



Atık Kızartma Yağı Biyodizeliyle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorun Yanma Performans ve Emisyon Özellikleri

Combustion Performance and Emission Characteristics of a Direct Injection Diesel Engine Fueled with Waste Frying Oil Biodiesel

Alper Calam 

Gazi Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Ankara, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: acalam@gazi.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 23.03.2019

Kabul Tarihi / Accepted: 07.08.2019

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI: 10.21205/deufmd.2020226410

Atıf şekli/How to cite: CALAM, A. (2020). Atık Kızartma Yağı Biyodizeliyle Çalışan Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorun Yanma Performans ve Emisyon Özellikleri. DEUFMD 22(64),97-106.

Öz

Bu çalışmada %50 atık kızartma yağı biyodizeli - %50 dizel yakıt karışımı (B50) ve saf atık kızartma yağı biyodizeli (B100) ile çalışan direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel motoru 1750 - 3000 d/d motor devri aralığında çalıştırılmıştır. Ayrıca maksimum tork devri olan 2200 d/d motor hızında 3,75, 7,5, 11,25 ve 15 Nm motor yüklerinde çalıştırılmıştır. Silindir içi basınç, ısı dağılımı, yanma süresi, motor momenti ve özgül yakıt tüketimi gibi yanma ve motor performans parametrelerinin değişimleri incelenmiştir. Ayrıca egzoz emisyonları da karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Karışım ve saf biyodizel yakıtı kullanımında tüm motor yüklerinde silindir içi basınç artış göstermiştir. Maksimum motor momentinin elde edildiği motor devrinde dizel yakıtına göre B50 ve B100 yakıtı kullanımında motor momenti sırası ile % 1,63 ve % 3,25 azalmıştır. Aynı deneysel şartları altında özgül yakıt tüketimi ise sırası ile % 7,63 ve %15,39 kötüleşmiştir. Biyodizel yakıtların kullanımında oksijen içeriği nedeniyle yanma süresi kısalmıştır. Tam yük şartları altında B50 ve B100 yakıtları kullanımında sırası ile CO emisyonları % 24,4 ve % 39,37 oranında azalmıştır. Aynı şartlarda NO_x emisyonları % 29,4 ve % 50,45 kötüleşmiştir. Oksijen içeriği B50 ve B100 yakıtlarının is emisyonlarını sırası ile % 58,8 ve % 69,25 oranında iyileştirmiştir. Sonuç olarak B50 yakıtı dizel motor üzerinde herhangi bir değişiklik yapılmaksızın kolayca kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Atık Kızartma Yağı, Biyodizel, Motor Performansı, Egzoz Emisyonları

Abstract

In the current study, combustion, engine performance and exhaust emissions of a direct injection diesel engine fuelled with the blends of 50% waste frying oil biodiesel - 50% diesel fuel and waste frying oil biodiesel were investigated experimentally. Test engine was operated between 1750 - 3000 rpm engine speed range. Also the test engine was run at 2200 rpm and 3.75, 7.5, 11.25 and 15 Nm engine loads. The variations of in-cylinder pressure, heat release, combustion duration, engine torque and specific fuel consumption were observed. In addition, exhaust emissions were also examined comparatively. While using the blended and waste biodiesel fuels, the in-cylinder pressure increased

for all engine loads. At the engine speed where maximum engine torque is obtained, engine torque decreased by 1.63 % and 3.25 %, respectively, when using B50 and B100 fuel compared to diesel fuel. Under the same test conditions, specific fuel consumption worsened by 7.63 % and 15.39 % respectively. While using the biodiesel fuels, combustion duration shortened because of the oxygen content. Under full load conditions, CO emissions were reduced by 24.4 % and 39.37 % respectively when using B50 and B100 fuels. Under the same conditions, NO_x emissions worsened by 29.4 % and 50.45 %. Oxygen content reduced the soot emissions of B50 and B100 fuels by 58.8 % and 69.25 % respectively. As a result, B50 could be easily used without engine modifications in diesel engine.

