

Hidrojen ile Yakıt Zenginleştirmenin Dizel Motorun Motor Performansı ve Emisyon Özelliklerine Etkisi

Ahmet ÇALIK*¹

¹Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine, Mersin

Geliş tarihi: 20.07.2018

Kabul tarihi: 15.10.2018

Öz

Hava kirliliğinin giderek artışı ve motor performansı arttırmaya yönelik arayışlar hidrojen gibi ek yakıtlara olan ihtiyacı artırmıştır. Bu çalışmada, bir sıkıştırma ateşlemeli motorun çalışma karakteristikleri üzerine atık kızartma yağından üretilen biyodizel yakıtına (AKY) hidrojen ilavesinin etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Hidrojen, giriş havasına belli bir debide verilmiştir. Yapılan testte dizel motorunun performans ve emisyon değerleri incelenmiştir. Katkısız dizel yakıt, motorun çeşitli yakıtlara göre operasyonel özelliklerini karşılaştırmak için referans yakıt olarak seçilmiştir. Sonuç olarak hidrojen ilavesinin motor performansını artırdığını gözlemlenmiştir. Hidrojen gazı motor silindirlerine verildiğinde CO ve CO₂ emisyonları azalmış ve NO_x emisyonları ise artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrojen, Biyodizel, Performans, Emisyon

Effect of Fuel Enrichment with Hydrogen on Engine Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine

Abstract

Increase in air pollution and seeking to improve engine performance has increased the need for additional fuels such as hydrogen. In this study, the effects of hydrogen addition on biodiesel fuel produced from waste frying oil on the operating characteristics of an ignition engine have been experimentally investigated. Hydrogen is introduced into the inlet air at a certain flow rate. Performance and emission values of the diesel engine were examined. Pure diesel fuel is selected as the reference fuel to compare the operational characteristics of the engine with respect to various fuels. As a result, it has been observed that the hydrogen addition increases the engine performance. When hydrogen gas is supplied to engine cylinders, CO and CO₂ emissions are reduced and NO_x emissions are increased.

Keywords: Hydrogen, Biodiesel, Performance, Emissions

*Sorumlu yazar (Corresponding author): Ahmet ÇALIK, ac@mersin.edu.tr

1. GİRİŞ

Ulaşımdan güç üretimine kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılmakta olan içten yanmalı motorlar araştırmacılarının ilgisini çekmeye devam etmektedir. İçten yanmalı motorlardan olan dizel motorlar yüksek enerji verimliliği, yüksek stabilite ve çeşitli çalışma koşulları için esnek olma gibi önemli avantajlara sahip olduklarından pek çok araştırmaya konu olmuştur [1–5].

Günümüzde, içten yanmalı motorlar konvansiyonel petrol bazlı yakıtlara oldukça bağımlıdır. Bu bağımlılık, geleneksel yakıtların, artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle kıtlık sorunuyla karşı karşıya kalması nedeniyle kaçınılmaz problemler yaratmaktadır. Bu nedenle, araştırmacılar fosil yakıtlara yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz alternatifler bulmaya çalışıyorlar. Fosil yakıtların tükenmesinin yanı sıra, zararlı emisyon yaymaları da bilim insanlarını yeni alternatifleri araştırmaya zorladı [6–9].

Biyodizel çeşitli hammaddeden üretilebilir. Genel olarak, hammaddeler yenilebilir veya yenmeyen bitkisel yağ, atık veya geri dönüştürülmüş yağ ve hayvansal yağlar olarak sıralanabilir [1,10].

Çevresel ve tarımsal koşullar, toprak mevcudiyeti, coğrafi konumlar, hammaddelerin seçiminde temel faktörlerdir [12]. Özellikle, biyodizel üretimi için nispeten daha ucuz ve kolay erişilebilir olması nedeniyle atık gıda yağı diğer hammaddeler arasında en çok tercih edilendir [13,14].

