

DİREK ENJEKSİYONLU BİR DİZEL MOTORDA LPG-DİZEL ÇİFT YAKIT KARIŞIMININ PERFORMANS VE İS EMİSYONLARINA ETKİLERİ

Semih Aliustaoğlu¹ Vezir Ayhan²

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği, 54100, Sakarya, TÜRKİYE

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, 54100, Sakarya, TÜRKİYE

Özet-Günümüzde doğalgazın ayrıştırılması ya da ham petrolün damıtılmasıyla elde edilen LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı), benzinli motorlarda direkt olarak kullanılabilirken, dizel motorlarda ikinci bir yakıt olarak ya da motordaki modifikasyon sonucunda kullanılabilir. Maliyet açısından daha uygun olan LPG'nin dizel motorlarda çift yakıt olarak kullanımı yakıt ekonomisinde tasarruf sağlamaktadır. Atmosfere salınan egzoz gazındaki yanmamış karbon molekülleri olarak adlandırılan is miktarı her geçen gün çevreyi ve insan sağlığını tehdit etmektedir. Bu durum insanlığı var olan kaynakları daha etkili kullanma arayışına yöneltmiştir. LPG-dizel çift yakıt karışımı bu husustaki en etkili yanma stratejilerinden birisidir. Bu çalışmada, direk enjeksiyonlu bir dizel motorda LPG-dizel çift yakıt karışımının performans ve is emisyonlarına etkileri incelenmiştir. Standart motor deneyleri yapılarak her bir devir için yük, özgül yakıt tüketimi ve is emisyon değerleri belirlenmiştir. Ardından, LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. İkinci yakıt olarak LPG; bir enjektör yardımıyla motor emme hattından kademeli olarak püskürtülmüştür. Elde edilen değerler karşılaştırıldığında %20 LPG-%80 dizel yakıt karışımının standart duruma göre, performansta herhangi bir kötüleşme olmaksızın özgül yakıt tüketiminde ve yakıt maliyetlerinde iyileşmeler sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca is emisyonlarında da kayda değer oranlarda iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler- Dizel motor, LPG, dizel yakıt, yakıt tasarrufu, is emisyonu.

THE EFFECTS OF LPG-DIESEL DUAL FUEL MIXTURE ON PERFORMANCE AND SMOKE EMISSIONS IN A DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE

Abstract- Nowadays, while LPG (liquefied petroleum gas) obtained by decomposition of natural gas or distillation of crude oil can be used directly in gasoline engines, it can be used as a second fuel in diesel engines or as a result of modification in the engine. The use of LPG, which is more cost effective, as a dual fuel in diesel engines provides savings in fuel consumption. The amount of smoke released into the atmosphere threatens more day-to-day to the environment and human health. The use of LPG-diesel dual fuel mixture is one of the most effective combustion strategies in this subject. In this study, the effects of LPG-diesel dual fuel mixture in direct injection of diesel engine to the fuel consumption and smoke emission have investigated. Standard motor tests were carried

out to determine the load, specific fuel consumption and emission values for each cycle. And then, LPG-diesel dual fuel tests have been carried out. LPG as a second fuel has been gradually sprayed from the engine intake line with an injector. When the values obtained are compared with standard condition, it has been observed that 20% LPG- %80 diesel dual fuel mixture provide fuel economy and improvement in smoke emissions significantly.

