

# ÇİFT YAKIT ENJEKSİYONLU BUJİ ATEŞLEMELİ BİR MOTORDA LPG KULLANIM ORANININ PERFORMANS VE EMİSYON KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

**Metin GÜMÜŞ**

Makine Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Marmara Üniversitesi, 34722, Göztepe, İstanbul  
[mgumus@marmara.edu.tr](mailto:mgumus@marmara.edu.tr)

(Geliş/Received: 26.09.2008 ; Kabul/Accepted: 25.12.2008)

## ÖZET

Bu çalışmada, benzin ve LPG enjeksiyon sistemine sahip buji ateşlemeli bir motorda LPG kullanım oranının motor performansı, emisyonlar ve yakıt ekonomisine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla dört silindirli buji ateşlemeli motora sahip bir taşıt çift yakıt ile çalışabilecek şekilde modifiye edilmiştir. Çift yakıtlı çalışmada püskürtülen yakıt miktarları aynı ısı değerlerinin elde edilebilmesine göre hesaplanmıştır. Deneyler taşıt dinamometresinde, farklı LPG kullanım oranlarında (ısı değer olarak %0, %25, %50, %75, %100), sabit devirde (3800 d/d) ve değişik motor yüklerinde (%5, %30, %60, %90) gerçekleştirilmiştir. Deneyler tüm LPG kullanım oranlarında egzoz emisyonları ve yakıt ekonomisi açısından benzine göre olumlu sonuçlar vermiştir. Motor performansı açısından ise yalnız %25 LPG kullanım oranında olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif yakıtlar, çift yakıt, LPG, benzin, motor performansı, emisyonlar.

## THE EFFECT OF LPG USING RATIO ON PERFORMANCE AND EMISSION CHARACTERISTICS IN A SPARK IGNITION ENGINE WITH DUAL FUEL INJECTION

### ABSTRACT

In this study, the effect of LPG using ratio on engine performance, emissions and fuel economy in a spark ignition engine with gasoline and LPG injection systems was investigated. For this purpose, a vehicle has four cylinder spark ignition engine was modified to able to operate with dual fuel. Amount of injection fuels were calculated to obtain same heat value in the dual fuels operation. Experiments were applied in the vehicle dynamometer at different LPG using ratios (as heat value 0%, 25%, 50%, 75%, 100%), constant revolution (3800 d/d) and different load ratios (5%, 30%, 60%, 90%). Experiments gave affirmative results with regard to exhaust emissions and fuel economy at all LPG using ratios. However, positive results were only obtained at 25% LPG using ratio with respect to engine performance.

**Keywords:** Alternative fuels, dual fuel, LPG, gasoline, engine performance, emissions.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sektöründeki alternatif enerji kaynağı arayışları sıvılaştırılmış petrol gazının (LPG), insan yaşamında vazgeçilmez bir öneme sahip olan taşıtlarda alternatif yakıt olarak kullanımını gündeme getirmiştir. Alternatif yakıtların, mevcut teknolojide önemli bir yapısal değişiklik gerektirmeden, doğrudan kullanılabilirleri tercih edilmelerindeki en önemli faktörlerdendir. LPG'nin bu özelliğe sahip olmasıyla birlikte kolay bulunması, ekonomik olması, diğer

yakıtlara göre egzoz emisyonlarının düşük ve oktan sayısının yüksek olması içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanımını cazip hale getirmektedir. LPG'nin içten yanmalı motorlarda kullanımına yönelik çok farklı yöntemler denenmekte ve bunlarla ilgili araştırmalar sürdürülmektedir.

LPG'nin benzine benzer özellikleri sayesinde, buji ateşlemeli motorlara sahip taşıtlarda önemli değişiklikler gerektirmeden kullanılabilir. Bu nedenle LPG ile ilgili araştırmalar buji ateşlemeli motorlar

üzerinde yoğunlaşmıştır. Smith ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan çalışmada 1,4 litrelik bir motorda LPG ve benzin yakıtları kullanarak emisyon ve verimlilik bakımından karşılaştırma yapılmıştır. LPG ile çalışmada HC emisyonlarının benzine göre daha düşük çıktığı, CO emisyonunun ise motor devrine göre farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir [1]. İcingür ve Haksever (1998), buji ateşlemeli bir motorda LPG yakıtın motor karakteristiklerine etkisini incelemiştir. LPG kullanımında motorun maksimum moment ve egzoz emisyonu değerlerinin benzinli motor değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir [2]. Dinler ve Yücel (2003) iki farklı motorda LPG ve benzinli çalışmanın motor performansına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. LPG ile çalışmada benzinli çalışmaya göre motor momentinde %1,5 ve %8 azalma olmuştur [3]. Murillo ve arkadaşlarının (2005) yapmış olduğu çalışmada buji ateşlemeli bir motorda LPG kullanımında benzinli çalışmaya göre önemli bir güç kaybı olmaksızın özgül yakıt tüketiminde, CO ve HC emisyonlarında önemli düşüşler elde edilmiştir. NO<sub>x</sub> emisyonunda ise yükselme meydana gelmiştir [4]. LPG'nin benzine göre daha yüksek oktan sayısına sahip olması, buji ateşlemeli motorlarda daha yüksek sıkıştırma oranlarında kullanılabilmesine olanak vermektedir. Kim ve Bae (2000) dört silindirli buji ateşlemeli motorda LPG ve doğal gaz kullanımının değişik çalışma koşullarında, 8,6:1 ve 10,6:1 sıkıştırma oranında performans ve HC emisyonlarına etkilerini incelemiştir. Yüksek sıkıştırma oranında fakir karışımla çalışma ile her iki yakıtta da motor veriminin arttığı, NO<sub>x</sub> ve CO<sub>2</sub> emisyonunun azaldığı ve bazı HC türlerinde artma olduğunu tespit etmişlerdir [5]. Akbaş ve arkadaşları (2003) tarafından yapılan çalışmada LPG ile çalışan buji ile ateşlemeli bir motorun sıkıştırma oranı artırılarak özgül yakıt tüketimi ve motor gücüne etkileri araştırılmıştır. Sıkıştırma oranının 9,5:1'den 13:1'e artışıyla birlikte yakıt tüketiminde ortalama %12 azalma, motor gücünde yaklaşık %7 artış elde edilmiştir [6]. Çelik ve Balki (2007) tarafından yapılan çalışmada, tek silindirli bir motorun sıkıştırma oranı 5:1'den 9:1'e artırılmış ve LPG ile çalıştırılarak performansını artırma olanakları deneysel olarak araştırılmıştır. Sonuçlar; düşük güçlü motorlarda yüksek sıkıştırma oranında LPG kullanımının, motor performansını önemli ölçüde arttırdığını ve egzoz emisyonlarını azalttığını göstermektedir [7]. Sayın ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan çalışmada benzin ve çift yakıt (%90 benzin+%10 LPG) kullanımının emisyon ve performans parametreleri üzerine etkisi incelenmiştir. Çift yakıtlı çalışma ile özgül yakıt tüketiminde %4, CO'da %13, HC emisyonlarında %5 azalma sağlanmıştır [8]. Ayrıca buji ateşlemeli motorlarda silindir içerisine direkt yakıt püskürtme teknolojisinin gelişmesiyle birlikte LPG'nin sıvı fazda püskürtülmesiyle ilgili çalışmalar da yaygınlaşmıştır [9-12].