Atık gıda yağı, otel ve kamu lokantalarında çok büyük bir sorundur [10,15]. Alternatif bir potansiyel yakıt olarak atık gıda yağı biyodizeli ile çalışan içten yanmalı motorların performans, emisyon ve yakıt özellikleri ile ilgili çeşitli çalışmalar vardır [11,14,16–18].

Geleneksel fosil yakıtların yerini alan bir başka potansiyel enerji kaynağı da hidrojenidir.

Hidrojen, Yanma sonrası su ürettiği için temiz ve çevre dostu enerji olmasıyla bilinir [19,20].

Hidrojen doğal olarak mevcuttur ve farklı kaynaklardan da üretilebilir [21]. Literatürde,

hidrojen gazı ilave yakıt katkı maddesi olarak kullanılan çeşitli çalışmalar bulunabilir [22–29].

Chelladorai ve arkadaşları [29] üzüm çekirdeği çekirdeği yağı biyodizeli ve dizel yakıtının yanma, performans ve emisyon özellikleri analiz edilmiş ve çift yakıtlı modda emme manifoldunda hidrojen indüksiyonu ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Tam yükte maksimum hidrojen payıyla üzüm çekirdeği biyodizelin nitrik oksit emisyonu %43,61 ve duman emisyonu, hidrojen indüksiyonu olmadan biyodizele göre %19,73 daha düşük çıktığını gözlemlemişlerdir.

Saf hidrojenle zenginleştirilmiş Nar çekirdeği yağı biyodizelinin dizel motor performans ve emisyon özelliklerine etkisi Tüccar ve Uludamar [25] tarafından incelenmiştir. Deneylede saf hidrojen ilavesinin hem motor performansında hem de egzoz emisyonlarında küçük bir iyileşmeye neden olduğunu rapor etmişlerdir.

Özcanlı ve arkadaşları [30], hidrojen veya HHO ile zenginleştirilmiş Hint yağı metil ester-dizel karışımları ile beslenen dizel motorun performans ve emisyon özelliklerini araştırdılar. Saf hidrojenin Hint yağı metil estere eklenmesinin, egzoz gazı emisyonları üzerinde, HHO eklenmesiyle karşılaştırıldığında, pozitif bir etkisi olduğunu tespit ettiler.

Bir başka çalışmada, mikroalg biyodizel ile beslenen hidrojen ve hidroksit gaz emmeli sıkıştırma ateşleme motoru ve düşük kükürtlü dizel yakıt karışımının motor performans ve emisyon üzerine etkileri Uludamar [26] tarafından incelenmiştir. Sonuçlar, Çalışma, mikroalg biyodizelinin hidrojen ve hidroksit gazı ilavesiyle kullanımının çevresel açıdan çok umut verici bir kombinasyon olduğunu aydınlatmıştır.

Du ve arkadaşları [20] tarafından hidrojen direkt enjeksiyonu altında hidrojen benzini motorlarının ekonomisi ve emisyonları araştırıldı.

Serin ve Yıldızhan [30] yaptıkları çalışmada, dizel ve çay tohumu yağı biyodizel karışımlarına hidrojenle zenginleştirmenin etkileri, modifiye

edilmemiş bir sıkıştırma ateşleme motoru üzerinde deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada Hidrojen zenginleştirilmesi, tüm test yakıtları için CO ve CO₂ emisyonlarını azalttığı, hidrojen yakıtının akış hızının artırılması, NO_x hariç performans değerlerini ve yaydığı zararlı gazları iyileştirdiği rapor edilmiştir.