Keywords: Waste Frying Oil, Biodiesel, Engine Performance, Exhaust Emissions

1. Giriş

Son yıllarda petrol rezervlerinin azalması, petrol fiyatlarındaki dalgalanmalar ve çevresel kaygılar nedeniyle alternatif yakıtlara olan ilgi artış göstermiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilen alkoller ve biyodizel yakıtlar, artan enerji taleplerini karşılayarak aynı zamanda egzoz emisyonlarının azaltılması için cazip alternatif çözümler olarak karşımıza çıkmaktadır [1]. Dizel (CI) motorlar buji ile ateşlemeli (SI) motorlara göre daha düşük özgül yakıt tüketimi ve hidrokarbon (HC) emisyonlarına sahiptir. Bununla birlikte termik verimleri de daha yüksektir. CI motorlar ulaşım sektöründe ve elektrik üretimi amacıyla geniş bir kullanım ağına sahiptir. CI motorların en önemli dezavantajı olan azotoksit (NO_x), karbondioksit (CO₂) ve partikül madde (PM) emisyonlarının azaltılması gerekmektedir. Bu noktada, bitkisel yağlara dayalı biyodizel yakıtlar CI motorlar için kolay erişilebilir, toksik olmayan, düşük kükürt miktarına sahip ve alternatif bir enerji kaynağıdır [2-8].

Biyodizel bitkisel ve hayvansal yağlardan transesterifikasyon yöntemiyle elde edilmektedir. Ayrıca içeriğinde içeriğinde aromatikler ve sulfur bulundurmaması önemli bir avantajdır [9]. Bununla birlikte kütlelesel olarak %10-15 civarında oksijen içeriğine sahiptir [10]. Biyodizel yenilenebilir, biyolojik olarak parçalanabilir, toksik olmayan bir yakıttır ve dizel yakıtına benzer yanma karakteristiğine sahiptir. Bu nedenle direkt olarak ya da dizel yakıtı ile karışım yapılarak CI motorlarda kullanımı tercih edilmektedir [11]. Biyodizel ayrıca düşük volatilite, yüksek yoğunluk, yüksek viskozite ve yüksek akma noktası gibi bazı negatif yakıt özelliklerine de sahiptir [12]. Bu nedenle biyodizel yakıtı CI motorlarda dizel yakıtı ile karışım halinde kullanılmaktadır. Yakıtın fiziksel özellikleri CI motorlarda atomizasyon işlemi sürecinde oldukça önemlidir. Örneğin, biyodizelin viskozitesi, yakıt

damlacık büyüklüğünün dağılımında, yakıt enjeksiyonunun atomizasyon kalitesinde ve karışımın homojenitesinde çok etkilidir [13].

Setan sayısı, yakıtın tutuşma kalitesini gösteren ve yanma süresini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Setan sayısındaki artış, karbon zincirinin uzunluğu ile doğru orantılıdır. Tipik CI motorlarda 45 ile 60 arasında bir setan numarasında yakıt kullanımı idealdir ve setan sayısı 38'in altına düştüğünde yanma süresi oldukça uzamaktadır [14]. Biyodizel üretim prosesi setan sayısı, ısı değer, yoğunluk, viskozite vb. gibi yakıt özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Bitkisel yağların alkoller ile reaksiyonu olarak bilinen ve transesterifikasyon reaksiyonları olarak adlandırılan biyodizel üretimi esnasında zincir uzunluğu setan sayısını, ısı değeri ve viskoziteyi artırmaktadır [15-20].

Ayçiçek yağı ve ayçiçek yağı metil esteri bazı araştırmacılar tarafından CI motorlarda dizel yakıtı olarak kullanılmıştır. Bruwer vd [21], bir traktörde dizel yakıtı yerine ayçiçek yağını kullanmışlardır. Uzun süreli kullanımda gücün %8 oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Benzer bir çalışmada Tahir vd [22] tarafından gerçekleştirilmiş ve ayçiçek yağı oksidasyonunun motor parçaları üzerinde reçine kalıntılarına sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca ayçiçek yağının düşük sülfür içeriği sebebi ile metal parçalar üzerinde korozyonu azaltabileceğini rapor etmişlerdir. Engler vd [23], ham ayçiçek yağının yakıt olarak kullanımında karbon birikintilerini ve yağlama yağı kontaminasyon problemlerini tespit etmişlerdir. Van der Walt ve Hugo [24], ayçiçek yağının direkt ve indirekt enjeksiyonlu CI motorlarda yakıt olarak kullanılmışlardır. Bu çalışmada 2000 saat üzerinde gerçekleştirilen deneylerde indirekt CI motorlarda ayçiçek yağının olumsuz bir etkisi ile karşılaşmamışlardır. Ancak direkt enjeksiyonlu CI motorda enjektörlerin tıkanması ve yanma