Key Words- Diesel engine, LPG, diesel fuel, fuel saving, smoke emission.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda dünya nüfusunda meydana gelen artışla birlikte insanların enerjiye olan bağlılığı ve enerji ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ayrıca en büyük enerji ihtiyaçlarından birini oluşturan taşıtların ulaşımındaki sayısı ve buna paralel olarak konvansiyonel fosil yakıtların kullanımı da hızla artmaktadır. Bu durum insanlığı; çevre kirliliği, küresel ısınma ve fosil yakıtların tükenme tehlikesi gibi sorunlarla yüzleşmek zorunda bırakmıştır [1]. Bu sorunların etkilerini bir miktar da olsa azaltmak veya artışını önlemek adına daha katı emisyon yönetmelikleri uygulanmaya başlanmış ve iklim değişikliği ile ilgili uluslararası protokoller imzalanmıştır. [2-5]. Diğer taraftan, içten yanmalı motorlar için en büyük enerji kaynağı olarak kullanılan petrol fiyatlarında yaşanan artıştan dolayı özellikle Japonya, Almanya ve Türkiye gibi petrol ithal eden ülkelerde bulunan otomobil üreticileri için yakıt ekonomisi önemli bir faktör olmuştur [6-7]. Böylece, taşıtlarda fosil bir yakıt olan petrole kıyasla daha çevreci ve ekonomik alternatif bir yakıt kullanımı bir ihtiyaç haline gelmiştir [1]. CNG (sıkıştırılmış doğal gaz), biyodizel ve LPG (sıvılaştırılmış petrol gazı) içten yanmalı motorlarda sıklıkla kullanılan alternatif yakıtlara örnek olarak verilebilir. Fakat bunların içinde LPG, kolay taşınabilir, nakledilebilir, depolanabilir ve dünyanın hemen hemen her yerinde kullanılabilir ve uzun yıllar dayanacak yeterli rezervlere sahip olduğu için otomotiv sektöründe en çok kabul gören alternatif yakıttır [8-9].

LPG'nin iki kaynağı vardır. LPG'nin %60'ı doğal gazdan oluşmaktadır. Geri kalan %40'ı ise ham petrol rafine edilirken üretilir. Bu nedenle LPG doğal olarak oluşan bir yan üründür [8]. Ülkemizde LPG ticari olarak %30 propan (C_3H_8) ve %70 bütan (C_4H_{10}) gazlarından oluşan renksiz ve kokusuz bir gazdır [10]. LPG, benzin (4-12) ve dizel (8-21) ile karşılaştırıldığında birim molekül başına düşük karbon içeriği (propan için üç ve bütan için dört) nedeniyle temiz bir yakıt olarak kabul edilmiştir [11]. Bu durum LPG'yi gelecekteki emisyon düzenlemeleri için ilgi çekici hale getirmiştir. Fiyat rekabet gücü LPG'nin bir başka avantajı olarak gösterilmektedir. Günümüzde LPG fosil yakıtlara alternatif bir yakıt olarak benzinli motorlarda direkt olarak kullanılabilirken, dizel motorlarda ikinci bir yakıt olarak ya da motordaki modifikasyonlar sonucunda kullanılabilir. Bu konuda çeşitli yanma stratejileri mevcuttur. LPG-dizel çift yakıt yanma stratejisi bu konudaki en etkili yöntemlerden birisidir.

Saleh, İki silindirli, doğal emişli, dört zamanlı, direk enjeksiyonlu dizel bir motoru LPG pilot enjeksiyonu yapacak şekilde LPG-dizel çift yakıt olarak dönüştürmüştür. Çift yakıtlı çalışma için en iyi LPG bileşimini geleneksel dizel motora kıyasla yüksek termal verimliliği korurken, aynı zamanda egzoz emisyon kalitesini iyileştirecek LPG içeriğindeki varyasyonların performans ve emisyon üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sonuçlardan; bileşimdeki propan oranının artmasıyla egzoz gazındaki CO oranının düştüğünü, bütan oranının artmasıyla da NO_x emisyonlarının azaldığını tespit etmiştir (%70 bütan ve %30 propan) [12].

