

ÇİFT YAKIT (BENZİN+LPG) KULLANIMININ MOTOR PERFORMANSI VE EMİSYONLAR ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL ANALİZİ

Cenk SAYIN, Mustafa ÇANAKÇI, İbrahim KILIÇASLAN ve Necati ÖZSEZEN
Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, 41380, Umuttepe, İzmit-Kocaeli,
canakci@kou.edu.tr , ikaslan@kou.edu.tr , nozsezen@kou.edu.tr

(Geliş/Received: 26.12.2004; Kabul/Accepted: 13.04.2005)

ÖZET

İçten yanmalı motorlarda, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarını en az düzeye indirme çabaları, çift yakıtla çalışan motorlar üzerine yapılan çalışmaların başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bu çalışmada, benzin ve çift yakıt (benzin+LPG) kullanımının emisyon ve performans parametreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla dört silindirli bir benzin motoru benzin+LPG yakıtı ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Karbüratörden motora yakıt geçişini sınırlayan yakıt memeleri %10 oranında küçültülüp eksik kalan yakıt ihtiyacı karbüratör bileşim braketine konuşturulan LPG yakıt nozulu ile sağlanmıştır. Karbüratör ana yakıt memesi %10 oranında küçültülürken; motordan aynı yük ve devir şartlarında her iki yakıtla (benzin, benzin+LPG) çalışma durumunda, aynı gücün elde edilmesi için, LPG nozul çapı ve basıncı hesaplanmıştır. Deneyler iki sabit yük ve sekiz farklı devir sayısında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak; çift yakıtlı çalışma ile özgül yakıt tüketiminde %4, CO'da %13, HC emisyonlarında %5 azalma sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çift yakıt, motor performansı, egzoz emisyonları, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG), benzin.

AN EXPERIMENTAL ANALYSIS OF INFLUENCE OF USING DUAL FUEL (GASOLINE+LPG) ON ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS

ABSTRACT

Reduction of fuel consumption and exhaust emissions in internal combustion engines is the starting point of the investigations on the engines which use dual fuels. In this study, the influence of gasoline fuel and dual fuel (gasoline+LPG) on emission parameters has been investigated. For this purpose, a four cylinder gasoline engine was modified to able to operate with gasoline+LPG fuel. Fuel nozzles that limits flow of the fuel from carburetor to cylinder was diminished by 10% and then necessary amount of fuel to produce the same amount power were provided from LPG nozzles that were placed on combined carburetor bracket. While diameters of carburetor fuel nozzles were decreased by 10%, diameter of LPG nozzles and flow pressure were calculated to obtain same power from the engine operated with gasoline+LPG. Experiments were carried out at two constant loads and eight different revolutions. The results showed that brake specific fuel consumption (bsfc), CO and HC emissions reduced 4%, 13% and 5%, respectively, compared with gasoline fuel operation.

Keywords: Dual fuel, engine performance, exhaust emissions, liqified petroleum gases (LPG) and gasoline.

1. GİRİŞ

İçten yanmalı motorlar genel olarak fosil kökenli yakıtlar ile çalışmaktadır. 2004 yılı istatistiklerine göre, toplam petrol rezervlerinin yaklaşık $1,54 \times 10^{11} \text{ m}^3$ olduğu ve bu rezervlerin ortalama 50 yıl sonra tükeneceği tahmin edilmektedir. [1,2] Üretilen petrolün 1/3'ü 185 kW'dan daha küçük güç kapasiteli taşıt motorlarında tüketilmektedir ve bu motorlar egzoz

emisyonları nedeniyle çevre kirliliğinin temel nedenini oluşturmaktadır [3,4]. Son araştırma ve gelişmeler ile motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarında önemli azalmalar sağlanmıştır. Fakat nüfusun artmasıyla birlikte taşıt sayısının da artması yıllar boyunca bu problemin var olacağı anlamını taşımaktadır.

Hidrokarbon esaslı yakıtların yanması sonucu açığa çıkan; CO, HC ve NO_x ve partikül emisyonları atmosfer

feri kirleterek ciddi sağlık problemleri oluşturmaktadırlar. Karbon ihtiva eden yakıtları yakan sabit motorlar, endüstriyel motorlar, evsel ve endüstriyel kazanlar gibi kaynaklardan çıkan atık gazların hava kirliliği oluşturmadaki katkıları her ne kadar büyükse de, yapılan istatistikler sonucunda büyük şehirlerde taşıtlardan kaynaklanan hava kirliliğinin toplam hava kirliliği içindeki payının %50'lere ulaştığı bilinmektedir [5-7].

Son yıllarda artan çevre bilincine ve mevcut enerji kaynaklarının biteceği kuşkularına paralel olarak özellikle gelişmiş ülkelerde hükümetlerin yaptırımları, üniversitelerin yönlendirmeleri üretici firmaları çevreyi kirletmeyen, alternatif yakıtlı ve tahrikli ürünlerin imalatına sevk etmiştir. Bu nedenle, otomotiv sektörü emisyonları azaltacak tedbirler almaya ve alternatif yakıtları kullanabilecek motorlar üretmeye başlamışlardır [8,9].

Ciniviz, M., ve Salman, S., altı farklı devirde, tek yakıt (dizel) ve çift yakıt (dizel+LPG) kullanımının motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkisini incelemiştir. Tek silindirli direk püskürtmeli bir dizel motoru dizel+LPG yakıtı ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, çift yakıtlı çalışmada motor torku ve gücü, tek yakıtlı çalışmaya göre, %5,8 daha yüksek çıkmıştır. Egzoz emisyonlarında ise iyileşme sağlanmıştır [10].