odasında karbon birikintisi gibi bazı problemlerle karşılaşmışlardır. Hawkins vd [25], hacimsel olarak % 20 ayçiçek yağı % 80 dizel yakıtı karışımı kullanımında indirekt ve direkt CI motorlar için benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Bahsedilen motor problemleri genel olarak bitkisel yağların doğrudan kullanımı ile ilgili olsa da, uzun süreli kullanımlarda bazen başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Karaosmanoğlu vd [26,27], direkt enjeksiyonlu CI motorda 50 saat boyunca ayçiçek yağını yakıt olarak kullanmışlardır. Araştırmacılar güç ve yakıt tüketiminde önemli bir farklılık görmemiş ve testler sırasında herhangi bir motor problemi ile karşılaşmamışlardır. Aynı motorda Özaktaş'ın [28] gerçekleştirdiği çalışmada, hacimsel olarak % 20 ayçiçek yağı % 80 dizel yakıtı karışımının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Çalışmada yakıt karışımı kullanımında NO_x emisyonunun %62 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Ancak motor devrinin artışı ile beraber NO_x emisyonları arasındaki fark azalmıştır. Çanakçı vd [29], ön ısıtılmalı bir CI motorunda ayçiçek yağının motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Ayçiçek yağı kullanımında motor performansının fazla etkilenmediğini tespit etmişlerdir. Ayrıca CO₂ ve PM emisyonlarının sırası ile %2 ve %4,6 oranında azaldığını rapor etmişlerdir. Aynı zamanda ayçiçek yağı kullanımı ile ısı verim % 34 oranında artış göstermiştir. Usta vd [30], fındık ve atık ayçiçek yağı metil esterleri karışımının farklı motor yüklerinde motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. Çalışma, herhangi bir motor modifikasyonu ve ön ısıtma yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar altında yakıt karışımı kullanımı ile motor performansının ciddi oranda değişmediği belirtilmiştir. Lin vd. [31], dizel yakıtına hacimsel olarak % 5, % 10, % 20 ve % 30 oranında atık kızartma yağından ürettikleri biyodizel ekeyerek 4 farklı yakıt harmanı oluşturmuşlardır. Gerçekleştirdikleri çalışmada yakıt karışımı sonuçlarını saf dizel ile kıyaslamışlardır. İçeriğinde biyodizel bulunan yakıtların tamamı dizel yakıtına göre daha düşük PM, HC ve CO emisyonu açığa çıkmasına neden olmuştur. Can [4], atık kızartma yağından üretilen biyodizel dizel yakıt karışımlarının farklı motor yüklerinde motor performans ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemiştir. Bu çalışmada dizel yakıtına % 5 ve % 10 oranında biyodizel ilave edilmiş ve sonuçlar saf dizel yakıtı ile karşılaştırılmıştır. Yakıt karışımı

kullanımında yanma süresi dizel yakıtına göre uzamıştır ve yakıt tüketimi bir miktar artış göstermiştir. Biyodizel kullanımında silindir içi maksimum basınç, tam yük şartlarında dizel yakıtına göre değişkenlik göstermemiştir. Biyodizel ilavesi NO_x emisyonlarını bir miktar artırırken PM emisyonlarının azalmasına neden olmuştur. Aksoy [32], haşhaş yağından elde edilen biyodizel ile dizel yakıtını hacimsel olarak %50'şer oranda karıştırmış ve motor performansına etkilerini incelemiştir. Biyodizel dizel yakıt karışımı kullanımında motor torku ve motor gücü sırası ile % 4 ve % 5.73 oranında azalmıştır. Bunun yanı sıra özgül yakıt tüketiminin ortalama % 12 oranında kötüleşmesine neden olmuştur. Yazar, performans kaybı ve yakıt tüketimindeki kötüleşmeyi, haşhaş biyodizelinin alt ısı değerinin düşük olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir. Biyodizel dizel yakıt karışımı kullanımında CO ve NO_x emisyonlarının azaldığı ayrıca rapor edilmiştir.

Literatürdeki çalışmalar ayçiçek yağının ya da ayçiçek yağından üretilen biyodizel yakıtının çeşitli oranlarda dizel yakıtı ile karışımının motor performansı üzerine etkilerinin incelenmesi şeklindedir. Bu çalışmada ekosisteme oldukça fazla zararı bulunan atık kızartma yağından üretilen biyodizelin motor performansı, yanma ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Ayrıca karışım oranı olarak % 50 biyodizel %50 dizel yakıtı şeklinde yüksek bir biyodizel oranı belirlenmiştir. Bununla birlikte saf atık biyodizelin yanmaya etkisi incelenmiştir. Bunun için tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda, kullanılmıştır. Deneysel saf dizel yakıtı (D), hacimsel olarak %50 oranında dizel yakıtı ile karıştırılmış atık ayçiçek yağı metil ester (B50) ve %100 saf ayçiçek yağı metil ester (B100) kullanılmıştır. Deneysel çalışma farklı motor hızlarında ve dört farklı motor yükünde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada dizel yakıtı ile B50 ve B100 yakıtı kullanımında motor momenti, özgül yakıt tüketimi, yanma süresi ve egzoz emisyonlarının değişimi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada atık ayçiçek yağından transesterifikasyon metoduyla biyodizel yakıtı üretilmiştir. Bunun için katalizör olarak sodyum hidroksit kullanılmıştır. Ayrıca alkol olarak Merck marka metanol tercih edilmiştir. Biyodizel