Bu çalışmada dizel ile çalışan bir sıkıştırma ateşleme motor, emilen hava içerisine sabit hızda hidrojen verilerek çalışabilecek şekilde uyarlanmıştır. Esas yakıt olarak dizel ve AKY biyodizeli normal yakıt sistemi ile püskürtülerek ayrı ayrı değişik hızlarda çalıştırılarak emme manifoldundan hidrojen ilavesinin performans ve emisyonuna etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

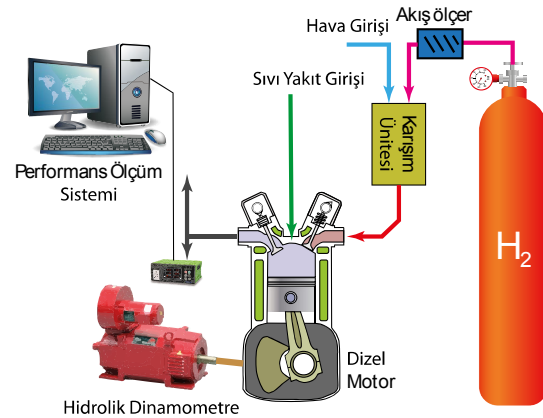
Biyodizel atık kızartma yağı kullanılarak üretilmiştir. Trigliserit içinde yüksek serbest yağ asidi içeriği varsa, alkali katalizli transesterifikasyon reaksiyonu verimli bir şekilde gerçekleşmeyecektir [31]. Yağ yüksek serbest yağ asidi (FFA) değerine sahip olduğu için, önce bir ön arıtma yöntemi olan asit katalizinin kullanılması ile indirgenmiştir.

Transesterifikasyon yönteminde, sırasıyla, katalizör ve alkol olarak sodyum hidroksit ve metanol seçilmiştir. Daha sonra, yağ, alkol ve katalizör ile karıştırıldı ve termometre, reaksiyondan önce 60 °C'lik bir sıcaklık gösterene kadar ısıtıldı. Karışım 1 saat aynı sıcaklıkta karıştırıldı. Ham metil ester, gliserin metil esterden ayrılması için 8 saat boyunca hunide tutuldu. Ayrılan ham metil ester, ılık suda yıkandı ve daha sonra 1 saat boyunca 105 °C'de bir kurutma işlemine tabi tutuldu. Sonunda metil ester bir filtreden geçirildi ve saf biyodizel elde edildi. Üretimden sonra, test motorundaki deneysel yakıtın kullanılabilirliğini belirlemek için biyodizelin bazı kritik yakıt özellikleri Avrupa Standartlarına göre ölçülmüştür. Kyoto Electronics DA-130, Zeltex ZX440, IKA-Werke C2000 Bomba Kalorimetre, AKV-202 Otomatik Kinematik Viskozite cihazları, sırasıyla, test yakıtlarının yoğunluğunu, setan sayısını, ısıtma

değerini (kalorifik değeri) ve viskozitesini ölçmek için kullanıldı.

2.1. Deneysel Tasarım

Deneysel çalışmalar, 4-zamanlı, 4 silindri, doğal olarak emişsiz, modifiye edilmemiş bir ateşleme motoru, bir hidrolik dinamometreye bağlanmış ve motorun egzoz çıkışına bağlı herhangi bir filtre veya başka bir emisyon cihazı olmayan dizel emisyon analizörü ile gerçekleştirilmiştir. Test motorunun, hidrolik dinamometrenin ve emisyon analiz cihazının teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Emme manifolduna dakikada 5 litre debisinde (1 / dak) H₂ gazı hava ile birlikte verilir ve motora gönderilmiştir. Deneyler tam yük koşulu altında 1200-2400 d/dk aralığında gerçekleştirilmiştir ve veriler 300 d/dk aralıklarla toplanmıştır. Deney motorunun şeması, Şekil 1'de gösterilmiştir. Deneyler, dizel, AKY biyodizeli, dizel-hidrojen gazı ve AKY biyodizel-hidrojen gazı olmak üzere dört farklı yakıtla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzenek şeması

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Yakıt Özellik Ölçümleri ve Enerji Hesaplamaları

Yakıt özellikleri, bir motorun performans, emisyon üzerinde çok büyük öneme sahiptir. Çalışmada kullanılan test yakıtlarının ölçüm sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir. Sonuçlar, AKY