Gümüş, M., ve Tekin, M., yaptıkları çalışmada doğal gaz+dizel yakıt ile çalışan bir motorun doğal gaz kullanım oranına bağlı olarak yanma ürünlerinin hacimsel kesirlerinin değişimini hesaplayan bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Bilgisayar programından elde edilen sonuçlara göre, doğal gaz kullanım oranındaki artışa bağlı olarak yanma ürünlerindeki CO₂, CO, N₂, SO₂ ve O₂'nin hacimsel kesirlerinde azalma gözlenirken; H₂O ve H₂'nin hacimsel kesirlerinde artma gözlenmiştir [11].

Çanakçı, M., kimyasal yanma denklemini referans kabul ederek, hidrojen gazı ve benzinin yüzdelerindeki değişime bağlı olarak emisyon miktarlarını hesaplamıştır. Daha sonra bir bilgisayar programı kullanılarak, yanma karakteristikleri hesapsal ve grafiksel olarak sunulmuştur. Emisyon miktarları; sıcaklık, hava fazlalık katsayısı ve hidrojen oranının fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu teorik çalışmanın sonucunda, hidrojen gazı kullanım oranının artmasıyla CO ve NO_x emisyonlarının belirgin bir şekilde azaldığı gözlenmiştir [12].

Çetinkaya, S., ve Çelik, B., metanol-benzin karışımlarında görülen faz ayrışması sorununu çözmek amacıyla, çift şamandıralı bir karbüratör geliştirerek, metanol ve metanol-benzin karışimli yakıtların motor performansı ve egzoz emisyonlarına olan etkileri ve motorda kullanılabilirliğini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, metanol ve metanol-benzin karışım-

ları kullanıldığında motorun termik verim ve gücünde artma, egzoz emisyonlarında ise azalmalar olduğu ortaya çıkmıştır [13].

Choi ve ark., sıkıştırma oranı değiştirilebilen, tek silindirli bir motor üretmişler ve bu motoru performans ve emisyon karakteristiklerini araştırmak için kullanmışlardır. Ateşleme avansı, maksimum tork değerini verebilecek şekilde ayarlanan bu motor, 1400 d/d ve 8/1 sıkıştırma oranında test edilmiştir. Bu çalışmada, çift yakıtlı (LPG+hidrojen) çalışmanın termik verim, performans ve egzoz emisyonları üzerine etkisi incelenmiştir [14]. Sonuç olarak, çift yakıtlı çalışmada; hidrojen oranının artmasıyla, stokiyometrik hava yakıt oranına kadar termik verimde düşme daha sonra artış gözlenmiştir. Özgül yakıt tüketimi ise hidrojen oranının artmasıyla azalmaktadır. Egzoz emisyonları açısından değerlendirilecek olunursa, hidrojen katkısının CO emisyon miktarını etkilemediği, ancak bu miktarın artmasıyla; zengin karışimli çalışma şartlarında oksijen miktarının azaldığı görülmektedir. NO_x emisyonları en yüksek değerine %10 hidrojen + %90 LPG ve hava fazlalık katsayısı 0,9-1,15 olan çalışma şartlarında ulaşmaktadır.

Yüksel, F., yaptığı çalışmada buji ile ateşlemeli bir benzin motorunda, yakıt olarak etanol benzin karışımının kullanılmasının performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir [15]. Alkol-benzin karışımlarının motor yakıtı olarak kullanılması konusundaki en önemli sorun, yakıt karışımını kararlı bir şekilde ve homojen olarak sıvı fazda tutabilmektir. Bu problemi ortadan kaldırmak için yeni bir karbüratör dizayn edilmiştir. Testler dört farklı yük (%25, %50, %75, %100) ve her bir yük konumu için altı farklı devir sayısında (1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000) gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmanın sonucunda, etanol-benzin karışımı kullanımı ile motorun çıkış gücünde kısmi artış görülmekle birlikte, karışım içindeki etanolün yanma performansını iyileştirmesi nedeniyle CO ve HC emisyonlarında önemli azalma, CO₂ emisyonlarında ise artma gözlemlenmiştir.

Türkiye'de benzinli araçların yaklaşık %60'ı karbüratörlüdür. Karbüratörlü sistemlerde her bir silindire eşit oranda (homojen) hava yakıt karışımı verilememesi nedeniyle hem yakıt tüketimi, hem de egzoz emisyonları artmaktadır. Bu problemi çözmek amacıyla, dört silindirli bir benzin motoru benzin+LPG ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Emme manifolduna giren benzin hava karışımının yüksek basınçlı LPG yakıtı tahrikiyle türbülansı artırılarak daha homojen bir karışım elde edilmiştir.

2. LPG'NİN YAKIT OLARAK KULLANIMI

Sıvılaştırılmış petrol gazı olarak tanımlanan LPG, ülkemizde benzinli motorlarda yaygın olarak kullanılan bir yakıttır. LPG temel olarak propan (C₃H₁₀) ve butan (C₄H₁₀)'ın belirli oranlardaki karışımından

oluşmakla birlikte bünyesinde çok az miktarda propilen ve bütülen içermektedir. LPG araçlarda benzinden daha güvenli bir şekilde depolanması nedeniyle, 1970'li yılların başından itibaren güvenli bir şekilde kullanılmaktadır. Taşıtların çoğunun yakıt deposu plastik yada kompozit malzemelerden olmasına karşın, LPG yakıt deposu 3 mm kalınlığında karbonlu çelik malzemeden üretilmekte ve maksimum çalışma basıncının dört katına kadar dayanabilecek şekilde dizayn edilmektedir [16-18].