üretiminde karıştırıcı ve ısıtıcı olarak WiseStir marka MSH-20D model ürün kullanılmıştır. Atık ayçiçek yağının biyodizel üretimi öncesinde yoğunluğu 922 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Bu çalışmanın gerçekleştirilebilmesi için dört zamanlı, doğal emişli, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir CI motoru kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1'de, deney düzeneğinin şematik görünümü ise Şekil 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

Marka/Model	Antor/6LD400
Silindir sayısı	1
Çap x Strok (mm)	86 x 68
Silindir hacmi (cm ³)	395
Sıkıştırma oranı	18:1
Maksimum güç (kW)	5.4 @ 3000 d/d
Maksimum tork (Nm)	19.6 @ 2200 d/d
Enjeksiyon basıncı (Bar)	180
Püskürtme avansı (°KA)	24 ÜÖN'dan önce

Test motoruna 4000 d/d motor devrinde 10kW güce kadar frenleme yapabilen Cussons marka P8160 model bir dinamometre ile yükleme işlemi yapılmıştır. Motor yükünün belirlenebilmesi için Tede-Huntleigh 1010 model yük hüsresi sensörü kullanılmıştır. Motor devrinin belirlenmesi ve sabit tutulabilmesi için dinamometre şaftı üzerinde manyetik sensör bulunmaktadır. Silindir içi basıncın ölçülebilmesi amacıyla AVL 8QP500c Quartz silindir içi basınç sensörü kullanılmıştır. Basınç sensörünün teknik özellikleri Tablo 2'de görülmektedir.

Silindir içi ham basınç sinyalleri Cussons P4110 yanma analiz cihazı ile toplanmış ve yükseltilmiştir. Alınan analog silindir içi basınç sinyalleri National Instruments marka USB 6259 model veri toplama kartında dijital sinyallere dönüştürülmüştür. Silindir içi pistonun konumunu belirlemek amacıyla krank mili üzerine bir enkoder bağlanmıştır. Enkoder her 0,36° krank açısında (KA) sinyal üretmektedir. Dolayısı ile bir çevrim için 2000 adet veri

kaydedilmektedir. Dönüştürülen silindir içi basınç sinyalleri ve pistonun pozisyonu bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir deney şartı için ardışık 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır.

Tablo 2. Silindir içi basınç sensörü teknik özellikleri

Özellik	AVL 8QP500c Quartz
Ölçüm aralığı (bar)	0-150
Hassasiyet (Pc/bar)	11,96
Lineerlik (%)	±0,6

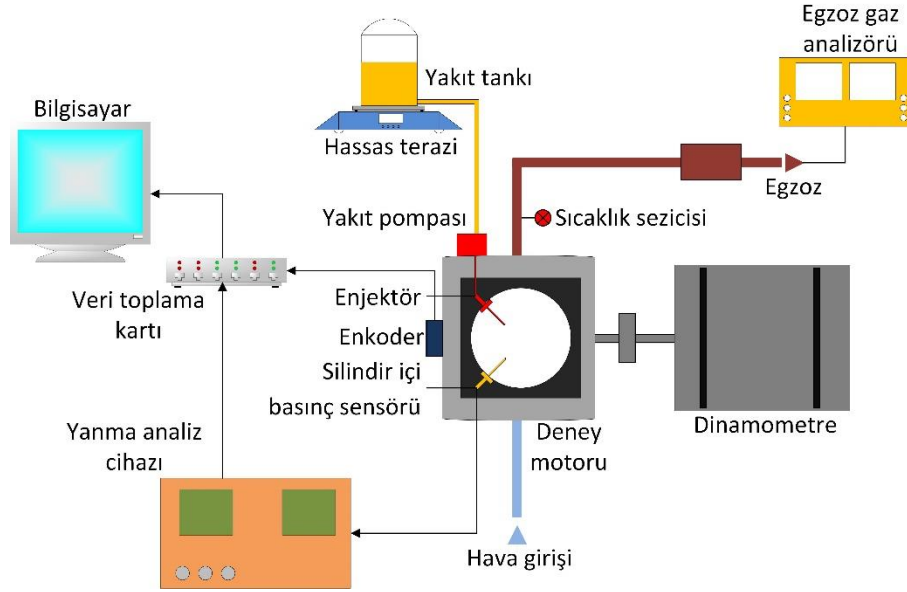
Motor ilk çalıştırılması esnasında dizel yakıtı kullanılmıştır. Yağ sıcaklığı 80 °C'ye ulaştığında kararlı bir çalışma sağlanmıştır ve tüm deneyler bu şartlar altında gerçekleştirilmiştir. Deney yakıtı olarak saf dizel, B50 ve B100 yakıtları kullanılmıştır. Deney yakıtlarının bazı özellikleri Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 3. Deney yakıtlarının özellikleri