Çizelge 1. Test motoru / hidrolik dinamometre / emisyon analizörün teknik özellikleri

Test Motoru		Hidrolik Dinamometre		Emisyon Analizörü	
Marka / Model	Mitsubishi Center (Test Engine)/ 4D34-2A	Marka / Model	Netfren	Marka / Model	MRU / 1600V
Tip	Direct injection diesel with glow plug	Tork / Hız Aralığı	0-1700 Nm / 0-7500 rpm	CO/ CO₂/ O₂	0-10% / 0-20% / 0-22%
Displacement / Bore	3907 cc / 104 mm	Gövde çapı / tork kolu uzunluğu	250 mm / 250 mm	NO / NO₂ / Lambda	0-4000 ppm / 0-1000 ppm / 0,9-99
Güç / Tork	89 kW@3200 rpm / 295 Nm@1800 rpm	Tork	295 Nm @ 1800 rpm	Accuracy	According to OIML-class 1
				Ortam Sıcaklığı / Egzoz Gazı Sıcaklığı	+5o - +45 °C / Max 650 °C

Çizelge 2. Test yakıtlarının özellik ölçümlerinin sonuçları

Yakıt Özellikleri	Dizel	EN590	AKY Biyodizeli	EN 14214
Yoğunluk (20 °C)(kg/m³)	831	820-845	889	860-900
Setan Numarası	55	Min 51	52,58	Min 51
Kalorifik Değer, (Mj/kg)	44,824	-	38,223	-
Kinematik Viskozite (40 °C) (mm²/s)	2,65	2,00-4,5	4,83	3,5-5,00

Çizelge 3. Enerji hesaplama sonuçları

Test Yakıtı	Ortalama Enerji (Mj) ($\dot{E} = \dot{m}CV$) $\frac{\sum_n \dot{E}}{n}$	E (H ₂) (%) (Ortalama) $E (H_2) = \frac{\dot{m}_{H_2} * CV_{H_2}}{\dot{m}_f * CV_f + \dot{m}_{H_2} * CV_{H_2}}$
Dizel	12058	-
Dizel - H ₂ (5 l/m)	12562+2,952	0,023
AKY biyodizeli	12310	-
AKY Biyodizeli – H ₂ (5 l/m)	12033+2,952	0,024

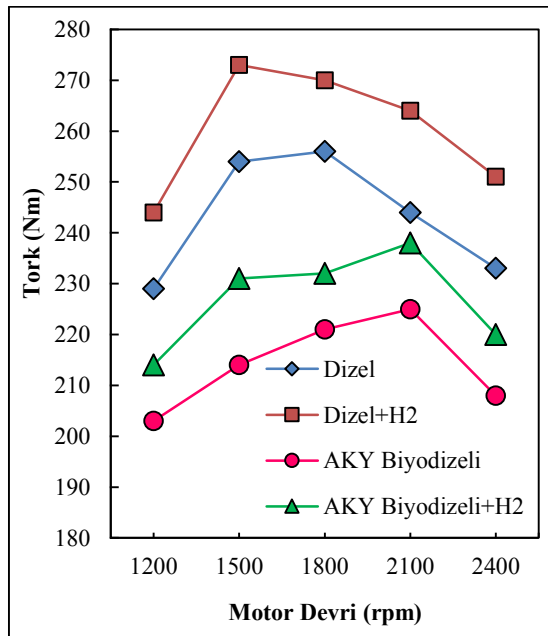
$P_b = 2\pi NT$, $BSFC = \frac{\dot{m}}{P_b}$,
Burada \dot{m} yakıt tüketimi, CV kalorifik değer, \dot{E} ise ortalama enerjiyi ifade eder.

değeri ve daha yüksek viskozite gibi geleneksel konvansiyonel dizel yakıtla karşılaştırıldığında bazı dezavantajlara sahip olduğunu göstermiştir. Deney sonuçları, AKY biyodizelinin kalorifik değerinin, geleneksel dizel yakıttan %13,18 daha düşük olduğunu göstermiştir.