Ayhan ve ark., tek silindirli dizel bir motorda emme hattından LPG'yi ikinci bir yakıt olarak ilave ederek motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemiştir. Deneysel veriler göstermektedir ki; emme hattına emme periyodu boyunca LPG ilavesi sonucunda; sadece

dizel yakıtla çalışan motorla kıyaslandığında fren gücü, özgül yakıt tüketimi, fren verimliliği ve fren torkunun önemli ölçüde arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca %5 LPG ilavesinin tüm yük şartlarında is emisyonlarını önemli oranda düşürdüğü görülmüştür. Fakat %10 ve daha yüksek LPG oranları için is emisyonlarının standart dizel yakıtla kıyaslandığında arttığı sonucuna varmışlardır [13].

Kumaraswamy ve Prasad, birinci yakıt olarak dizel ve ikinci yakıt olarak LPG enjeksiyonu yaparak EGR (Egzoz gazı resürkülasyonu) ile birlikte LPG-dizel çift yakıt çalışmanın emisyon gazları ve performans üzerindeki etkilerinin araştırılmasını amaçlamışlardır. Dört zamanlı, tek silindirli dizel bir motor, ufak modifikasyonlarla çift yakıt çalışabilecek şekilde modifiye edilmiş ve EGR sistemi adapte edilmiştir. Sonuçlar; tam yük şartlarında EGR ile birlikte LPG-dizel çift yakıt çalışmanın NO_x emisyonlarını azalttığını açıkça göstermektedir. Ancak geleneksel dizel motorla kıyaslandığında kısmi yük şartlarında CO, HC ve özgül yakıt sarfiyatında artmalar olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca dizel-LPG çift yakıt çalışmanın konvansiyonel dizel motorla karşılaştırıldığında is emisyonlarını önemli ölçüde iyileştirdiğini belirlemişlerdir [14].

Tae ve ark., direk enjeksiyonlu benzinli (DSI) bir motorda ikinci bir yakıt olarak yanma odasına bir enjektör yardımıyla belli oranlarda LPG püskürterek performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; LPG'nin kademeli olarak yanma odasına direk olarak püskürtülmesiyle fren özgül yakıt tüketiminde kayda değer oranda iyileşme sağlanırken, NO_x emisyonları da önemli oranda azalmıştır [11].

Bu çalışmada, tek silindirli dizel motorda LPG-dizel (sırasıyla %20-%80) çift yakıt çalışmanın performans ve is emisyonlarına etkileri incelenmiştir. İlk olarak motor standart yük deneyleri yapılarak her bir devir için moment, güç, özgül yakıt sarfiyatı ve is emisyon değerleri belirlenmiştir. İkinci aşamada LPG-dizel çift yakıt deneyleri gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada elde ettiğimiz standart yük değeri gaz kolu yardımıyla %20 oranında düşürülerek dizel yakıt miktarı azaltılmıştır. Daha sonra, ikinci yakıt olarak LPG bir enjektör yardımıyla motor emme hattından püskürtülmüştür. Püskürtülen LPG'nin debisi ve enjektör püskürtme zamanı uygun yük değeri elde edilecek şekilde dinamometre yardımıyla ayarlanmıştır.