LPG dönüşümü yapılan bir taşıt, istendiğinde LPG veya benzin ile çalıştırılabilmektedir. Ancak uzun bir

süre park edilen ve ortam sıcaklığına ulaşan benzin enjeksiyonlu taşıt motorunun soğuk çalıştırılmasında, regülatörde meydana gelen buzlanma nedeniyle LPG kullanımına hemen geçilememekte, LPG regülatörü çalışma sıcaklığına gelene kadar bir müddet benzin ile çalışma gerekmektedir. Isınma süresinin tamamlanmasından sonra benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına direkt geçiş yapılmaktadır. Bu direkt geçiş esnasında motorun yanma karakteristiğinin değişmesi ve motorun bu değişime uyum sağlamasında meydana gelen gecikme motorda sarsıntılar oluşturabilmektedir. Bu olumsuzlukların giderilmesinde kullanılan yöntemlerden biri; benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına geçişin kademeli yapılmasıdır.

Yukarıda verilen literatür özetinden de görüldüğü gibi, benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına kademeli geçişi ve farklı LPG kullanım oranlarının, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisini inceleyen çalışmalara açık literatürde rastlanılmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmada, benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına kademeli geçişi sağlayan sistemle, farklı LPG kullanım oranlarının, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Öncelikle deneylerin uygulanması için deney aracına LPG dönüşüm sistemi montajı yapılmıştır. Taşıt motorunun LPG yakıtının kullanımına kademeli geçebilmesi ve çift yakıt kullanımını sağlayabilmesi için dönüşüm sisteminin donanımında ve yazılımında gerekli revizyonlar yapılmıştır. Deneyler taşıt dinamometresi üzerinde farklı motor yüklerinde ve ısı değerleri olarak farklı LPG kullanım oranlarında (%0LPG+%100Benzin, %25LPG+%75Benzin, %50LPG+%50Benzin, %75LPG+%75Benzin, %100LPG+%0Benzin) yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir.

### 1.1. LPG Dönüşüm Sistemleri (LPG Conversion Systems)

Dünyada genel olarak, LPG'nin araçlarda kullanımının sağlanmasında sadece LPG yakıtı ile çalışan araç üretiminden ziyade araçların LPG sistemine dönüştürülmesi yoluna gidilmektedir. Araçlara LPG sistemlerinin montajı sadece bazı özel parçaların sisteme ilave edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Aracın mevcut yakıt ve ateşleme sistemi aynen muhafaza edilmektedir. Dönüşüm işleminde kullanılan malzemeler, dönüştürülecek taşıtın sahip olduğu yakıt sistemine bağlı olarak değişmektedir. Karbüratörlü sistemlerde çok basit ekipmanlar kullanılırken, sıralı enjeksiyonlu sistemlerde elektronik kontrol ünitesi, enjektör gibi karmaşık ekipmanlar kullanılmaktadır [13]. Çok noktalı LPG püskürtme sistemlerine sahip günümüz taşıt motorlarında püskürtme yöntemi olarak sıralı kesikli püskürtme yöntemi en yaygın yöntem olarak uygulanmaktadır [14].

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deney Taşıtı ve Motorunun Özellikleri (Experimental Vehicle and Engine Properties)

Deneylerde 2000 model Renault Clio 1,4i RTA markalı taşıt kullanılmıştır. Deney taşıtının ve taşıt üzerinde bulunan motorun teknik özellikleri Tablo 1 ve 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deney taşıtının teknik özellikleri (Technical properties of experimental vehicle)

Marka ve model	Renault Clio, 1,4i, 2000
Net ağırlık	960 kg
Boyutlar	3773/1639/1428 mm
Aktarma	Önden çekişli
Şanzıman	5 ileri manuel
Depo hacmi	50 dm <sup>3</sup>

**Tablo 2.** Deney motorunun teknik özellikleri (Technical properties of experimental engine)

Motor tipi	Üstten eksantrikli, 8 valflü
Ateşleme sırası	1-3-4-2
Silindir çapı	75,8 mm
Silindir stroku	77 mm
Piston süpürme hacmi	1390 cm <sup>3</sup>
Sıkıştırma oranı	9,5:1
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Max. motor devri	5950 d/d
Max. motor gücü	55 kW (5500 d/d)
Max. motor momenti	114 N.m (4250 d/d)
Yakıt sistemi	Enjeksiyonlu
Ortalama yakıt tüketimi	7,1 dm <sup>3</sup> /100 km

### 2.2. Egzoz Emisyonu Cihazı (Exhaust Emission Device)

Egzoz emisyonlarının (CO<sub>2</sub>, CO, HC) ölçümünde BİLSA marka emisyon cihazı kullanılmıştır. Cihazın CO<sub>2</sub>, CO ve HC için ölçüm aralığı sırasıyla % 0 – 20, % 0 – 10 ve 0 – 10.000 ppm dir. Hata payları ise sırasıyla ±0,01, ±0,01 ve ±1 ppm’dir.

### 2.3. Taşıt Test Dinamometresi (Vehicle Test Dynamometer)

Taşıt testleri CARTEC marka LPS 2020 kodlu şasi dinamometresinde yapılmıştır. Şasi dinamometresinin teknik özellikleri Tablo 3’te verilmiştir. Şekil 1’de deney ortamından bir görünüm verilmiştir.