Özellik	Dizel	B100
Alt ısı değer (kJ/kg)	45343	38795
Yoğunluk, 15 °C'de (kg/m ³)	831,9	888
Viskozite, 40 °C'de (kg/m ³)	3,348	4,8
Parlama noktası (°C)	65	147
Setan sayısı	55	58

Egzoz emisyonlarının tespit edilebilmesi için Testo marka egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri Tablo 4'de görülmektedir.

Çalışmada is emisyonlarının ölçülebilmesi amacıyla AVL marka DiSmoke 4000 model kısmi akışlı opazimetre kullanılmıştır. Emisyon cihazının teknik özellikleri Tablo 5'de görülmektedir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü

Tablo 4. Egzoz gaz analizörü teknik özellikleri

	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
CO (ppm)	0-10000	5
CO ₂ (vol %)	0-50	±0,3 vol %+1 mV% (0-25 vol %)
O ₂ (vol %)	0-25	±2 mV
HC (%)	0,01-4	<400 ppm (100- 4000 ppm)
NO _x (ppm)	0-3000	5

Tablo 5. İş emisyonu teknik özellikleri

Özellik	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
Opazite (%)	0-100	0,1
K değeri (m ⁻¹)	0-99,99	0,01

Silindir içi basıncı, ardışık 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Çevrim başına 2000 veri kaydedilirken 50 çevrimde toplam 100000 verinin ortalaması alınmıştır. Bunun için MATLAB programlama kodu kullanılarak bir

algoritma hazırlanmıştır. MATLAB algoritması kullanılarak silindir içi basıncı, ısı yayılım oranı ve yanma süresi hesaplanmıştır. Isı yayılım oranının belirlenebilmesi için termodinamiğin birinci yasasından faydalanılmıştır. Bu nedenle bir çevrim boyunca kütle ve gaz kaçıkları ihmal edilmiştir. Silindirden silindir duvarına gerçekleşen ısı transferi, ısı yayılım oranını belirlemek için hesaplanmıştır. Krank açısına bağlı olarak ısı yayılım oranı Eş. 1 ile hesaplanmıştır.

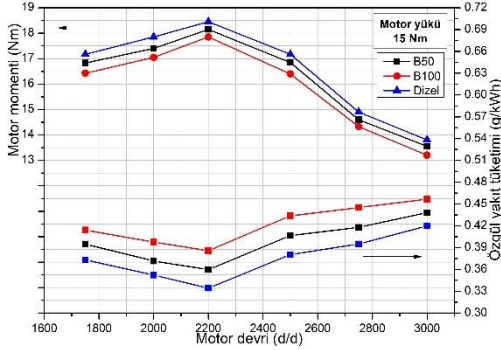
$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{isi}}{d\theta} \quad (1)$$

Burada dQ net ısı çıkışıdır, P ve V silindir basıncı ve silindir hacmidir. $d\theta$ krank açısının değişimi ve k özgül ısıların oranıdır. $\frac{dQ_{isi}}{d\theta}$ ise silindirden silindir duvarına ısı transferini ifade etmektedir.

3. Bulgular

Şekil 2'de motor momenti ve özgül yakıt tüketiminin motor devrine bağlı değişimi görülmektedir. B50 ve B100 yakıtı kullanımında tüm motor devirlerinde dizel yakıtına göre motor momenti bir miktar azalırken, özgül yakıt tüketimi bir miktar artış göstermiştir. Bu durum

biyodizelin enerji içeriğinin dizel yakıtına göre daha düşük olması nedeniyle oldukça normaldir. Biyodizel yakıtı kullanımında, dizel yakıtı kullanımı ile benzer miktarda motor momenti elde edilebilmesi için daha fazla yakıt tüketilir. Tablo 3’de görüldüğü gibi biyodizelin alt ısı değeri dizele göre yaklaşık %8-10 daha düşüktür.