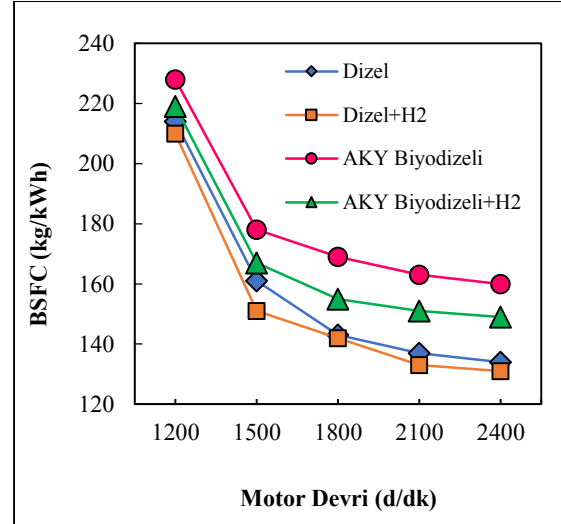
Kalorifik değer, motorda yakıldığında yakıtın enerji katkısını belirler. Bu problem H₂'nin zenginleştirilmesiyle ele alınabilir. Ayrıca, H₂ yakıtlarındaki karbon atomlarının yokluğu ek bir avantajdır. Çizelge 3'te yakıtların enerji katkısı verilmiştir.

Enerji hesaplamaları, fren özgül yakıt tüketimi (brake specific fuel consumption, BSFC) sonuçlarına göre gerçekleştirildi. Hesaplamalar yakıtı H₂ ile zenginleştirmenin silindirlere doldurulmuş yakıtın küçük bir enerji oranını verdiğini göstermektedir. H₂ gazı dizel ve biyodizel yakıtı (120 MJ/kg) ile karşılaştırıldığında çok yüksek kalorifik değere sahiptir, ancak düşük enerji tüketimi (0,082) [32] H₂ düşük enerji katkısı oranının ana sebebidir.