### 2.4. Deney Yakıtlarının Özellikleri (Experimental Fuel Properties)

Bu çalışmada kullanılan LPG %50 propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) ile %50 oranında Bütan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) karışımından oluşmaktadır. Deneylerde kullanılan LPG (propan ve bütan) ve benzinin önemli özellikleri Tablo 4’te verilmiştir.

**Tablo 3.** Taşıt dinamometresinin teknik özellikleri (Technical properties of vehicle dynamometer)

Teknik Özellikleri	Birim	Değer
Maximum test hızı	Km/h	260
Kullanım sıcaklığı	°C	0-50
Maximum frenleme gücü	kW	260
Güç kaynağı	AC/V	400
Frekans	Hz	50
Hava kaynağı	Bar	7
Boyutlar	m	3,27x1x0,65
Tambur çapı	mm	320
Tambur genişliği	mm	490
Max. kaldırma kapasitesi	t	2
Max. aks yükü	t	3,5

**Tablo 4.** Deney yakıtlarının özellikleri (Specification of experimental fuels)

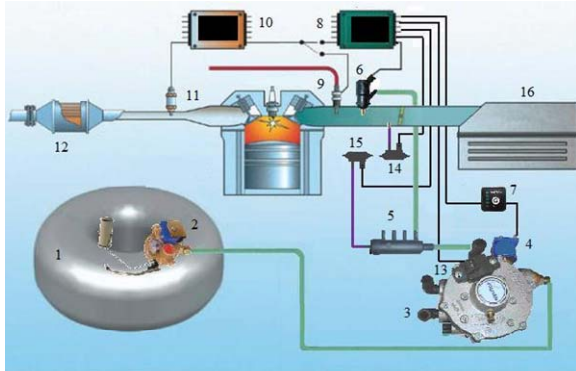
Özellikler	Benzin	Propan	Bütan
Özgül Kütle (kg/m <sup>3</sup> )	765	509	585
Alt Isıl Değer (MJ/kg)	44,04	46,34	45,56
Kaynama Noktası (°C)	30-225	-42	-0,5
Tutuşma Noktası (°C)	257	510	490
Yanma Hızı (m/s)	0,35	0,4	0,4
Hava Yakıt Oranı	14,7	15,8	15,6
Tutuşma sınırları (Hacimsel %)	1,3-7,6	2,1-9,5	1,5-8,5
Araş. Oktan Sayısı	95	111	103
Motor Oktan Sayısı	85	97	89

### 2.5. Çalışmada Kullanılan Sıralı Yakıt Enjeksiyon Sistemi (Sequential Fuel Injection System Used in This Study)

Bu çalışmada, Üçyıldız Otomotiv firmasının üretmekte olduğu Voltran marka çok noktalı, sıralı LPG enjeksiyon sistemi kullanılmıştır. Sistem, bir regülatör vasıtasıyla LPG’yi sıvı halden gaz haline dönüştürerek basıncını ayarlamakta ve enjektörler vasıtasıyla emme manifolduna püskürtmektedir. Sistemdeki LPG püskürtme sırası ve zamanlaması, elektronik kontrol ünitesi (EKÜ) tarafından kumanda edilmektedir. Püskürtme zamanlaması aracın orijinal kontrol ünitesinin benzin enjeksiyon zamanlamasından faydalanılarak belirlenmektedir. Şekil 2’de bu çalışmada kullanılan Voltran SGI sisteminin şematik yapısı gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Deney ortamından bir görünüm (A view of experimental surroundings)



1.LPG tankı, 2.Multivalf, 3.Regülatör, 4.Elektrovalf, 5.LPG enjeksiyon hattı, 6.LPG enjektörü, 7.Yakıt seçme anahtarı, 8.LPG EKÜ'sü, 9. Benzin enjektörü, 10.Benzin EKÜ'sü, 11.Lambda sensörü, 12. Katalitik konvertör, 13.Sıcaklık sensörü, 14.Vakum sensörü, 15.Basınç sensörü, 16. Hava filtresi

**Şekil 2.** Bu çalışmada kullanılan Voltran SGI çok noktalı, sıralı LPG enjeksiyon sistemi (Voltran SGI Multi point, sequential LPG injection systems used in this study)

## 2.6. Deneysel Prosedürü (Procedure of Experiment)

Taşıt motorunun benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına kademeli geçişi yapılabilmesi ve çift yakıt kullanılmasının sağlanabilmesi için dönüşüm sisteminin donanımında ve yazılımında gerekli değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler üç yıldız otomotiv şirketinin desteğiyle yapılmıştır. Dönüşüm sistemi motorun işletme şartlarına bağlı olarak tüketilen benzin miktarını ölçmekte ve tamamen LPG kullanımına geçene kadar benzin miktarında kademeli olarak azaltma yapmaktadır.

Taşıt dinamometresinde deneyler, sabit devirde (4. vites, 3800 d/d) ve farklı yük şartlarında gerçekleştirilmiştir. Taşıt motoru maksimum momentin %90'ı oranında yüklenmiştir. Isıl değer olarak LPG kullanım oranları %0 (%100 benzin), %25, %50, %75, %100 olmak üzere beş farklı değerde ayarlanmıştır. Tüm LPG kullanım oranlarında %5, %30, %60 ve %90 yük oranları için ölçümler alınmıştır. Her kademedeki yüklemelerde, yakıt tüketiminin belirlenmesi için enjektörlerin açık kalma zamanları ve egzoz emisyonları ( $\text{CO}_2$ , CO ve HC) ölçülmüştür. Özgül yakıt tüketimi, özgül enerji tüketimi ve efektif verim ölçülen parametrelerden yararlanarak hesaplanmıştır. Çalışmanın diğer bölümlerinde kullanılacak olan "yakıt kullanım oranı" ifadesinde, yakıtların ısıl değer oranları kastedilecektir.

## 2.7. Yakıt Tüketimi Ölçüm Metodu (Method of Measurement of Fuel Consumption)

Bu çalışmada yakıt tüketimlerinin belirlenmesinde benzin ve LPG enjektörlerinin püskürtme sürelerinin tespiti yöntemi kullanılmıştır. Benzin ve LPG enjektörlerinin sabit basınç altında püskürtme sürelerinin belirlenebilmesi durumunda enjektörlerin yakıt debilerinin tespiti mümkün olabilmektedir. Dolayısıyla motorun yakıt tüketimi bütün enjektörlerin yakıt debilerinin toplamıyla belirlenebilmektedir.