LPG kullanımının en önemli avantajı ekonomik olmasıdır. Aynı zamanda, LPG benzine kıyasla daha temiz olması nedeniyle motordaki aşınma ve çatlaklar daha az olmakta bunun sonucu olarak da motorun ömrü uzamaktadır [19-21]. Bununla birlikte bir kısım kaynaklar bu yakıtın kuru yakıt olması nedeniyle aşınmayı artırmaya sebep olduğu üzerine sonuçlar vermektedir [18,22]. LPG, egzoz emisyonları yönünden diğer yakıtlara göre daha temizdir. Araştırmalar [19-22] modern bir motorun yakıt sisteminin LPG kullanımına dönüştürülmesiyle; yaklaşık olarak NO_x emisyonlarında %34, CO₂ emisyonlarında %15 azalma olurken, HC emisyonları ise en az düzeye inmiştir.

İçingür ve Haksever, içten yanmalı motorlarda sıvılaştırılmış petrol gazının yakıt olarak kullanılması sırasında karşılaşılan problemleri incelemişlerdir [21]. Dört silindri, dört zamanlı buji ile ateşlemeli bir motorda LPG yakıt sistemi dönüşümü yapılmış ve motor karakteristikleri incelenmiştir. Deney sonuçları, LPG ile çalışan motorun maksimum tork değerlerinin benzinli motora göre daha düşük olduğunu göstermiştir. Egzoz emisyonu değerleri benzine göre daha düşük olmuştur.

Sayın ve ark., benzin yakıtı ve benzin+LPG yakıtının egzoz emisyonu parametrelerine etkisini incelemişlerdir [23]. Bu amaçla dört silindri bir benzin motoru benzin+LPG yakıtı ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Sonuçta, çift yakıtlı çalışma ile CO ve partikül emisyonlarında azalmalar sağlandığı deneysel olarak belirlenmiştir.

Polat, İ., ve diğ. dört zamanlı, dört silindri bir benzin motorunun LPG ile çalışabilecek şekilde dönüşümünü yaparak, performans ve emisyon davranışlarını incelemiş ve benzinle çalışması durumunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır [24]. Performansta bir değişme olmamasına karşın CO ve HC emisyonlarında azalma görülmüştür.

Yapılan literatür taramasında görüldüğü gibi, çift yakıtlı (benzin+LPG) çalışan karbüratörlü bir motorun performans ve emisyonları henüz incelenmemiştir. Bu nedenle, yapılan bu çalışmanın amaçlarından birisi de, motor gücünü sabit tutmak şartı ile, motorun benzin+LPG ile çalışması sonucu oluşacak performans ve emisyon değişiklerini tespit edip analiz etmektir.

3. YAKIT SİSTEMİNİN ÇİFT YAKITLI ÇALIŞMA İÇİN DÜZENLENMESİ

Çift yakıtlı sistemin uygulanabilmesi ve motor performans ve emisyonlarına etkisini inceleyebilmek için test motoru benzin+LPG yakıtı ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Karbüratörden motora yakıt geçişini sınırlayan yakıt memeleri %10 oranında küçültülüp eksik kalan yakıt ihtiyacı LPG yakıt nozulu ile sağlanmıştır. Karbüratör ana yakıt memesi %10 oranında küçültülürken; motordan aynı yük ve devir şartlarında her iki yakıtla çalışma durumunda aynı gücün elde edilmesi sağlanmıştır.

Kütleli olarak LPG yakıtının enerji değerinin benzine karşı daha yüksek olmasına karşın, silindirlere gaz olarak girmeleri sonucu hacimsel verimin düşmesine neden olur. Sonuç olarak, LPG'nin %10'dan daha fazla gönderilmesi gerekmektedir. Benzin ve benzin+LPG çalışmalarında motordan aynı güç alınması hedeflenirse;

$$\dot{Q}_{ben} = \dot{Q}_{LPG} \quad (1)$$

yazılabilir. Birim zamanda motorun ihtiyacı olan enerjiyi yakıtın kütleli debisi ve alt ısıl değeri cinsinden,

$$\dot{Q} = \dot{m}Hu \quad (2)$$

olduğu bilinmektedir. Buradan hareketle;

$$[\dot{m}Hu]_{ben} = [\dot{m}Hu]_{LPG} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{ben} = \dot{m}_{LPG} \frac{Hu_{LPG}}{Hu_{ben}} \quad (4)$$

olur. Benzin ve LPG için alt ısıl değerlerinin sayısal karşılıkları yerine konular ve gerekli işlemler yapılırsa, her iki yakıtın kütleli debileri arasında,

$$\dot{m}_{ben} = 1,03\dot{m}_{LPG} \quad (5)$$

bağıntısı çıkarılır [25]. Manifold vakumunun her iki durumda (benzin ve benzin+LPG) da eşit olduğu kabul edilebilir. Bernoulli denklemi gereği her iki durumda benzin ve benzin+LPG yakıtlarının venturi boğazına giriş hızları eşit olacaktır.

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (6)$$

$$\dot{V} = \frac{\pi D^2}{4} v \quad (7)$$

$$\dot{m} = \rho \frac{\pi D^2}{4} v \quad (8)$$

Bu ifade denklem 5’de yerine konulup gerekli düzeltmeler yapılır ise, LPG nozul delik çapını ifade eden denklem,

$$D_{LPG} = \sqrt{0,97 \frac{\rho_{ben}}{\rho_{LPG}} D_{ben}} \quad (9)$$

bulunur.

Benzin ve LPG’nin yoğunluk değerleri sırasıyla 0,74 ve 0,56 kg/lt olarak alınabilir [26]. Bu değerler denklem 9’da yerine konulup gerekli düzeltmelerden sonra her iki çalışma durumunda karbüratör ana yakıt memesi ve LPG nozul delik çapı arasındaki bağıntı;

$$D_{LPG} = 1,14 D_{ben} \quad (10)$$

olarak bulunur.