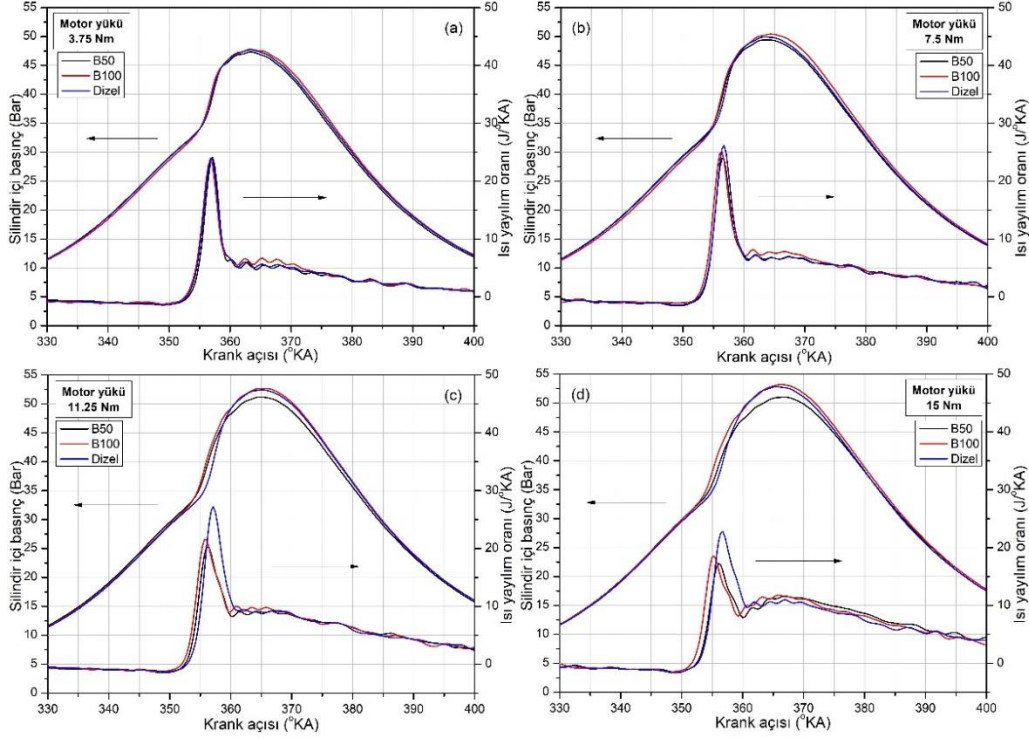
Şekil 2. Motor momenti ve özgül yakıt tüketiminin değişimi

Tüm deney yakıtlarında maksimum motor momenti 2200 d/d'da elde edilmiştir. Maksimum motor momentinin elde edildiği motor devrinde dizel yakıtına göre B50 ve B100 yakıtları sırası ile %1,63 ve %3,25 azalmıştır. Aynı şartlar altında dizel yakıtına göre B50 ve B100 yakıtlarının özgül yakıt tüketimi sırası ile %7,63 ve %15,39 oranında artış göstermiştir. Özgül yakıt tüketimi 1 kW güç üretmek için tüketilen yakıtın kütlesini ifade etmektedir. Test motorunda motor yükü püskürtülen yakıtın hacmi ile kontrol edilmektedir. Yüksek yoğunluğa sahip olması nedeniyle biyodizel yakıtı, dizel yakıtına göre daha fazla miktarda yanma odasına püskürtülmektedir. Bu durum özgül yakıt tüketiminin artmasını sağlar [33,34].

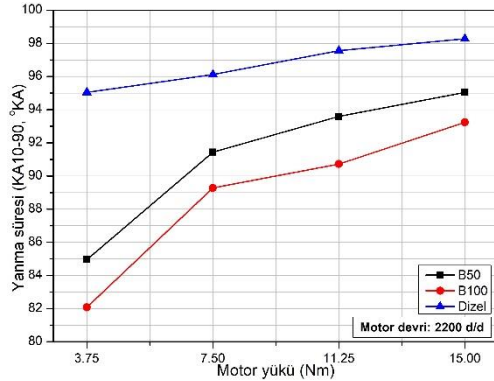
Şekil 3’de dizel, B50 ve B100 yakıtları kullanımında silindir içi basınç ve ısı yayılım oranlarının farklı motor yüklerindeki değişimi görülmektedir. Motor yükünün artırılması ile ısı yayılımının bir miktar avansa alındığı görülmektedir. Şekil 3 (a) ve Şekil 3 (b) incelendiğinde düşük motor yüklerinde silindir içi basıncın tüm yakıtlar ile benzer sonuçlar verdiği görülürken motor yükünün artırılması ile Şekil 3 (c) ve Şekil 3 (d)’de görüldüğü gibi biyodizel yakıtları ile dizel yakıtına göre daha yüksek silindir içi basınç elde edilmiştir. Ayrıca motor yükünün artırılması maksimum silindir içi basıncın bir miktar gecikmeye alınmasını sağlamıştır. Biyodizel yakıtının içeriğinde oksijen olması özellikle yüksek motor yüklerinde