3.2. Performans ve Emisyon Karakteristikleri

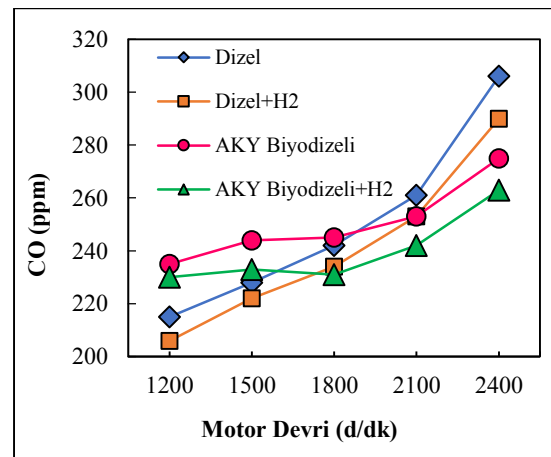


Şekil 2. Motor torku ve motor devri

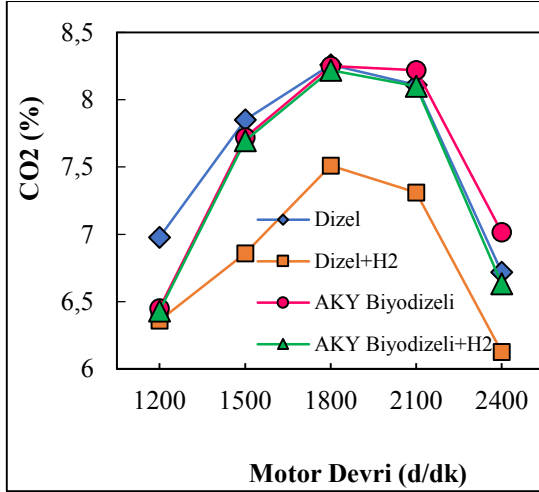


Şekil 3. BSFC ve motor devri

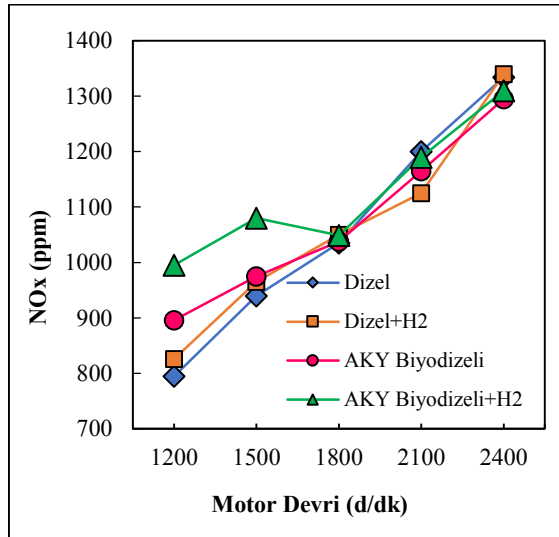
Şekil 2 ve 3'de motor torku ve BSFC (özgül yakıt tüketimi) ölçüm sonuçları farklı motor hızlarında gösterilmiştir. Sonuçlar açıkça hem dizel ve hem de biyodizel yakıtlar için H₂ zenginleştirmenin performans karakteristiğini geliştirdiğini göstermektedir. Küçük bir enerji katkısıyla bile, H₂ gazının üstün yanma özelliklerinin, BSFC değerlerini azalttığı gözlemlenmiştir. Tüm ortalama ölçümlere göre biyodizel kullanımı ile BSFC %13,81 arttığı belirlenmiştir. Deneyler, 5 l/dak H₂ zenginleşmesinin, dizel ve AKY biyodizeli için BSFC değerlerini sırasıyla %2,78 ve %6,34 azalttığını ortaya koymuştur.



Şekil 4. CO emisyonları



Şekil 5. CO₂ emisyonları



Şekil 6. NO_x emisyonları

Şekil 4-6, test motorunun egzoz emisyon ölçüm sonuçlarının grafikleridir. Sonuçlar, H₂ zenginliğinin karbon atomlarının yokluğu ve H₂ gazının iyi yanma özelliklerine bağlı olarak CO ve CO₂ emisyonlarını azalttığını açıkça göstermektedir. Aksine, H₂ ilavesi, H₂ yanması durumunda silindir içi sıcaklığın artması nedeniyle NO_x emisyonlarını artırdı. Ölçümler, sırasıyla H₂ gazı ile zenginleştirilmiş yakıtlar için dizel ve AKY biyodizeli için CO emisyonlarında %3,75 ve %4,23 oranında azalmaya neden olmuştur. Ayrıca H₂

zenginleştirilmesi, sırasıyla dizel ve AKY biyodizeli için CO₂ emisyonunu %9,89 ve %2,26 azaltmıştır. NO_x emisyonları, dizel AKY biyodizeline kıyasla, sırasıyla H₂ ile zenginleştirilmiş yakıtlar için sırasıyla, %1,13 ve %4,74 olmuştur.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, H₂ zenginleştirmesinin dizel ve AKY biyodizeli üzerindeki performansının, bir sıkıştırma ateşleme motorunun emisyon karakteristiğine olan etkilerini gözlemlemektir. Ayrıca, motorun titreşim seviyesini etkileyen emme manifoldundan AKY biyodizel ve hidrojen ilavesinin etkileri araştırılmıştır.

Deneyde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- H₂ zenginleştirme performansı artırır ve fren özgül yakıt tüketimini azaltır.
- H₂ zenginleştirilmesi CO ve CO₂ emisyonlarını azaltır ve NO_x emisyonlarını artırır.