Denklem 10; karbüratör yakıt memesi çapının küçültülmesine bağlı olarak üretilecek LPG nozul çapını belirlemede kullanılabilir. Karbüratör ana yakıt memesi çapı 2,4 mm’dir. Bu çapın %10 oranında (0,24 mm) küçültülmesine karşılık gelen LPG nozul delik çapı 0,27 mm olarak hesaplanmıştır.

Testlerde, saf benzin kullanıldığında ve karbüratör ana yakıt meme çapı 2,4 mm iken benzinin akış hızı 0,45 m/s olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde %90 benzin kullanıldığında ve yakıt meme çapı 2,1 mm iken, benzinin akış hızı ise 0,42 m/s olarak ölçülmüştür. LPG nozulundan geçen yakıtın hızı ise;

$$[\dot{m}]_{ben} = \% 90 [\dot{m}]_{ben} + [\dot{m}]_{LPG} \quad (11)$$

denkleminde bulunabilir. Denklem 8’deki veriler denklem 11’de yerine konur ve gerekli düzenlemeler yapılır ise;

$$v_{LPG} = 0,551 \text{ m/s olarak bulunur.}$$

Emme manifolduna püskürtülen LPG yakıtının basıncını ifade eden denklem,

$$P_{LPG} = \rho_{LPG} \frac{v_{LPG}^2}{2} \quad (12)$$

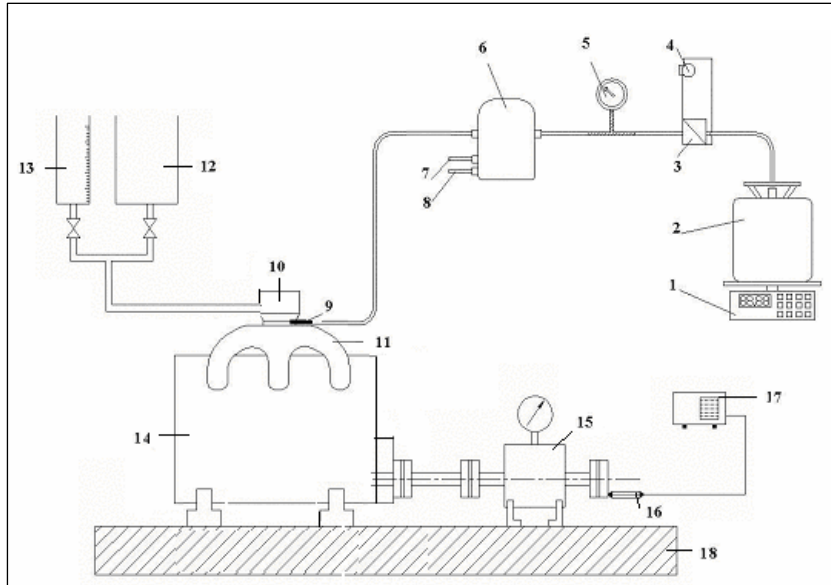
şeklinde yazılabilir [27].

Burada hesaplanan $8,5 \cdot 10^{-4}$ bar manometrik basınç değeridir. LPG mutlak yakıt basıncı yaklaşık 1,1 bar değerindedir.

4. DENEY DÜZENEGİ

Deneyler Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 1’de görülmektedir.

Deney düzeneği; TOFAŞ DKS tipi bir benzin motoru, sıvılaştırılmış petrol gazı tertibatı, BİLSA egzoz gaz ölçüm cihazı, dinamometre ve yakıt tüketiminin ölçülmesinde kullanılan beher ve dijital terazilerden meydana gelmiştir. Deney motoru, 4 zamanlı dört silindirdir ve motor hacmi 1600cc olan karbüratörlü bir motor olarak seçilmiştir. Test motorunun karakteristik özellikleri Tablo 1’de görülmektedir.



1. Dijital terazi 2. LPG tüpü 3. Elektronik devre kesici 4. Kontak anahtarı
5. Basınç ölçer 6. Regülatör 7. Sıcak su girişi 8. Sıcak su çıkışı
9. LPG yakıt nozulu 10. Karbüratör 11. Emme man. 12. Yakıt deposu
13. Ölçekli kap 14. Motor 15. Dinamometre 16. Egzoz gaz analizi sensörü
17. Egzoz gaz analiz cihazı 18. Platform

Şekil 1. Deney düzeneği

Tablo 1. Deney motoruna ait karakteristik özellikler [28]

Motor cinsi	Fiat DKS
Silindir sayısı	4
Silindir çapı, mm	84
Strok boyu, mm	71,5
Toplam silindir hacmi, cc	1600
Sıkıştırma oranı	8:1
Maksimum tork, Nm	117,2
Maksimum güç, kW	58,88
Motorun oktan ihtiyacı, RON	91

Tablo 2. Benzin ve LPG'nin özelliklerinin karşılaştırılması [29]

Özellikler	Benzin	LPG
Kimyasal formülü	C _{6,9} H _{14,6}	C _{3,7} H _{9,4}
Yoğunluk, 15 °C'de, kg/lit	0,738	0,508
Maksimum yanma hızı, m/s	0,35	0,4
Araştırma oktan sayısı	91	110
Yakıtın ısı değeri, kJ/kg	43932	45980
Stokiyometrik hava yakıt oranı (kütleli)	0,0685	0,0638

Testlerde 91 oktanlı normal benzin ve çift yakıtlı (benzin+LPG), çalışmada ise 2,5 kg'lık piknik tüpleri kullanılmıştır. Testlerde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Emme manifoldundaki basınç değişimi eğik manometre yöntemiyle ölçülmüştür.