açıya çıkan ısı enerjisini artırmaktadır. Düşük yüklerde B50 ve B100 yakıtları kullanımı ile vuruntu eğiliminden sözedilebilir. Düşük motor yüklerinde maksimum silindir içi basınç üst ölü noktaya (ÜÖN) oldukça yakın bir yerde elde edilirken, dizel yakıtı ile elde edilen silindir içi basınç biyodizel yakıtlara göre yüksektir. Tam yük şartlarında ise yanma gecikmeye alınarak ÜÖN’den bir miktar uzaklaşmıştır. Biyodizelin oksijen içeriğine sahip olması yanmayı iyileştirerek maksimum silindir içi basıncın B100 yakıtı kullanımında elde edilmektedir. Motor yükünün artırılması tutuşma gecikmesi süresinin kılmasına neden olmaktadır. Silindir içerisinde daha fazla miktarda yakıtın yanması silindir içi sıcaklığı artırarak yanmanın iyileşmesine neden olmaktadır. Bunun nedeni yakıtın daha erken bir krank açısında buharlaşıp tutuşmaya başlayarak yanmasına neden olmasıdır. Sonuç olarak tutuşma gecikmesi süresi kılalmaktadır. Tutuşma gecikmesi yakıtın yoğunluğuna, setan sayısına ve viskozitesine bağlıdır. Tablo 3 incelendiğinde biyodizel yakıtının bu değerlerinin dizel yakından fazla olduğu görülmektedir. Bu nedenle biyodizel yakıtlarının tutuşma gecikmesi süresi dizele göre daha fazladır. Bu çalışmada yüksek motor yüklerinde B50 ve B100 yakıtının dizel yakıtına göre daha iyi performans gösterdiği ifade edilebilir.

Şekil 4’de motor yüküne bağlı olarak test yakıtlarının yanma süreleri görülmektedir. Düşük motor yüklerinde krank açısı cinsinden test yakıtlarının yanma süresi arasında oldukça fark olduğu görülmektedir. Ancak motor yükünün artırılması test yakıtları arasındaki farkın azalmasını sağlamıştır. Tüm motor yüklerinde en uzun yanma süresi dizel yakıtı ile elde edildiği Şekil 4’de görülmektedir. B100 yakıtı ile minimum yanma süresi elde edilmiştir. Bunun nedeni biyodizel yakıtının ısı değerinin dizel yakıtına yakın olmasıyla birlikte içeriğindeki oksijen, oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmış olmasıdır. Yakıt moleküllerinin oksijen ile hızlı bir reaksiyona girmesi yanma süresinin kılmasını sağlamaktadır. Böylece yanma süresi dizel yakıtına göre B50 ve B100 yakıtları ile kılalmıştır.



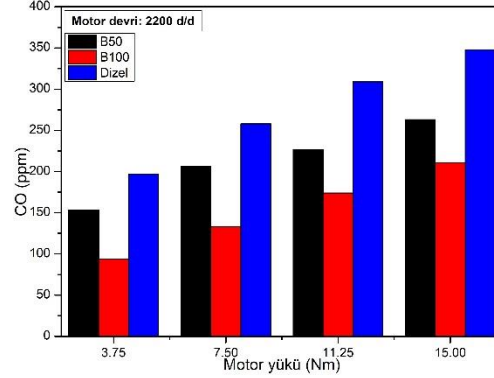
Şekil 3. Motor yüküne bağlı olarak silindir içi basınç ve ısı yayılım oranının değişimi



Şekil 4. Yanma süresinin değişimi

Şekil 5'de CO emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi görülmektedir. En yüksek CO emisyonu değerleri tüm yüklerde dizel yakıtı ile elde edilmiştir. Yüke bağlı olarak silindire püskürtülen yakıt miktarı arttıkça oksijen konsantrasyonu azalmakta ve tam yanma gerçekleşmediği için CO emisyonları artış göstermektedir. Biyodizel içeriğindeki oksijen yanmayı iyileştirmektedir. Bu nedenle tüm yük şartlarında en düşük CO emisyonu değerleri B50

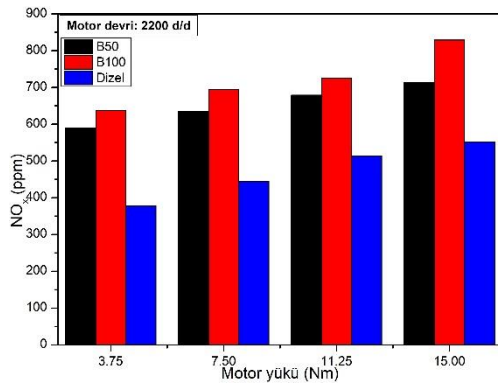
ve B100 yakıtı ile elde edilmiştir. Tam yük şartları altında B50 ve B100 yakıtları kullanımında CO emisyonları dizel yakıtına göre sırası ile %24,4 ve %39,37 oranlarında iyileşme göstermiştir.