Enjektörlere verilen elektriksel sinyallerle bu sinyallere karşılık beklenen mekanik davranışlar aynı olmamaktadır. Enjektörlerde açılma ve kapanma gecikmeleri oluşmaktadır. Bu durum gaz enjektörlerinde daha belirgin oluşmaktadır. Bu nedenle enjektörlerin açma sinyalleriyle debisi arasındaki değişim deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değişim enjektörlerden beklendiği gibi lineer olmuştur. Motorda kullanılan benzin ve LPG enjektörlerinin sinyal sürelerine bağlı olarak bir tetiklemede püskürtülen yakıt miktarlarının değişimi sırasıyla

$$\bar{V}_b = a_b t_b - b_b \quad (1)$$

$$\bar{V}_{lpg} = a_{lpg} t_{lpg} - b_{lpg} \quad (2)$$

ampirik bağıntılarıyla belirlenmiştir. Enjektörlerin (1) ve (2) nolu denklemle ifade edilen lineer davranışları dört enjektörün ortalama değerleriyle belirlenmiştir. Deneysel verilerinden denklemlerde belirtilen katsayıların bulunmasıyla denklemler

$$\bar{V}_b = 5,52t_b - 3,287 \quad (3)$$

$$\bar{V}_{lpg} = 1,77t_{lpg} - 4,594 \quad (4)$$

şeklini almıştır. Bu ampirik denklemlerde;  $\bar{V}_b$  ve  $\bar{V}_{lpg}$  bir tetiklemede püskürtülen benzin ve LPG yakıt miktarlarını göstermekte ve birimleri [ $\text{cm}^3/\text{çevrim}$ ] dir.  $t_b$  ve  $t_{lpg}$  ise bir tetiklemedeki benzin ve LPG yakıt püskürtme süreleridir birimleri ise [ $\text{ms}$ ] dir.

Enjektörler uyarıldıklarından itibaren belirli bir gecikmeyle açılırlar. LPG enjektörlerinin açılma gecikmeleri benzin enjektörlerine göre daha yüksek olmaktadır ve birbirlerine göre farklılıklar göstermektedirler. Bu çalışmada kullanılan LPG enjektörlerin açılma gecikmeleri 3 ms olarak ayarlanmıştır. Benzin enjektörlerin açılma gecikmeleri ise 1 ms dir.

## 2.8. Yakıt Miktarlarının Belirlenmesi (Determination of Fuel Quantity)

LPG kullanım miktarı, kullanılan benzin miktarına ve benzinde yapılan eksiltmeye göre belirlenmektedir. Benzin miktarının belirlenmesi için taşıt motoru %100 benzinde çalışırken enjektörlerin açık kalma sürelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Benzinde yapılan eksiltmeler ise %25, %50, %75 ve %100 oranlarında olmak üzere dört kademe yapılmıştır. Benzin yakıtının kütsel debisi, yakıtın yoğunluğu ve hacimsel debisi cinsinden

$$\dot{m}_b = \rho_{b,s} \dot{V}_b \quad (5)$$

şeklinde yazılabilir. Motorun benzin yakıtının hacimsel debisi, bir enjektörün bir çevrimde

püskürttüğü hacimsel yakıt miktarının,  $\bar{V}_b$  bilinmesi durumunda

$$\dot{V}_b = is \frac{n}{60} \bar{V}_b \quad (6)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Bu bağıntıda  $S$  silindir sayısını (enjektör sayısı),  $n$  motor devrini göstermektedir.  $i$  dört zamanlı motorlar için 0,5, iki zamanlı motorlar için 1 alınmaktadır. (6) nolu denklemin (5) nolu denklemde yerine konulmasında benzin yakıtının kütleli debisi

$$\dot{m}_b = \rho_{b,s} is \frac{n}{60} \bar{V}_b \quad (7)$$

olarak bulunur. Enjektörün açık kalma süresine bağlı olarak enjektörün bir çevrimdeki hacimsel debisini veren (1) nolu ampirik denklemin kullanılmasıyla

$$\dot{m}_b = \rho_{b,s} is \frac{n}{60} (a_b t_b - b_b) \quad (8)$$

bağıntısı bulunur. Bu bağıntıdan enjektör açık kalma süresi çekilir

$$t_b = \frac{1}{a_b} \left( b_b + \frac{60 \dot{m}_b}{\rho_{b,s} is n} \right) \quad (9)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede,  $\alpha$  benzin eksiltme oranı olmak üzere

$$\dot{m}_{b,e} = (1 - \alpha) \dot{m}_b \quad (10)$$

şeklinde tanımlanan eksiltmiş benzin yakıtının kullanılmasıyla, eksiltmiş benzin miktarının temini için benzin enjektörünün açık kalma süresi

$$t_{b,e} = \frac{1}{a_b} \left( b_b + \frac{60 \dot{m}_{b,e}}{\rho_{b,s} is n} \right) \quad (11)$$

bağıntısıyla bulunur.

LPG kullanım miktarının tayini, performans kaybının önlenmesi amacıyla eksiltmiş benzinin ısı değerine eşdeğer LPG miktarının belirlenmesiyle yapılmıştır. Buna göre

$$\dot{m}_{lpg} (LHV)_{lpg} = \alpha \dot{m}_b (LHV)_b \quad (12)$$

ve

$$\dot{m}_{lpg} = \alpha \dot{m}_b \frac{(LHV)_b}{(LHV)_{lpg}} \quad (13)$$

ifadeleri yazılabilir. Bu bağıntılarda  $(LHV)$  yakıtların alt ısı değerlerini göstermektedir. LPG enjektörünün açık kalma süresinin belirlenebilmesi için yakıtların kütleli debileri, yakıtın yoğunluğu ve hacimsel debileri cinsinden yazılacak olursa

$$\dot{V}_{lpg} \rho_{lpg,g} (LHV)_{lpg} = \alpha \dot{V}_b \rho_{b,s} (LHV)_b \quad (14)$$

ifadesi elde edilir. Gazların yoğunluklarının sıcaklığa bağlı olarak yüksek oranda değişmesinden dolayı bu bağıntıdaki LPG yoğunluğu LPG yakıt hattının sıcaklığına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Bu denklemden LPG yakıtının hacimsel debisi çekilerek

$$\dot{V}_{lpg} = \alpha \dot{V}_b \frac{\rho_{b,s} (LHV)_b}{\rho_{lpg,g} (LHV)_{lpg}} \quad (15)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı enjektörlerin bir çevrimde püskürttüğü hacimsel yakıt miktarları cinsinden yeniden

$$\bar{V}_{lpg} = \alpha \bar{V}_b \frac{\rho_{b,s} (LHV)_b}{\rho_{lpg,g} (LHV)_{lpg}} \quad (16)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifade de bir çevrimde püskürtülen hacimsel yakıt miktarlarını veren (1) ve (2) nolu ampirik denklemlerin kullanılmasıyla LPG enjektörünün açık kalma süresi

$$t_{lpg} = \frac{1}{a_{lpg}} \left[ b_{lpg} + \alpha (a_b t_b - b_b) \frac{\rho_{b,s} (LHV)_b}{\rho_{lpg,g} (LHV)_{lpg}} \right] \quad (17)$$