Test ekipmanlarının özellikleri Tablo 3'de sunulmuştur. Benzin yakıt tüketiminin ölçülmesinde hacimsel ölçekli iki beher ve yakıtın bu kaptaki akış süresini ölçmek için 1/100 hassasiyetli kronometre kullanılmıştır. Motorun tükettiği LPG miktarını belirlemek için, 15000 gr ağırlık ölçebilen 5 gr hassasiyetli dijital terazi kullanılmıştır.

Tablo 3. Test ekipmanlarının tipi ve çalışma aralıkları

	Tipi	Çalışma aralığı
Manometre	Eğik	Maksimum ± 2068 mbar
Orifis	Konik kenarlı	0-4,5 MPa
Dinamometre	Hidrolik	0-100 Nm
Egzoz gaz analizörü	CO	% 1-2
	HC	0-3000 ppm
	CO ₂	% 0-20

5. DENEY YÖNTEMİ VE ÖLÇÜMLER

Ön deneylerin yapılmasından sonra, motorun supap ayarları, ateşleme avansı, buji tırnak aralığı ayarı ve silindir kompresyon basınçlarının ölçümü motorun katalog değerlerine göre yapılmış ve bu değerler deney çalışmaları süresince kontrol edilmiştir.

Tüm performans testleri iki sabit yük (20 ve 40 Nm) ve her bir yük kademesi için sekiz farklı devir sayısında (1200-1400-1600-1800-2000-2200-2400 d/d) gerçekleştirilmiştir. Test motoru rejim şartlarına ulaştıktan sonra, motor yağı sıcaklığı, özgül yakıt tüketimi, kütleli hava debisi, motor hızı, tork ve egzoz emisyonları (CO, CO₂ ve HC) ölçülmüştür. Her bir ölçüm işlemi üç kere tekrarlanmış ve ortalama değerler alınmıştır. Yüksek devirlerde motor yağında görülen aşırı ısınmanın motora vereceği zararı önlemek için yağ sıcaklığı devamlı kontrol edilmiş ve gerektiğinde motorun yükü boşaltılarak dinlenmeye terk edilmiştir.

Test motoru rejim şartlarına ulaştıktan sonra, 120 sn süresince tüketilen benzin ve LPG miktarları ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu değerler yardımıyla özgül yakıt tüketimi (bsfc) ve efektif güç (Pe) hesaplanmıştır.

Örneğin motorun benzinle çalışması durumunda, 40 Nm sabit yük ve 2200 d/d'da, efektif güç;

$$Pe = \frac{2\pi n T}{60} \quad (13)$$

$$Pe = \frac{2\pi \cdot 2200}{60} \cdot 40 = 9,215 \text{ kW} \quad (14)$$

özgül yakıt tüketimi ise;

$$bsfc = 3,6 \times 10^6 \frac{mf}{Pe} \quad (15)$$

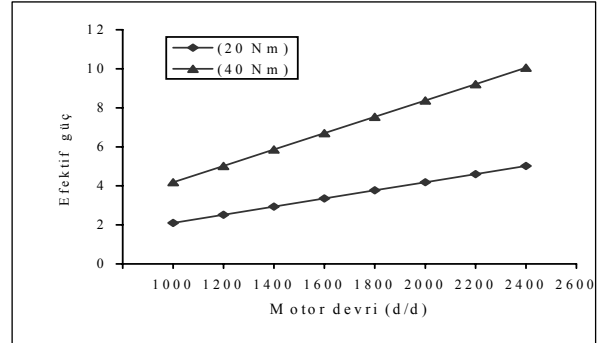
$$bsfc = 3,6 \times 10^6 \frac{9,25 \times 10^{-4}}{9,215} = 362 \text{ g / kWh}$$

olarak hesaplanır.

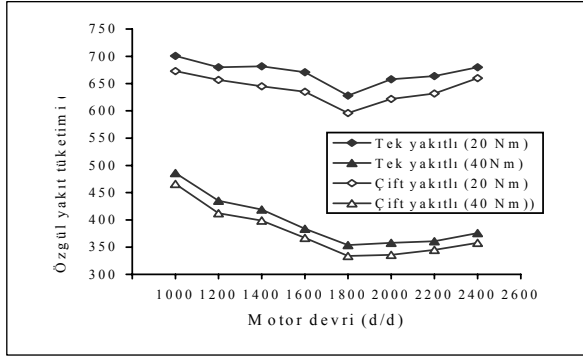
Burada Pe; efektif gücü (kW), n; devir sayısını (d/d), T; motor yükünü (Nm), mf; kütleli yakıt debisini ve bsfc; özgül yakıt tüketimini (g/kWh) ifade etmektedir.

6. BULGULAR

Yapılan bu çalışmada, çift yakıtlı çalışmanın performans ve emisyon üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 2'de iki farklı sabit yük konumundaki efektif güç verilerinin motor devir sayısı ile değişimi görülmektedir. Deneyler sabit yük şartlarında gerçekleştiği için efektif güç değerleri devir sayısının değişimiyle doğrusal orantılı olarak artmaktadır.