KAYNAKLAR

1. Hoseini, S.S., Najafi, G., Ghobadian, B., Mamat, R., Sidik, N.A.C., Azmi, W.H., 2017. The Effect of Combustion Management on Diesel Engine Emissions Fueled with Biodiesel-diesel Blends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 307–331.
2. Çalık, A., 2018. Determination of Vibration Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated by Hydrogen Enriched Diesel and Biodiesel Fuels. *Fuel*, 230, 355–358.
3. Çalık, A., 2017. Pamuk Yağı Biyodizelinin Motor Ses Seviyesine Olan Etkilerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(4), 147–152.
4. Tüccar, G., 2018. Environmental Effects Effect of Hydroxy Gas Enrichment on Vibration, Noise and Combustion Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Foeniculum Vulgare oil Biodiesel and Diesel Fuel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 40(10), 1257–1265.

5. Musa, I.A., 2016. The Effects of Alcohol to Oil Molar Ratios and the Type of Alcohol on Biodiesel Production Using Transesterification Process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21–31.
6. Uludamar, E., Yildizhan, Ş., Aydin, K., Özcanlı, M., 2016. Vibration, Noise and Exhaust Emissions Analyses of an Unmodified Compression Ignition Engine Fuelled with Low Sulphur Diesel and Biodiesel Blends with Hydrogen Addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(26), 11481–11490.
7. Zhou, J.H., Cheung, C.S., Leung, C.W., 2014. Combustion, Performance, Regulated and Unregulated Emissions of a Diesel Engine with Hydrogen Addition. *Applied Energy*, 126, 1–12.
8. Ramadhas, A.S., Jayaraj, S., Muraleedharan, C., Padmakumari, K., 2006. Artificial Neural Networks Used for the Prediction of the Cetane Number of Biodiesel. *Renewable Energy*, 31(15), 2524–2533.
9. Yildizhan, Ş., Uludamar, E., Çalık, A., Dede, G., Özcanlı, M., 2017. Fuel Properties, Performance and Emission Characterization of Waste Cooking Oil (WCO) in a Variable Compression Ratio (VCR) Diesel Engine. *European Mechanical Science*, 1(2), 56–62.
10. Zareh, P., Zare, A.A., Ghobadian, B., 2017. Comparative Assessment of Performance and Emission Characteristics of Castor, Coconut and Waste Cooking Based Biodiesel as Fuel in a Diesel Engine. *Energy*, 139, 883–894.
11. Senthur Prabu, S., Asokan, M.A., Roy, R., Francis, S., Sreelekh, M.K., 2017. Performance, Combustion and Emission Characteristics of Diesel Engine Fuelled with Waste Cooking Oil Bio-diesel/diesel Blends with Additives. *Energy*, 122, 638–648.
12. Rehan, M., Gardy, J., Demirbas, A., Rashid, U., Budzianowski, W.M., Pant, D., Nizami, A.S., 2017. Waste to Biodiesel: A Preliminary Assessment for Saudi Arabia. *Bioresource Technology*.
13. Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H., Badruddin, I.A., Fayaz, H., 2013. Non-edible Vegetable Oils: A Critical Evaluation of Oil Extraction, Fatty Acid Compositions, Biodiesel Production, Characteristics, Engine Performance and Emissions Production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 211–245.
14. Hwang, J., Bae, C., Gupta, T., 2016. Application of Waste Cooking Oil (WCO) Biodiesel in a Compression Ignition Engine. *Fuel*, 176, 20–31.
15. Tan, Y.H., Abdullah, M.O., Nolasco-Hipolito, C., Zauzi, N.S.A., Abdullah, G.W., 2017. Engine Performance and Emissions Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Diesel-biodiesel-bioethanol Emulsions. *Energy Conversion and Management*, 132, 54–64.
16. Attia, A.M.A., Hassaneen, A.E., 2016. Influence of Diesel Fuel Blended with Biodiesel Produced from Waste Cooking Oil on Diesel Engine Performance. *Fuel*, 167, 316–328.
17. Cheung, C.S., Man, X.J., Fong, K.W., Tsang, O.K., 2015. Effect of Waste Cooking Oil Biodiesel on the Emissions of a Diesel Engine. *Energy Procedia*, 66, 93–96.
18. Elshaib, A.A., Kamal, M.M., Elahwany, A.A., 2014. Performance of a Diesel Engine Fueled by Waste Cooking Oil Biodiesel. *Journal of the Energy Institute*, 87(1), 11–17.
19. Arat, H.T., Sürer, M.G., 2017. State of Art of Hydrogen Usage as a Fuel on Aviation. *European Mechanical Science*, 2(1), 20–30.
20. Du, Y., Yu, X., Liu, L., Li, R., Zuo, X., Sun, Y., 2017. Effect of Addition of Hydrogen and Exhaust Gas Recirculation on Characteristics of Hydrogen Gasoline Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), 8288–8298.
21. Çelebi, K., Uludamar, E., Özcanlı, M., 2017. Evaluation of Fuel Consumption and Vibration Characteristic of a Compression Ignition Engine Fuelled with High Viscosity Biodiesel and Hydrogen Addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(36), 23379–23388.
22. Nguyen, T.A., Mikami, M., 2013. Effect of Hydrogen Addition to Intake Air on Combustion Noise from a Diesel Engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(10), 4153–4162.
23. Chiriac, R., Apostolescu, N., 2013. Emissions of a Diesel Engine Using B20 and Effects of Hydrogen Addition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(30), 13453–13462.
24. Bhasker, J.P., Porpatham, E., 2017. Effects of Compression Ratio and Hydrogen Addition on