şeklinde bulunur. LPG enjektörünün açık kalma süresi bilinmesi durumunda LPG yakıtının kütleli debisi (8) denkleminde benzer olarak

$$\dot{m}_{lpg} = \rho_{lpg,g} is \frac{n}{60} (a_{lpg} t_{lpg} - b_{lpg}) \quad (18)$$

bağıntısıyla bulunur.

## 2.9. Performans Parametrelerinin ve Özgül Yakıt Maliyetin Belirlenmesi (Determination of Performance Parameters and Specific Fuel Cost)

Efektif verim,

$$\eta_e = \frac{P_e}{\dot{m}_{lpg} (LHV)_{lpg} + \dot{m}_{b,e} (LHV)_b} \quad (19)$$

Özgül yakıt tüketimi,

$$b_e = 3,6 \cdot 10^6 \frac{\dot{m}_{lpg} + \dot{m}_{b,e}}{P_e} \quad (20)$$

Özgül enerji tüketimi,

$$\epsilon_e = 3600 \frac{\dot{m}_{lpg}(LHV)_{lpg} + \dot{m}_{b,e}(LHV)_b}{P_e} \quad (21)$$

bağıntılarıyla belirlenmiştir.

Özgül yakıt maliyet ise,  $M_{lpg}$  ve  $M_b$  sırasıyla LPG ve benzinin bir kilogramının YTL cinsinden maliyeti olmak üzere

$$\epsilon_e = 3600 \frac{\dot{m}_{lpg}M_{lpg} + \dot{m}_{b,e}M_b}{P_e} \quad (22)$$

bağıntısıyla belirlenmiştir.

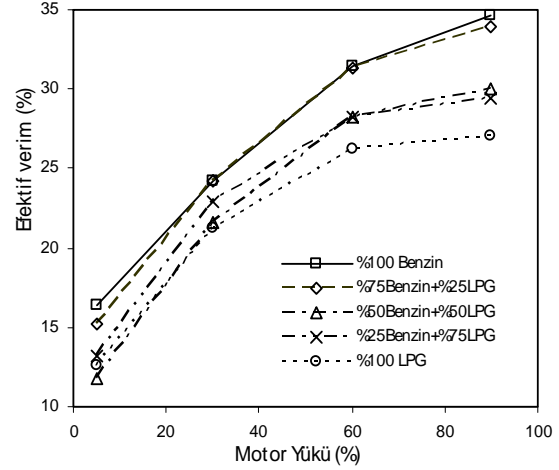
Bu bağıntılardaki değişkenler (8), (10) ve (18) denklemlerinin kullanımıyla her farklı deney koşulu için ayrı ayrı belirlenmiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Motor Performansı (Engine Performance)

Benzin ve LPG yakıtlarını birlikte ve ayrı ayrı kullanabilecek şekilde dönüşümü yapılmış deney aracında soğuk çalışma koşullarında, ısınma süresinin tamamlanmasından sonra benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına geçişin kademeli yapılması, motorun bu değişime uyum sağlamasını sağlamış ve motorda meydana gelen sarsıntılar hissedilmeyecek kadar azalmıştır.

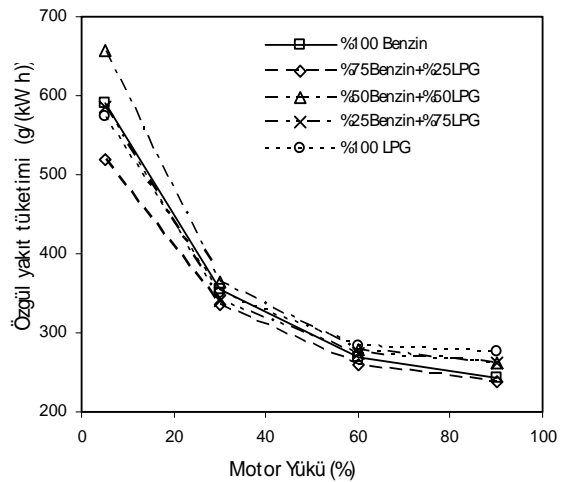
Performans ve emisyon deneyleri, taşıt dinamometresi üzerinde farklı motor yüklerinde ve farklı LPG kullanım oranlarında (%0LPG+%100Benzin, %25LPG+%75Benzin, %50LPG+%50Benzin, %75LPG+%25Benzin, %100LPG+%0Benzin) gerçekleştirilmiştir. Motor efektif verimin motor yüküne göre değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Motor efektif verimi, motor yükünün artmasıyla artış gösterirken LPG kullanım oranının artmasıyla azalma göstermiştir. LPG kullanımında efektif verimde meydana gelen bu azalmanın en önemli nedeni olarak LPG kullanımında volumetrik verimin azalması gösterilebilir[15]. Maksimum motor efektif verimi yalnız benzin kullanımında 34,59 olarak elde edilmiştir. Yalnız LPG kullanımında %90 yükleme oranında, minimum motor efektif verimi ise 27,09 olarak elde edilmiştir. %25 LPG, %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında motor efektif veriminde ortalama olarak sırasıyla %2, %14,1 %12,2 ve %18,2 azalma meydana gelmiştir. %25 LPG oranına sahip karışımın kullanımında motor efektif veriminde çok düşük bir azalma meydana gelmiştir. Düşük LPG kullanım oranlarında, LPG kullanımıyla karışımın daha homojen olması yanma verimini artırmakta ve LPG



Şekil 3. Efektif verimin motor yüküne göre değişimi (Variation of brake thermal efficiency with respect to engine load)