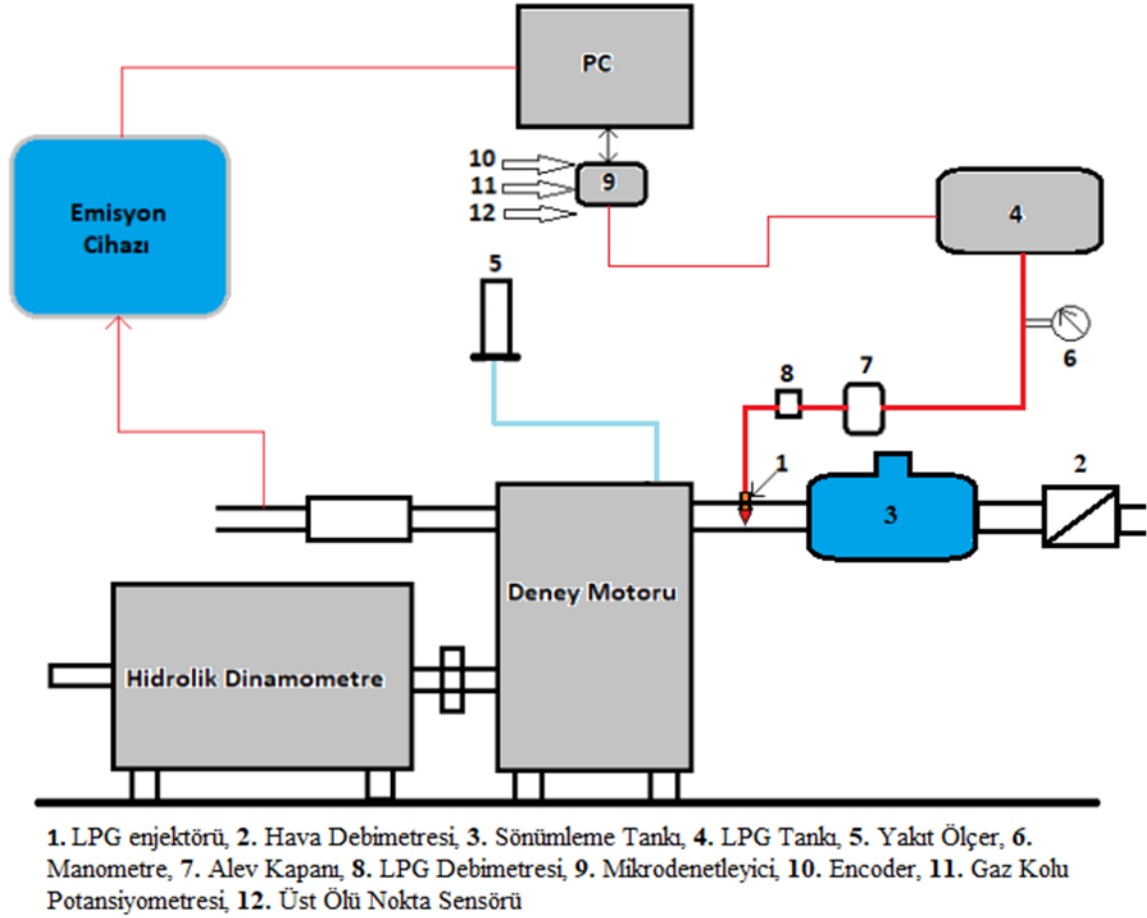
2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIEL AND METHOD)

Deneysel çalışmalarda doğal emişli, dört zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı ve çanak piston yapılı Süper Star marka bir dizel motor kullanılmıştır. Tablo 1'de deney motorunun teknik özellikleri verilmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri (technical properties of test engine)

| Motor Tipi | Süper Star |
|--------------------------------|------------------|
| Piston Çapı [mm] | 108 |
| Strok [mm] | 100 |
| Silindir Sayısı | 1 |
| Strok Hacmi [dm ³] | 0,92 |
| Güç -1500 d/d, [kW] | 14,7 |
| Enjektör Basıncı, [bar] | 225 |
| Püskürtme Avansı, [°KMA] | 35 |
| Maksimum Devir, [d/d] | 2500 |
| Soğutma Tipi | Su |
| Püskürtme Tipi | Direk enjeksiyon |

Şekil 1’de deney düzeneği şematik olarak verilmektedir. Deneylere başlamadan önce optimum avans taraması yapılmıştır. Motor performans ve emisyon değerleri dikkate alındığında en uygun kam mili açısının 29° olduğuna karar verilmiştir. Deneyler sırasıyla 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2200 ve 2400 d/d motor devirlerinde ve 29° KMA statik püskürtme avansında yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce motorun kararlı çalışma sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Yakıt sarfiyatı ölçümünde dizel yakıt için 25 cm^3 ’lük yakıt tüketim süresi kronometre ile hassas olarak ölçülmüştür. Hava debisi elektronik hava debi ölçer sistemi ile ölçülmüştür. Lambda (λ) standart çalışmada 1800 d/d için 1.450 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the experimental setup)

Motora, LPG enjeksiyonu yapabilmek için elektrik kontrollü bir enjektör sistemi kullanılmıştır. Sistem; Selenoid enjektör, basınçlandırılmış LPG tankı, basınç ölçer, alev kapanı, debimetre, encoder, üst ölü nokta sensörü ve mikro denetleyiciden oluşmaktadır.