**Şekil 2.** Efektif gücün motor devri ile değişimi

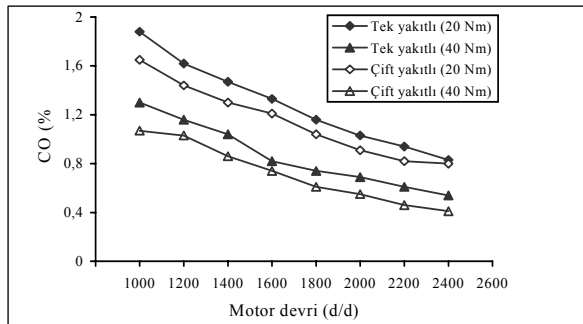
İki farklı yük konumunda (20 ve 40 Nm) tek ve çift yakıtlı çalışmanın motor devrine bağlı olarak özgül yakıt tüketimi değerleri Şekil 3'de görülmektedir. Yakıt tüketim eğrilerinin benzer seyir izlemeleri istenen bir durumdur. İçten yanmalı motorlarda en yüksek tork'un elde edildiği nokta hacimsel verimin maksimum olduğu değerdir [30]. Özgül yakıt tüketimi denklem 15'de gösterildiği gibi efektif güç ve kütleli yakıt debisinin fonksiyonudur. Deneyler sabit tork ve buna bağlı olarak sabit güç şartlarında gerçekleştiği için, Şekil 3'de görüldüğü gibi en düşük özgül yakıt tüketimi değerleri hacimsel verimin en yüksek olduğu 1800 d/d'da gözlenmiştir. Örneğin; tek yakıt ile



Şekil 3. Özgül yakıt tüketiminin motor devri ile değişimi

yapılan testlerde minimum özgül yakıt tüketimi 40 Nm sabit yük ve 1800 d/d'da 354 g/kWh, benzin+LPG ile yapılan testlerde 334 g/kWh olarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçları, çift yakıtlı çalışmanın özgül yakıt tüketimi değerlerinin tek yakıtlı çalışmanın özgül yakıt tüketimi değerlerinden ortalama %4 daha az olduğunu göstermektedir. Özgül yakıt tüketiminin çift yakıtlı çalışmada daha düşük olmasının nedeni LPG'nin emme manifoldu girişine yüksek basınçla verilmesi sonucu artan türbülans oluşumunun yanma performansını artırmasıdır. Örnek olarak; 20 Nm sabit yük ve 1800 d/d'da çift yakıtlı çalışmanın özgül yakıt tüketim değeri 596 g/kWh iken, benzinle elde edilen özgül yakıt tüketimi değeri 628 g/kWh'dir. Benzer şekilde; 40 Nm sabit yük ve 2000 d/d'da çift yakıtlı çalışmanın özgül yakıt tüketimi değeri 336 g/kWh, 91 oktanlı normal benzinin özgül yakıt tüketimi değeri 358 g/kWh'dir.

Şekil 4'de iki farklı sabit yük konumundaki CO miktarının motor devri ile değişimi görülmektedir. Öncelikle her iki yakıtla (benzin, benzin+LPG) elde edilen emisyon eğrilerinin benzer olması olumlu bulunmuştur. Egzoz emisyonları arasında CO bulunmasının ana nedeni oksijenin yetersiz olmasıdır. Teorik olarak 1 kg benzin veya dizel yakıtının yanması için yaklaşık 14,5 kg hava gereklidir. Eğer hava fazlalık katsayısı 1'den küçük ise, yani karışım içinde gerekenden daha az hava var ise yanma yetersiz oksijen ortamı içinde olacak ve yakıt karbonun tümü CO₂'ye dönüşemeyerek CO olarak kalacaktır. Yanma esnasında, silindirlerin hepsi düşünüldüğünde, oksijen; genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tam homo-



Şekil 4. CO miktarının motor devri ile değişimi

jen olmadığı durumda da silindir içinde belli bir konumda kısmi olarak da yetersiz olabilir. Sonuç olarak, CO oluşumu büyük ölçüde hava fazlalık katsayısına bağlıdır [12,31].

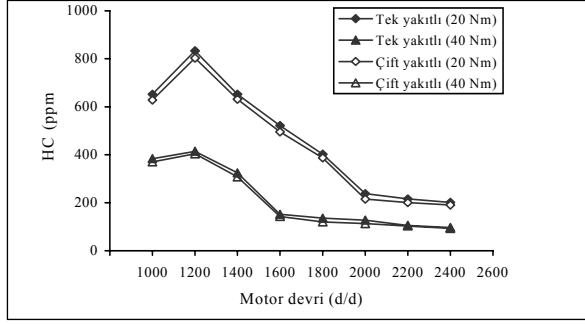
Yapılan testler sırasında tüm motor yük ve devirlerinde, çift yakıtın ürettiği CO emisyon miktarının tek yakıtın ürettiği emisyon miktarından ortalama %13 oranında daha az olduğu görülmüştür. Örnek olarak; 20 Nm sabit yük ve 1200 d/d'da çift yakıtın ürettiği CO emisyon miktarı %1,03 iken, tek yakıtın ürettiği CO emisyon miktarı %1,16 olmaktadır. Bunun nedeni, LPG yakıtı gaz fazında ve silindirlere havayla homojen bir şekilde karışarak girmesi ve kimyasal ترکیbi nedeniyle temiz yanmasıdır [21]. Ayrıca LPG yakıtının içindeki katkı maddelerinin bulunmaması yanma sonucu kirletici egzoz bırakmamasına neden olmaktadır. Yapılan ölçümlerde; her iki yakıt için minimum CO değeri beklendiği gibi maksimum moment ve maksimum devir şartlarında elde edilmiştir. En düşük CO değeri 40 Nm sabit yük ve 2400 d/d'da çift yakıt için %0,47 iken, tek yakıt için %0,54 olarak ölçülmüştür.