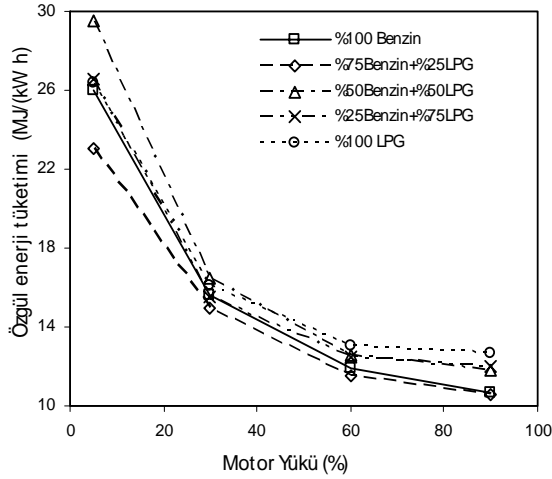
kullanımından kaynaklanan volumetrik verimdeki ufak azalmanın etkisi telafi edilebilmektedir.

Özgül yakıt tüketiminin motor yüküne göre değişimi Şekil 4'te gösterilmiştir. Özgül yakıt tüketimi, motor yükünün artmasıyla genel olarak azalmıştır. %25 LPG oranına sahip karışımın kullanımında özgül yakıt tüketimi minimum olmuştur. LPG nin ısıl değerinin yüksek olması ve yanma verimi üzerindeki olumlu etkisi bu sonucun oluşumunda en belirgin faktörlerdir. Bundan sonraki LPG kullanım oranının artmasında ise özgül yakıt tüketimi genel olarak artma göstermiştir. Düşük yüklerde maksimum yakıt tüketimini %50 benzin %50 LPG karışımı gösterirken, yüksek yüklerde ise %100 LPG yakıtı göstermiştir. %25 LPG içeren karışımın kullanımında özgül yakıt tüketiminde ortalama olarak %7,1 azalma meydana gelmiştir. %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında özgül yakıt tüketiminde ortalama olarak sırasıyla %7,3, %0,4 ve %1,8 artma meydana gelmiştir.



Şekil 4. Özgül yakıt tüketiminin motor yüküne göre değişimi (Variation of brake specific fuel consumption with respect to engine load)

Şekil 5'te özgül enerji tüketiminin motor yüküne göre değişimi gösterilmiştir. Özgül enerji tüketimi, bir saat boyunca bir kilowatt güç üretmek için motora girmesi gereken enerji miktarını göstermektedir. Yakıtın debisini ve ısı değerini bir arada değerlendirmesinden dolayı efektif verimle karşılaştırılabilecek önemli bir parametredir[16]. Bu çalışmada, karışımların hem debileri hem de ısı değerleri farklı olmasından dolayı karşılaştırmanın özgül yakıt tüketimi yerine özgül enerji tüketimine göre yapılması, daha anlamlıdır.

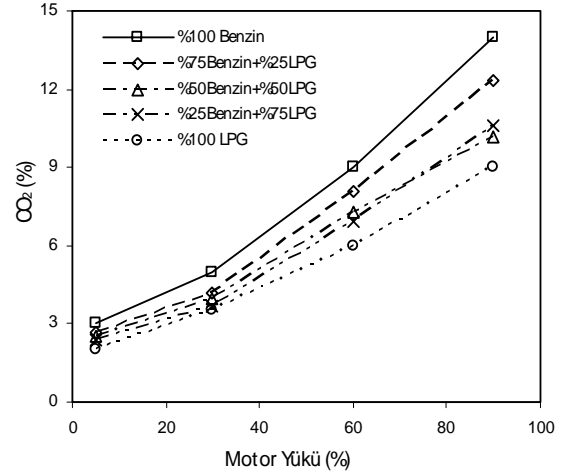


Şekil 5. Özgül enerji tüketiminin motor yüküne göre değişimi (Variation of brake specific energy consumption with respect to engine load)

Şekil 5'te görüldüğü üzere özgül enerji tüketimi özgül yakıt tüketimiyle benzer eğilim göstermiş ancak eğriler arasındaki açıklıklar belirginleşmiştir. %25 LPG içeren karışımın kullanımında özgül enerji tüketiminde ortalama olarak %6,2 azalma meydana gelmiştir. %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında özgül enerji tüketiminde ortalama olarak sırasıyla %9,7, %3,7 ve %6,3 artma meydana gelmiştir. %25 LPG oranına sahip karışımın kullanımında özgül enerji tüketimi minimum olmuştur. Ancak LPG'nin ısı değerinin yüksek olmasından dolayı özgül enerji tüketimine göre benzinle olan fark azalmıştır. Özgül yakıt tüketimine benzer olarak, düşük yüklerde maksimum enerji tüketimini %50 benzin %50 LPG karışımı gösterirken, yüksek yüklerde ise %100 LPG yakıtı göstermiştir.

### 3.2. Egzoz Emisyonları (Exhaust Emissions)

Karbondioksit emisyonlarının sera etkisiyle küresel ısınmaya neden olması nedeniyle, karbondioksit emisyonlarının oluşumunu sağlayan karbon atomlarının kullanılan yakıt içerisinde olmaması veya düşük oranda olması istenmektedir. LPG yakıtının karbon hidrojen oranı benzindeki orana göre daha az olması karbondioksit emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır[3]. Karbondioksit emisyonlarının motor yüküne göre değişimi Şekil 6'da gösterilmiştir. Motor yükü-

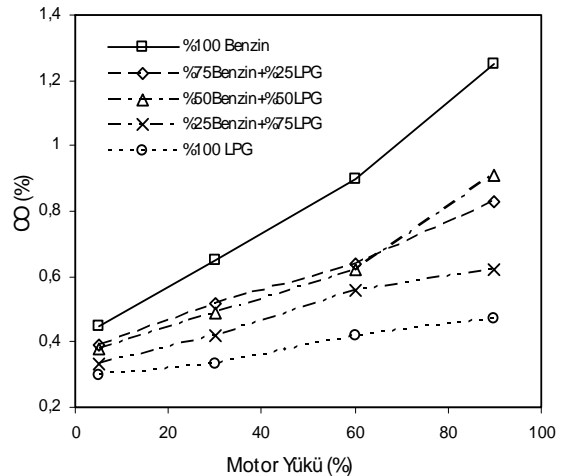


Şekil 6. CO<sub>2</sub> emisyonlarının motor yüküne göre değişimi (Variation of CO<sub>2</sub> emissions with respect to engine load)

nün artmasıyla birlikte karbondioksit emisyonları, hava yakıt karışım debisinin artmasından dolayı artmaktadır. LPG kullanım oranının artmasıyla ise karbondioksit emisyonları azalmaktadır. %25 LPG, %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında karbondioksit emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla %11,9, %22,6, %23,9 ve %33,9 azalma meydana gelmiştir.

