyonu, %20 LPG içeren çift yakıt ile %6,5'e ve %80 LPG içeren çift yakıt ile %1,5'a düşmektedir. Bu çalışmada elde edilen performans ve emisyon sonuçlarının, yeni geliştirilen ve Çin'in Guangzhou kenti halk otobüslerine uygulanan LPG/dizel çift yakıt sistemi ile ilgili araştırma sonuçlarına benzer sonuçlar



Şekil 7. Yükün fonksiyonu olarak NOx emisyonu değişimi (Variation of NOx emissions with engine load)



Şekil 8. Yükün fonksiyonu olarak is emisyonu değişimi (Variation of smoke with engine load)

elde edildiği tespit edilmiştir [31]. Her iki çalışmada %40 oranında LPG içeren LPG/dizel çift yakıt ile çıkış gücünün olumsuz yönde hemen hemen hiç etkilenmemesi, is ve NOx emisyonlarının azalması ile LPG'nin dizel motorlarda başarılı bir şekilde kullanılabilceği bir kez daha görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, dizel/LPG çift yakıtlı bir motorda sabit devirde ve değişen yüklerde LPG oranının motor performans ve emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmış ve aşağıda belirtilen başlıca sonuçlar elde edilmiştir.

Çift yakıtlı çalışmada, %40 LPG oranına kadar her yükte özgül yakıt tüketimi dizel yakıtına göre düşük olmaktadır. Ancak, %40 LPG oranından sonra çift yakıt içerisindeki LPG oranı arttıkça özgül yakıt tüketimi de artmaktadır.

Çift yakıt içerisindeki LPG oranı arttıkça EGS'ları artsa da %80 LPG oranına kadar dizel yakıtından düşük olmaktadır.

Çift yakıt içerisindeki LPG oranı arttıkça NOx emisyonu artmasına rağmen dizel yakıtlı motor çalışmasına göre düşük seviyede kalmaktadır. Tam yükte dizel yakıtı ile %40 seviyesinde olan İs emisyonu %1'lere kadar düşmektedir.

Çift yakıtlı çalışmada CO ve HC emisyonları bütün yüklerde dizel yakıtına göre daha yüksektir. Artan CO ve HC emisyonlarının LPG'den dolayı azalan hava fazlalık kat sayısından ve gaz yakıtın yanmasının gecikmesinden önemli miktarda etkilendiği, dolayısı ile motora aşırı hava verilmesinin ve püskürtme zamanının bu emisyonlara etkisinin araştırılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir.

Sonuç olarak; kütleli olarak %90 LPG oranına kadar dizel/LPG çift yakıtı ile tek silindirli dizel motorun düzenli çalıştığı görülmüştür. Ancak performans ve emisyon sonuçları bakımından en uygun LPG oranının %40 civarı olduğu anlaşılmıştır.

KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

CFPP	: The cold filter plugging point (Soğuk filtre tıkanma noktası)
CNG	: Compressed Natural Gas (Sıkıştırılmış doğal gaz)
CO	: Karbonmonoksit (ppm)
EGR	: Exhaust gas recirculation (Egzoz gazı geriçevrimi)
EGS	: Egzoz gaz sıcaklığı
HC	: Hidro karbon (ppm)
LPG	: Liquefied Petroleum Gas (Sıvılaştırılmış petrol gazı)
NOx	: Azot oksitler (ppm)

ÖYT	: fren özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
T_{EGZOZ}	: Egzoz gaz sıcaklığı (°C)
bsfc	: Fren özgül yakıt tüketimi (break spesifik fuel consumption), (g/kWh)
Z	: Çift yakıt içerisindeki kütleli LPG yüzdesi (%)
\dot{m}_{LPG}	: LPG debisi (g/s)
\dot{m}_{dizel}	: Dizel yakıt debisi (g/s)
λ	: Hava fazlalık katsayısı (-)

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Weaver, C.S., "Natural gas vehicle—a review of the state of the art", **SAE**, Paper 892133, 1989.
- Çetinkaya, S., "Taşıtlarda Yakıt Olarak CNG Kullanımının Teknolojik Ve Ekonomik Açından Değerlendirilmesi", **III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi**, 8-9 Haziran 2007, Ankara.
- Bayka, D., "Doğalgazın Taşıtlarda Yakıt Olarak Kullanımı", **III. LPG-CNG Kongresi ve Sergisi**, 8-9 Haziran 2007, Ankara.
- Papagiannakis, R.G. ve Hountalas, D.T., "Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot Diesel fuel and natural gas", **Energy Conversion and Management Volume**, 45, Issues 18-19, 2971–2987, 2004.
- Selim, M.Y.E., "Sensitivity Of Dual Fuel Engine Combustion And Knocking Limits To Gaseous Fuel Composition", **Energy Conversion And Management**, Volume 45, Issue 3, 411–425, 2004.
- Papagiannakis, R.G., Hountalas D.T. ve Rakopoulos, C.D., "Theoretical study of the effects of pilot fuel quantity and its injection timing on the performance and emissions of a dual fuel diesel engine", **Energy Conversion and Management**, Volume 48, Issue 11, 2951–2961, 2007.
- Nwafor, O.M.I., "Effect of advanced injection timing on emission characteristics of diesel engine running on natural gas", **Renewable Energy**, Volume 32, Issue 14, 2361–2368, 2007.
- Saleh, H.E., "Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine", **Fuel**, Volume 87, Issues 13-14, 3031–3039, 2008.
- Selim, M.Y.E., Radwan, M.S. ve Saleh, H.E., "Improving The Performance of Dual Fuel Engines Running on Natural Gas/LPG by Using Pilot Fuel Derived From jojoba seeds", **Renewable Energy**, Volume 33, Issue 6, 1173–1185, 2008.
- Barut, E., **Design and Implementation of Distributive Gas Fuel Metering System For The Dual Fuel Operation of Diesel Engine**, The Thesis Master of Science,, Middle East Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, 1997.