Egzoz emisyon değerlerinin ölçülmesinde MRU Spectra 1600 L gaz analiz cihazı, duman koyuluğunun tespitinde ise Bilsa Mode 5000 is ölçer kullanılmıştır.

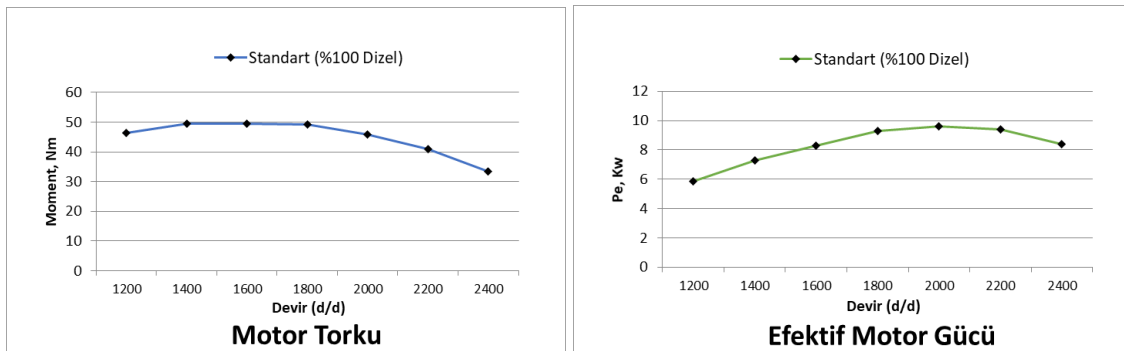
Standart motor değerlerinin tespiti için ilk aşamada motor %100 dizel yakıt ile çalıştırılarak motor performans ve emisyon değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra ikinci aşama deneylere geçilmiştir. Bu aşamada motor emme hattına yerleştirilen enjektör yardımıyla giriş havasının içine LPG enjekte edilmiştir. Her bir devir için standart deneylerde elde edilen yük değeri gaz kolu yardımıyla %20 oranında düşürülerek enjektör yardımıyla standart yük değerini elde edecek miktarda LPG emme hattından püskürtülmüştür. Deneylerde kullanılan dizel yakıtın ve LPG'nin özellikleri Tablo 2’de verilmektedir. [13]

Tablo 2. LPG ve dizel yakıtın özellikleri (Properties of LPG and diesel fuel)

| Özellik | LPG (%30 Propan-%70 Bütan) | Dizel |
|--|----------------------------|----------------|
| Kimyasal Formülü | $C_3H_8-C_4H_{10}$ | $C_{14}H_{29}$ |
| Yoğunluk 15°C'de, 1 atm. (g/cm ³) | 0,562 | 0,828 |
| Alt Isıl Değeri (Kj/kg) | 45908 | 43760 |
| Setan Sayısı | <3 | 45-55 |
| Teorik Hava Gereksinimi | 15,5 | 14,5 |
| Kaynama Noktası (°C) | -13 | 260 |
| Ağırlığa Göre Kükürt İçeriği | 0,02 | 14,5 |
| Alt Tutuşma Sınırı (% vol.) | 2 | 0,6 |
| Üst Tutuşma Sınırı (% vol.) | 8,7 | 5,6 |