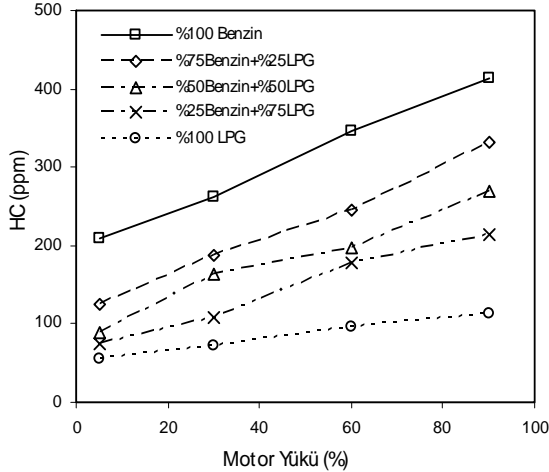
Karbonmonoksit emisyonlarının motor yüküne göre değişimi Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi LPG kullanım oranının artmasıyla karbonmonoksit emisyonları azalmaktadır. Bunun nedeni, LPG yakıtının karbon hidrojen oranının düşük olması ve gaz fazındaki LPG'nin havayla homojen bir şekilde karışarak verimli yanmasıdır. %25 LPG, %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında karbonmonoksit emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla %26,8, %26,2, %40,7 ve %53,3 azalma meydana gelmiştir.

Egzoz gazları içerisindeki hidrokarbonun bulunması,



Şekil 7. CO emisyonunun motor yüküne göre değişimi (Variation of CO emissions with respect to engine load)

yakıtın tam olarak yakılamadığını gösterir. Hidrokarbon oluşumunun ana nedeni sıcaklıkların yada oksijenin yetersiz olması veya karışımın homojen karışmaması sonucu yanmanın tamamlanamamasıdır [17]. Şekil 8'de hidrokarbon emisyonlarının motor yüküne göre değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi LPG kullanım oranının artmasıyla hidrokarbon emisyonları azalmaktadır.

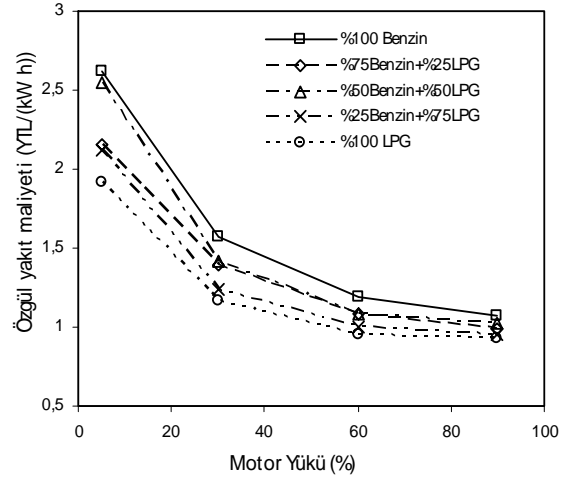


Şekil 8. HC emisyonunun motor yüküne göre değişimi (Variation of HC emissions with respect to engine load)

LPG kullanımının artışıyla karışımın daha homojen hale gelmesinden dolayı yanma iyileşmekte ve HC emisyonunda azalma meydana gelmektedir. Motor yükünün artmasıyla birlikte hidrokarbon emisyonları, karışımın zenginleşmesinden dolayı artmaktadır. %25 LPG, %50 LPG, %75 LPG içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında hidrokarbon emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla %27,7 %41,4 %53,1 ve %72,6 azalma meydana gelmiştir.

### 3.3. Yakıt Ekonomisi (Fuel Economy)

LPG yakıtının içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanım nedenlerinden birisi de yakıt ekonomisi sağlamasıdır. LPG yakıtı dünya genelinde benzin yakıtından daha ucuz olarak arz edilmektedir. Şekil 9'da özgül yakıt maliyetinin motor yüküne göre değişimi gösterilmiştir. Özgül yakıt maliyeti, bir saat boyunca bir kilowatt güç üretmek için kullanılan yakıtın YTL cinsinden maliyetini göstermektedir. (22) nolu bağıntıyla tanımlanan özgül yakıt maliyeti, yakıtın motorda kullanım verimliliğini ve maliyetini bir arada değerlendirmesinden dolayı önemli bir parametredir. Şekil 9'da görüldüğü üzere özgül yakıt maliyeti, özgül yakıt ve özgül enerji tüketimleriyle benzer trend göstermektedir. Bu değişimlerin belirlenmesinde benzin ve LPG yakıtlarının bir kilogram fiyatları sırasıyla 4,43 ve 3,35 YTL olarak alınmıştır. LPG'nin daha ucuz olmasından dolayı LPG'nin kullanım oranının artmasıyla birlikte özgül yakıt maliyeti genel olarak azalmaktadır. %25 LPG, %50 LPG, %75 LPG, içeren karışımların ve %100 LPG'nin kullanımında



Şekil 9. Özgül yakıt maliyetinin motor yüküne göre değişimi (Variation of specific fuel cost with respect to engine load)

özgül yakıt maliyetinde sırasıyla %12,8, %5,8, %18, %23 azalma sağlanmaktadır. %50 LPG içeren karışımın sağladığı yakıt ekonomisinin düşük olması nedeniyle bu karışımın kullanımında motor efektif veriminin düşük olmasıdır.

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına kademeli geçişi sağlayan sistemle farklı LPG kullanım oranlarının, motor performansına, egzoz emisyonlarına ve yakıt ekonomisine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

Taşıt motorunun seyir halinde benzin yakıtının kullanımından LPG yakıtının kullanımına kademeli geçişi, motorda meydana gelen sarsıntıları hissedilmeyecek kadar azaltmıştır.