Her iki yakıt için de yüksek motor devirlerinde CO miktarının az oluşu dikkat çekicidir. Bunun nedeni, devir sayısının yükselmesi ile yanma odasında artan türbülansın daha homojen bir karışım oluşturması sonucu CO emisyonlarının azalma eğilimi göstermesidir. Yük artışı ile yanma ürünlerinin egzozda kalış süreleri azalmaktadır. Sonuç olarak, emme zamanında silindirlere daha fazla hava alınması CO emisyonlarını azaltmaktadır [32].

Hacimsel verim, emme zamanında bir silindire giren hava miktarının ideal durumda (atmosfer basıncı ve sıcaklığında) girebilecek hava miktarına oranıdır. Hacimsel verim, ortalama olarak motorun maksimum devrinin 2/3 oranına kadar artma göstermektedir [33]. Deneysel motorunun maksimum devri 5400 d/d (Tablo 1) olduğuna göre, Şekil 4'de görüldüğü gibi hacimsel verimin artması da CO emisyonlarının azalmasında önemli bir etkidir.

Şekil 5'de HC miktarının yük ve devir sayısı ile değişimi görülmektedir. CO emisyonlarında olduğu gibi HC emisyon eğrilerinin de benzer seyir izlemeleri istenen bir durumdur. Egzoz gazları içerisindeki hidrokarbonun bulunması, yakıtın tam olarak yakılamadığını gösterir. Hidrokarbon oluşumunun ana nedeni sıcaklıkların yada oksijenin yetersiz olması sonucu yanmanın tamamlanamamasıdır [33,34].

Elde edilen sonuçlar, çift yakıtın ürettiği HC emisyon miktarının tek yakıtın ürettiği emisyon miktarından ortalama %5 oranında az olduğunu göstermektedir. Örnek olarak; 40 Nm sabit yük ve 1600 d/d'da çift yakıtın ürettiği HC miktarı 143 ppm iken, benzinin ürettiği emisyon miktarı 152 ppm olmaktadır. Yapılan ölçümlerde her iki yakıt içinde minimum HC değeri, CO emisyonlarına benzer şekilde maksimum moment



Şekil 5. HC emisyonlarının motor devri ile değişimi

ve maksimum devir şartlarında elde edilmiştir. En düşük HC değeri 40 Nm sabit yük ve 2400 d/d’da çift yakıt için 93 ppm iken tek yakıt için 98 ppm olarak ölçülmüştür.

Motor devrinin artması yanma odasındaki türbülansı artıracaktır. Bunun sonucu olarak da benzin motorlarında cidarların yakınındaki alev sönme bölgeleri azalacak ve alevin ilerlemesinde karşılaşılabilecek sorunlar ortadan kalkacaktır. Şekil 5’de görüldüğü gibi devir sayısının artması ile yanmamış HC’lar da azalma görülecektir [30,32]. Yükün artması ile, alev sönme bölgesi küçülecek yanma sonu sıcaklığı artacaktır. Bu etkenler HC emisyonunu azaltıcı niteliktedir. Motor yükünün artması ile Şekil 5’de görüldüğü gibi HC emisyonları azalır. Yukarıda belirtildiği gibi hacimsel verim, motorun maksimum devrinin yaklaşık 2/3 oranına kadar artmaktadır. Bunun sonucu olarak da CO emisyonlarına benzer şekilde HC emisyonları da azalma eğilimi göstermektedir [34].

7. SONUÇ

İçten yanmalı motorlarda, yakıt tüketimi ve egzoz emisyonlarını en az düzeye indirme çabaları, çift yakıtlı çalışan motorlar üzerine yapılan çalışmaların başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Özellikle kapalı alanlarda çalışan ağır hizmet tipi dizel motorlarda uygulamaya konulan çift yakıt (dizel+LPG, dizel+doğal gaz) projeleri ile emisyonlarda iyileşmeler sağlanmıştır. Benzer bir çalışmanın benzinli araçlarda araştırılmasının faydalı olacağı bir gerçektir. Bu nedenle, yapılan bu çalışmada çift yakıt (benzin+LPG) kullanımının motor performans ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre; çift yakıtlı çalışmanın özgül yakıt tüketimi değerlerinin, tek yakıtlı çalışmaya göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çift yakıtlı yapılan deneylerde egzoz emisyonları (CO ve HC) tüm motor yük ve motor devirlerinde tek yakıt ile elde edilen egzoz emisyonlarından daha düşük olmaktadır. Elde edilen bu sonuçlara, LPG’nin yüksek basınçla püskürtülmesiyle artan türbülans eğiliminin yanma performansını iyileştirmesi ve sıvılaştırılmış petrol gazının daha temiz egzoz emisyonu üretmesi neden olmaktadır.

SEMBOLLER

D_{ben}	=	Karbüratör yakıt meme çapı
D_{SPG}	=	LPG nozul çapı
H_u	=	Alt ısı değer (kJ/kg)
\dot{m}	=	Kütleli debi (kg/s)
\dot{V}	=	Hacimsel debi (m ³ /s)
\dot{Q}_{ben}	=	Benzin yakıtının birim zamandaki ürettiği ısı miktarı
\dot{Q}_{SPG}	=	LPG yakıtının birim zamandaki ürettiği ısı miktarı
ρ	=	Yoğunluk (kg/m ³)
v	=	Hız (m/s)