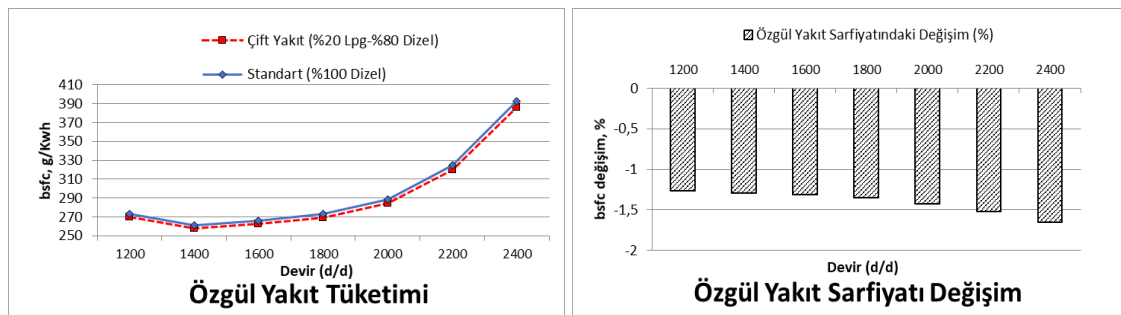
3. BULGULAR (FINDINGS)

Standart motor deneyleri sonucunda elde edilen motor moment ve efektif güç değerleri Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. Standart motor moment ve efektif güç değerleri (Values of standard motor torque and effective power)

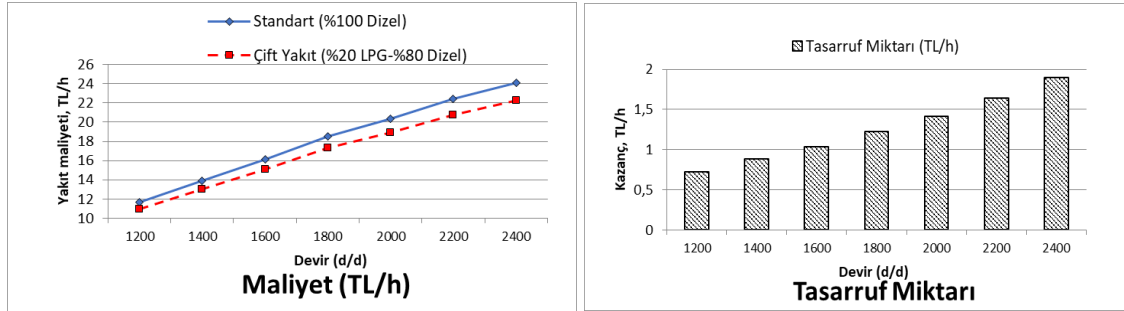
Şekil 3'de standart ve LPG-dizel çift yakıt özgül yakıt tüketim değerleri ve standart duruma göre % değişim oranları verilmiştir.



Şekil 3. Standart ve LPG-dizel çift yakıt özgül yakıt tüketim değerleri ve standart duruma göre % olarak değişimi (Standard and LPG-diesel dual fuel specific fuel consumption values and change in % according to standard situation)

Grafiklerde görüldüğü gibi tek silindirli dizel bir motorda %20 LPG %80 dizel yakıtla çalıştırıldığında özgül yakıt tüketiminde %1,26-1,65 arasında bir kazanç sağlanmıştır. Dizel motorların benzinli motorlara göre yüksek sıkıştırma oranı ve daha düşük özgül yakıt sarfiyatı nedeniyle daha yüksek verimle çalışmaları düşünüldüğünde orta ve ağır hizmet tipi araçlar için dizel motorları cazip hale getirmektedir [15]. Bu durumda LPG-dizel karışımının daha yüksek silindir sayısına ve motor hacmine sahip dizel motorlarda kullanıldığı düşünülürse özgül yakıt sarfiyatında meydana gelecek iyileşme artacaktır.