Motor dinamometresinde farklı yüklerde yapılan deneylerde, tüm LPG kullanım oranlarında egzoz emisyonları ve yakıt ekonomisi açısından benzine göre olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Egzoz emisyonları ve yakıt ekonomisi açısından en uygun sonuçlar %100 LPG kullanımında elde edilmiştir. %100 LPG'nin kullanımında karbondioksit, karbonmonoksit ve hidrokarbon emisyonlarında ortalama olarak sırasıyla %33,9, %53,3 ve %72,6 azalma meydana gelmiştir. Özgül yakıt maliyetinde ise %23 azalma sağlanmıştır.

Motor performansı açısından ise yalnız %25 LPG kullanım oranında olumlu sonuçlar elde edilmiştir. %25 LPG içeren karışımın kullanımında motor efektif verimi muhafaza edilirken özgül yakıt ve enerji tüketiminde ortalama olarak sırasıyla %7,1 ve %6,2 azalma meydana gelmiştir.

## SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

$a$  = sabit



$b$	= sabit, özgül yakıt tüketimi (g/kW h)
$e$	= özgül enerji tüketimi (kJ/kW h)
$LHV$	= alt ısı değer (kJ/kmol)
$\dot{m}$	= yakıtın kütleli debisi (kg/s)
$n$	= motor devri (d/d)
$P$	= motor efektif gücü (kW)
$s$	= silindir sayısı
$t$	= enjektör açılma süresi (duty cycle) (s)
$\bar{V}$	= bir çevrimde enjektörden püskürtülen hacimsel yakıt miktarı (m <sup>3</sup> /çevrim)
$\dot{V}$	= hacimsel debi (m <sup>3</sup> /s)
$M$	= özgül yakıt maliyeti (YTL/kg)

*Yunan Harfleri (Greek Letters)*

$\eta$	= efektif verim
$\varepsilon$	= özgül yakıt maliyeti (YTL/kW h)
$\alpha$	= benzin eksiltme oranı
$\rho$	= yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )

*Alt indisler (Subscripts)*

b	= benzin
e	= efektif, eksiltmiş benzin
lpg	= LPG yakıtı
s	= sivi

*Kısaltmalar (Abbreviations)*

LPG	= sıvılaştırılmış petrol gazı
CO <sub>2</sub>	= karbondioksit
CO	= karbonmonoksit
HC	= hidrokarbon
LHV	= alt ısı değer (lower heating value)

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)**

Yazar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde her türlü desteği veren VOLTRAN-ÜÇYILDIZ otomotiv şirketine teşekkür eder.

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

- Smith, W. J., Timoney, D. J. ve Lynch, D.P., "Emissions and Efficiency Comparison of Gasoline and LPG Fuels in a 1.4 litre Passenger Car Engine", **SAE Paper**, 972970, 1997.
- İçingür, Y., ve Haksever, R., "Using of LPG for Internal Combustion Engines-Experimental Analysis of Its Effects on Performance and Emission", **Journal of Polytechnic**, Cilt 1, No 3-4, 69-76, 1998.
- Dinler, N., ve Yücel, N., "Alternatif Yakıt Olarak LPG Kullanan İki Motorun Performansının Deneysel İncelenmesi", **LPG ve CNG Uygulamaları Sempozyumu**, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Ankara, 93-100, 2003.
- Murillo, S., Míguez, J.L., Porteiro, J., Lopez, G.L.M., Granada, E. ve Morán, J.C., "LPG: Pollutant Emission and Performance Enhancement for Spark-Ignition Four Strokes Outboard Engines", **Applied Thermal Engineering**, Cilt 25, No13, 1882-1893, 2005.
- Kim, C.U. ve Bae, C.S., "Specated Hydrocarbon Emissions from A Gas-Fuelled Spark-Ignition Engine with Various Operating Parameters", **Journal of Automobile Engineering**, Cilt 214, No 7, 795-808, 2000.
- Akbaş, A., Sekmen, Y. ve Erduranlı, P., "Sıkıştırma Oranı Artışının LPG ile Çalışan Buji ile Ateşlemeli Taşıt Motorunun Gücü ve Yakıt Ekonomisine Etkisi", **Makina Tasarım ve İmalat Dergisi**, Cilt 5, No 1, 29-34, 2003.
- Çelik, M.B. ve Balki, M.K., "Düşük Güçlü Bir Motorda Farklı Sıkıştırma Oranlarında LPG Kullanımının Performans ve Emisyonlara Etkisi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 22, No 1, 81-86, 2007.
- Sayın, C., Çanakçı, M., Kılıçaslan, İ. ve Özsezen N., "Çift Yakıt (Benzin+Lpg) Kullanımının Motor Performansı ve Emisyonlar Üzerine Etkisinin Deneysel Analizi", **Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.**, Cilt 20, No 4, 483-490, 2005.
- Sierens, R., "Experimental and Theoretical Study of Liquid LPG Injection", **SAE Paper**, 922363, 1992.
- Sim, H., Lee, K., Chung, N. ve Sunwoo, M., "A study on the injection characteristics of a liquid-phase liquefied petroleum gas injector for air-fuel ratio control", **Proc. IMechE Part D: J. Automobile Engineering**, Cilt 219, 1037-1046, 2005.
- Kwak, H., Myung, C.L., ve Park, S., "Experimental investigation on the time resolved THC emission characteristics of liquid phase LPG injection (LPLi) engine during cold start", **Fuel**, Cilt 86, 1475-1482, 2007.
- Yoong, A.P.F. ve Watkins, A.P., "Modelling of liquefied petroleum gas spray development, evaporation and combustion", **IMechE: Int. J. Engine Res.**, Cilt 5, No 6, 469- 497, 2004.
- Karamangil, M.I., "Development of the Autogas and LPG-powered Vehicle Sector in Turkey: A Statistical Case Study of the Sector for Bursa", **Energy Policy**, Cilt 35, 640-649, 2007.
- Voltran Alternative Fuel Systems, **Voltran Installation Manual**, Istanbul, 1-49, 2007.
- Lee, D., Cho, S., Lee, B., Ko, Seil., Park, J. ve Choi, J., "Enhancement of volumetric efficiency in a gaseous LPG injection engine", **The 13<sup>th</sup> International Pacific Conference on Automotive Engineering**, 2006.
- Puhan, S., Vedaraman, N., Rama, B.V.B., Sankarnarayananb, G. ve Jeychandranb, K., "Mahua oil (Madhuca Indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics", **Biomass and Bioenergy**.
- Kodah, Z. ve Soliman, S., "Combustion in a Spark Ignition Engine", **Applied Energy**, Cilt 66, 237-250, 2000.