KAYNAKLAR

1. Durgun, O., ve Ayvaz, Y., “The Use of Diesel Fuel-Gasoline Blends in Diesel Engines”, **Proceedings of First Trabzon International Energy and Environment Symposium**, Trabzon, 905-912, July 29-31 1996.
2. IEA, “World Crude Oil and Natural Gas Reserves”, **International Energy Annual**, March, 2004.
3. Yüksel, F., ve Yüksel, B., “Engine Performance and Pollution Emission of an SI Engine Using Ethanol-Gasoline Blended Fuels”, **Atmospheric Environment**, 10, 36-403, 2002.
4. Pulkrabek, W., **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**, John Wiley & Sons, New York, ABD, 2001.
5. Wayne State University Resource Group, **Cold Start Hydrocarbon (HC) Emissions in Gasoline Engines**, 132-134, 2004.
6. Energy Conversions Inc., “An Essay on Natural Gas and its Use as a Fuel Source for Locomotives and Power Generation”, **The ECI Dual Fuel Sourcebook**, 3-4, 2004.
7. Karana, S., “The Effects of Cold Intake Temperatures on the Combustion of Gaseous Fuels in a Dual Fuel Engine”, Ms Thesis, **University of Calgary**, Canada, 2003.
8. Rahman, A., “On the Emissions from Internal-Combustion Engines”, **International Journal of Energy Research**, 22, 483-513, 1998.
9. Nichols, R., “Application of Alternative Fuels”, **SAE paper**, 821573, 1982.
10. Ciniviz, M., ve Salman, S., “Dizel Motorlarında Dizel Yakıtı+SPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi”, **Politeknik Dergisi**, 3, 22-33, 2000.
11. Gümüş, M., Tekin, M., “Çift Yakıtlı (Dizel+Doğal Gaz) Dizel Motorunun Yanma Ürünleri Analizi”, **TMMOB Makina Mühendisleri Odası VII. Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu**, 96-101, 26-27 Ekim 2001.
12. Çanakçı, M., “Idealized Engine Emissions Resulting from The Combustion of Isooctane Supplemented with Hydrogen”, Ms Thesis, **Vanderbilt University**, Tennessee, August, 1996.

13. Çetinkaya, S., ve Çelik, B., “Buji İle Ateşlemeli Motorlarda Yakıt Olarak Metanol-Benzin Karışımlarının Kullanılması”, **5. Uluslar arası Yanma Sempozyumu**, 255-269, Ankara, 26-30 Temmuz 1998.
14. Choi, G., Chung, Y., Han, S., “Performance and Emissions Characteristics of a Hydrogen Enriched LPG Internal Combustion Engine at 1400 rpm”, **International Journal of Hydrogen Energy**, 30, 77-82, 2005.
15. Yüksel, F., ve Yüksel, B., “The Use of Ethanol-Gasoline Blend as a Fuel in a SI Engine”, **Renewable Energy**, 29, 1181-1191, 2004.
16. Alternative Fuels Data Center, **Alternative Fuels Descriptions and Information**, 2-4, 2003.
17. William, J., ve Timoney, D., “Emissions and Efficiency Comparison of LPG Fuels in a 1.4 litre Passenger Car Engine”, **SAE Paper**, 972970, 1997.
18. Piel, W., “Transportation Fuels of the Future”, **Fuel Processing Technology**, 71, 167-179, 2001.
19. Bata, R, M., ve Roan, V, P., “Effects of Ethanol and/or Methanol in Alcohol-Gasoline Blends on Exhaust Emissions”, **American Society of Mechanical Engineers Conference Paper** (ICE7; 9p), New Orleans, LA, USA, Jan 10-14 1988.
20. Scharff, R., **Complete Fuel Systems and Emission Control**, Delmar Publishers, Inc., Albany, NY. 1989.
21. İcingür, Y., ve Haksever, R., “Using of LPG for Internal Combustion Engines-Experimental Analysis of Its Effects on Performance and Emission”, **Journal of Polytechnic**, Vol 1, No 3-4, 69-76, 1998.
22. Kosha, M., ve Pirouzpanah, V., “Pollutants Emission Studies of Direct-Injection Diesel-LPG Engines”, **Proceeding of the First International Energy and Environment Symposium**, 1215-1221, Trabzon, July 29-31, 1996.
23. Sayın, C., Çanakçı, M., ve Kılıçaslan, İ., “Exhaust Gas Emissions of a Gasoline Engine Dual-Fueled with LPG”, **8th International Combustion Symposium**, Ankara, July 17-18 2002.
24. Polat, İ., Yücel, N., ve Dinler, N., “Bir Benzinli Motorun LPG ile Çalışabilecek Şekilde Dönüşümü yapılarak Performans ve Emisyon Davranışlarının İncelenmesi”, **12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi**, Sakarya, Şubat, 2000.
25. Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., **Yanma Bilgisi**, 92-94, 1966, Ankara.
26. Borat, O., Balcı, M., ve Sürmen, A., **İçten Yanmalı Motorlar**, 18-10, 2000, Ankara.
27. ASME Standards., “Measurement of Fluid Flow in Pipe Using Orifice, Nozzle and Venture”, **MCF-3M**, USA, 1984.
28. TOFAŞ A.Ş., **DKS Otomobil Katalogu**, 13, İstanbul, 1999.
29. TÜPRAŞ A.Ş., **Yakıt Özellikleri Test Sonuç Tablosu**, İzmit, 1996.
30. Thring, R, H., **Alternative Fuels for Spark Ignition Engines**, SAE paper, 972970, 1997.
31. Soruşbay, C., **İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Emisyonları**, İTÜ Makine Fakültesi Ders Notları, İstanbul, 1999.
32. Kutlar, A., Ergeneman, M., ve Arslan, H., **İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz Emisyonları**, Birsen Yayınevi, s.38-40, İstanbul, 1998.
33. Dülger, Z., **İçten Yanmalı Motorlar**, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No.11, s. 28.29, Kocaeli, 1999.
34. Kodah, Z., ve Soliman, S., “Combustion in a Spark Ignition Engine”, **Applied Energy**, 66, 237-250, 2000.