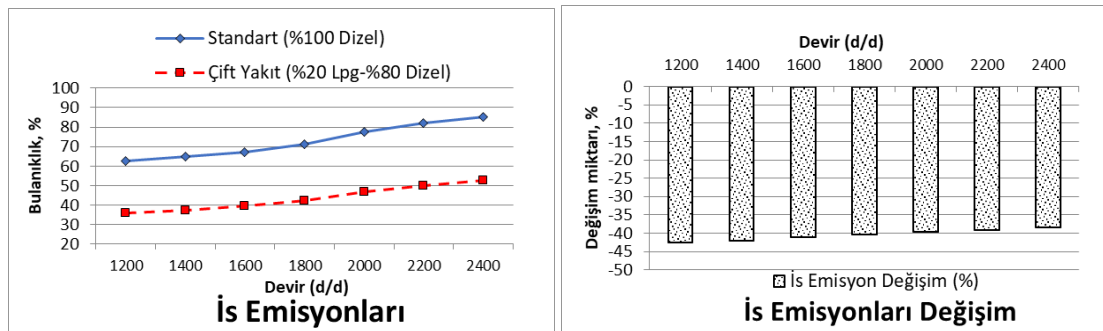
Şekil 4'te standart ve LPG-dizel çift yakıt maliyetleri ve standart duruma göre tasarruf miktarı TL/h olarak verilmektedir.



Şekil 4. Standart ve LPG-dizel çift yakıt maliyetleri ve TL/h olarak tasarruf miktarı (Standard and LPG-diesel dual fuel costs and savings in TL/h)

Grafiklerde görüldüğü üzere LPG-dizel çift yakıt karışımıyla çalışmanın standart duruma göre daha az maliyetli olduğu saptanmıştır. Ayrıca deneylerde kullanılan Shell V-Power (Euro diesel) yakıtın ve ticari LPG (%30 propan %70 butan)'nin güncel litre fiyatları baz alındığında [16], çift yakıtla çalışmanın standart duruma göre yaklaşık 0,73-1,90 TL/h arasında tasarruf sağladığı görülmektedir. Mevcut durumda tek silindirli dizel bir motorla bu verilerin elde edildiği düşünüldüğünde daha yüksek silindir sayısına sahip ve yüksek hacimli motorlar için bu kazancın daha fazla olacağı aşikardır. Özellikle yüksek günlük çalışma saatleri düşünüldüğünde, taşımacılıkta sıklıkla kullanılan ticari kamyon, otobüs ve taksiler için kayda değer bir tasarruf sağlanabilecektir.

Şekil 5'te standart ve çift yakıt is emisyon değerleri ve standart duruma göre değişimleri % olarak verilmektedir.



Şekil 5. Standart ve çift yakıt is emisyon değerleri ve standart duruma göre değişimleri (Standard and dual fuel emission values and changes according to standard conditions)

Grafiklerde verildiği gibi standart durumda çevreye yayılan is miktarının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Fakat, çift yakıtla çalışma durumunda is miktarında %38-42 arasında bir iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Bu durumda LPG-dizel çift yakıtla çalışmanın çevre ve insan sağlığı için zararlı etkileri olan is emisyonlarını düşürmede oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, doğal emişli, direk enjeksiyonlu, tek silindirli bir dizel motorda (%20 LPG-%80 dizel) çift yakıt ile çalışıldığında; özgül yakıt sarfiyatında iyileşmeler olduğu görülmüştür. Bu iyileşme, LPG'nin dizel yakıtı göre kütle bazda daha fazla ısı enerjisiye sahip olduğundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca LPG'nin dizel yakıtı göre daha ekonomik avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Özgül yakıt tüketiminde meydana gelen iyileşmeden ötürü LPG-dizel çift yakıtla çalışmanın standart duruma göre birim saat başına ortalama 1,26 TL kazanç sağladığı görülmüştür. Bu durumun özellikle lojistik şirketleri ve toplu taşımalar da kullanılan taşıtlar için kayda değer oranlarda maliyet azalması sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca dizel motorların çevreye yüksek miktarda is emisyonları yaydığı bilinen bir gerçektir. Bu durum dizel motorları çevre ve insan sağlığı bakımından elverişsiz bir duruma düşürmektedir. Fakat, yapılan deneyler göstermektedir ki LPG-dizel çift yakıtla çalışmanın çevreye yayılan is emisyon miktarını standart duruma göre %38-42 arasında iyileştirmektedir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Ashok, B. (2015), LPG diesel dual fuel engine – A critical review, *Alexandria Engineering Journal*, (54), 105-126.