- Lean Combustion Characteristics and Emission Formation in a Compressed Natural Gas Fuelled Spark Ignition Engine. *Fuel*, 208, 260–270.
25. Tüccar, G., Uludamar, E., 2017. Emission and Engine Performance Analysis of a Diesel Engine Using Hydrogen Enriched Pomegranate Seed Oil Biodiesel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 18014-18019.
 26. Uludamar, E., 2018. Effect of Hydroxy and Hydrogen Gas Addition on Diesel Engine Fuelled with Microalgae Biodiesel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(38), 18028-18036.
 27. Baltacıoğlu, M.K., Arat, H.T., Kenanoğlu, R., 2017. Exergy and Performance Analysis of a CI Engine Fuelled with HCNG Gaseous Fuel Enriched Biodiesel. *International Journal of Exergy*, 24, 39-56.
 28. Rimkus, A., Matijošius, J., Bogdevičius, M., Bereczky, Á., Török, Á., 2018. An Investigation of the Efficiency of Using O₂ and H₂ (hydroxile gas -HHO) Gas Additives in a CI Engine Operating on Diesel Fuel and Biodiesel. *Energy*, 152, 640–651.
 29. Chelladorai, P., Varuvel, E.G., Martin, L.J., Bedhannan, N., 2018. Synergistic Effect of Hydrogen Induction with Biofuel Obtained from Winery Waste (Grapeseed Oil) for CI Engine Application. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(27), 12473–12490.
 30. Serin, H., Yildizhan, Ş., 2018. Hydrogen Addition to Tea Seed Oil Biodiesel: Performance and Emission Characteristics. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 18020-18027.
 31. Canakci, M., Ozsezen, N., 2005. Evaluating Waste Cooking Oils as Alternative Diesel Fuel. *G.U. Journal of Science*, 18(1), 81–91.
 32. Rocha, H.M.Z., Pereira, R. da S., Nogueira, M.F.M., Belchior, C.R.P., Tostes, M.E. de L., 2017. Experimental Investigation of Hydrogen Addition in the Intake Air of Compressed Ignition Engines Running on Biodiesel Blend. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(7), 4530–4539.