11. Abd Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. ve Abd Rabbo, M.F., “Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine”, **Energy Conversion and Management**; Volume 41, Issue 6, 559–72, 2000.
12. Nwafor, O.M.I., “Effect of choice of pilot fuel on the performance of natural gas in diesel engines”, **Renewable Energy**, Volume 21, Issues 3-4, 495–504, 2000.
13. Lee, C.S., Lee, K.H. ve Kim, D.S., “Experimental and numerical study on the combustion characteristics of partially premixed charge compression ignition engine with dual fuel”, **Fuel**, Volume 82, Issue 5, 553–60, 2003.
14. Papagiannakis, R.G. ve Hountalas, D.T., “Experimental investigation concerning the effect of natural gas percentage on performance and emissions of a DI dual fuel diesel engine”, **Applied Thermal Engineering**, Volume 23, Issue 3, 353–365, 2003.
15. Carlucci, A.P., Ficarella, A. ve Laforgia, D., “Experimental comparison of different strategies for natural gas addition in a common rail diesel engine”, **In: Proceedings of FISITA**, Barcelona, Spain, May 23–27, Paper F2004V136, 2004.
16. Salman, S., Çınar, C., Haşimoğlu, C., Topgül T. Ve Ciniviz, M., “The Effects Of Dual Fuel Operation On Exhaust Emissions In Diesel Engines”, **Technology**, Volume 7, Issue 3, 455-460, 2004.
17. Huang, Z., Shiga, S., Ueda, T., Nakamura, H., Ishima, T., Obokata, T. et al., “Effect of fuel injection timing relative to ignition timing on the natural gas direct-injection combustion”, **J Eng Gas Turbine Power**, Volume 125, Issue 3, 783-790, 2003.
18. Carlucci, A.P., de Risi A., Laforgia, D. ve Naccarato, F., “Experimental investigation and combustion analysis of a direct injection dual-fuel diesel–natural gas engine”, **Energy**, Volume 33, Issue 2, 256–263, 2008.
19. Abd Alla, G.H., Soliman, H.A., Badr, O.A. ve Abd Rabbo, M.F., “Effect of injection timing on the performance of a dual fuel engine”, **Energy Conversion and Management**, Volume 43, Issue 2, 269–277, 2002.
20. Çarman, K., Salman, S. ve Ciniviz, M., “Dizel Motorlarında Dizel Yakıtı+LPG Kullanımının Performans Ve Emisyonu Etkisi”, **Selçuk-Teknik Online Dergisi**, ISSN 1302- 6178. Volume 2, Number: 1, 2001.
21. Qi, D.H., Bian, Y.Z.H., Ma, Z.H.Y., Zhang, C.H.H. Ve Liu, S.H.Q., “Combustion and Exhaust Emission Characteristics of A Compression Ignition Engine Using Liquefied Petroleum Gas-Diesel Blended Fuel”, **Energy Conversion And Management**, Volume 48, Issue 2, Pages 500-509, 2007.
22. Ma, Z., Huang, Z., Li, C., Wang, X. ve Miao, H., “Combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–propane blends”, **Fuel**, Volume 87, Issues 8-9, 1711–1717, 2008.
23. Selim, M.Y.E., “Effect Of Engine Parameters And Gaseous Fuel Type on The Cyclic Variability of Dual Fuel Engines”, **Fuel**, Volume 84, Issues 7-8, 961–971, 2005.
24. Pirouzpanah, V. ve Barkhordarion, A.M. “Dual-Fuelling of An Industrial Indirect Injection Diesel Engine by Diesel and Liquid Petroleum Gas”, **International journal of energy research**, Volume 20, Issue 10, 903-912, 1996.
25. Heywood, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1988.
26. Sahoo, B.B., Sahoo, N. ve Saha, U.K., “Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review”, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 13, Issues 6-7, 1151-1184, 2009.
27. Aktaş, A. ve Sekmen, Y., “Biyodizel İle Çalışan Bir Dizel Motorda Yakıt Püskürtme Avansının Performans Ve Egzoz Emisyonlarına Etkisi”, **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.** Cilt 23, No 1, 199-206, 2008.
28. Uma, R., Kandpal, T.C. ve Kishore, V.V.N., “Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes”, **Biomass and Bioenergy**, Volume 27, Issue 2, 195–203, 2004.
29. Singh, R.N., Singh, S.P. ve Pathak, B.S., “Investigations on operation of CI engine using producer gas and rice bran oil in mixed fuel mode”, **Renewable Energy**, Volume 32, Issue 9, 1565–1580, 2007.
30. Abdel-Rahman, A.A., “On The Emissions From Internal-Combustion Engines: A Review”, **International Journal Of Energy Research**, Volume 22, Issue6, 483-513, 1998.
31. Dong, J., Gao, X, Li G and Zhang, X. “Study on Diesel-LPG Dual-Fuel Engines”, **SAE paper no: 2001- 01-3679**.