[2] European Commission (2016), *Commission Regulation (EU)*, 04.12.2018 tarihinde, EUR-Lex sitesi: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32016R1718> adresinden alındı.

[3] EPA (2016), *EPA Emission Standards for Heavy-Duty Highway Engines and Vehicles*, 04.12.2018 tarihinde, United States Environmental Protection Agency sitesi: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-emission-standards-heavy-duty-highway-engines-and-vehicles> adresinden alındı.

[4] United Nations Climate Change (2008), *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount*, 04.12.2018 tarihinde, United Nations Climate Change sitesi: https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf adresinden alındı.

[5] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (2017), *Egzoz Gazı Emisyonu Kontrolü Yönetmeliği*, 02.12.2018 tarihinde, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı sitesi: <http://egzoz.csb.gov.tr/Themes/egzoz/Pages/AnaSayfa.aspx> adresinden alındı.

[6] OPEC (2017), *Annual Report*, 03.12.2018 tarihinde, Organization of the Petroleum Exporting Countries sitesi: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/AR%202017.pdf adresinden alındı.

[7] U.S. Energy Information Administration (2018), *Petroleum Marketing Monthly Report*, 04.12.2018 tarihinde, U.S. Energy Information Administration sitesi: <https://www.eia.gov/petroleum/marketing/monthly/> adresinden alındı.

[8] WLPGA (2018), *LPG Exceptional Energy*, 01.12.2018 tarihinde, World LPG Association sitesi: <https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2015/10/WLPGA-EE-PDF-TR.V1.pdf> adresinden alındı.

- [9] Türkiye LPG Derneği (2018), *LPG'nin Çevre Üzerindeki Etkileri*, 03.12.2018 tarihinde Türkiye LPG Derneği sitesi: <https://www.tlpgder.org.tr/duyurular/43/lpg'nin-cevre-uzerindeki-etkileri.aspx> adresinden alındı.
- [10] TMMOB (2017), *LPG*, 29.11.2018 tarihinde, Türkiye Makine Mühendisleri Odası Birliği sitesi: http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/75fcb6de80025fe_ek.pdf?tipi=68&turu=X&sube=7 adresinden alındı.
- [11] Tae, Y. K., Cheolwoong, P., Seungmook, O., Gyupack, C. (2016), The effects of stratified lean combustion and exhaust gas recirculation on combustion and emission characteristics of an LPG direct injection engine, *Energy*, 115, 386-396.
- [12] Saleh, H.E. (2008), Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine, *Fuel*, 87, 3031-3039.
- [13] Ayhan, V., Parlak, A., Cesur, İ., Boru, B., Kolip, A. (2011), Performance and exhaust emission characteristics of a diesel engine running with LPG, *International Journal of the Physical Sciences*, 6(8), 1905-1914.
- [14] Kumaraswamy, A., Prasad, B.D. (2012), Performance Analysis of a Dual Fuel Engine Using LPG and Diesel with EGR System, *SciVerse ScienceDirect*, 38, 2784-2792.
- [15] Haşimoğlu, C. (2005), *Düşük Isı Kayıplı Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Performans ve Emisyon Parametrelerine Etkisi*, Doktora Tezi, Sakarya, Sakarya Üniversitesi.
- [16] Shell Türkiye (2018), *Akaryakıt Pompa Satış Fiyatları*, 04.12.2018 tarihinde, Shell Türkiye sitesi: <https://www.shell.com.tr/motorists/shell-fuels/akaryakit-pompa-satis-fiyatları.html> adresinden alındı.