Şekil 5. CO emisyonlarının değişimi

Şekil 6'da NO_x emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi görülmektedir. Bitkisel yağlardan elde edilen biyodizel yakıtların en önemli problemi yanma sonu yüksek NO_x salınımdır. NO_x oluşu yanma sonu yüksek gaz sıcaklıkları, yakıt içeriğindeki oksijen ve hızlı gerçekleşen

oksidasyon reaksiyonlarına bağlıdır [35]. Biyodizel yakıtı kullanılan bir dizel motorda yüksek NO_x salınımının temel sebebi yakıt içerisindeki oksijen konsantrasyonudur. Bu nedenle yanma işlemi boyunca oksidasyon reaksiyonları hızlı gerçekleşir ve yanma odasında yüksek gaz sıcaklıkları elde edilir. Böylece NO_x emisyonları artar [36,37]. Şekil 6 incelendiğinde motor yükünün artırılması ile silindir içerisine sürülen enerji miktarı da artış göstermekte ve yanma sonu gaz sıcaklıklarının artmasına bağlı olarak NO_x emisyonları artış göstermektedir. En yüksek NO_x emisyonu biyodizel yakıtları kullanımı ile elde edilmiştir. Tam yük şartları altında B50 ve B100 yakıtları kullanımında NO_x emisyonları dizel yakıtına göre sırası ile %29,4 ve %50,45 oranlarında kötüleşmiştir.

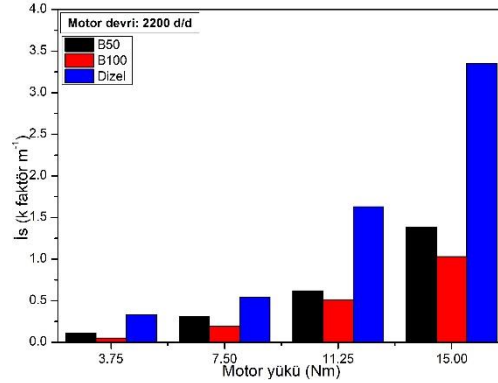


Şekil 6. NO_x emisyonlarının değişimi

Şekil 7'de is emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi görülmektedir. Şekil 7 incelendiğinde motor yükünün artırılması ile tüm yakıtlarda is emisyonları artış göstermektedir.

Silindire püskürtülen yakıt miktarının artırılması oksidasyon reaksiyonlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca tam yük şartlarında oksijen konsantrasyonunun azalması ile zengin karışım bölgeleri artış göstermektedir. Bu durum is emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Biyodizelin oksijen içeriği yanmayı iyileştirerek is emisyonlarını sağlamaktadır. Tam yük şartları altında is emisyonları B50 ve B100 yakıtları kullanımında dizel yakıtına göre sırası ile %58,8 ve %69,25 oranlarında iyileşme gerçekleşmiştir. B50 ve B100 yakıtı kullanımında is emisyonlarının ciddi oranda azaldığı görülmektedir. Partikül maddeler, is, birçok uçucu ve çözünmeyen maddelerin oluşturduğu yoğunluk duman koyuluğu ile ifade edilmektedir. Özellikle, oksijenin yetersiz olduğu yanma bölgelerinde uzun zincirli HC

moleküllerin termal olarak kırılması sonucu is emisyonları oluşmaktadır [38]. Biyodizel yakıtı kullanımında is emisyonları önemli ölçüde azalmıştır. Daha iyi oksidasyon reaksiyonları ve tam yanma, daha yüksek oksijen içeriği nedeniyle B50 ve B100 yakıtları, daha düşük is emisyonlarına neden olmuştur.



Şekil 7. Is emisyonlarının değişimi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada atık ayçiçek yağından üretilen biyodizel yakıtının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi incelenmiştir. B50 ve B100 yakıtlarının dizel yakıtları ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Biyodizelin viskozitesinin ve yoğunluğunun yüksek olması B50 ve B100 yakıtları kullanımında motor momentinin azalmasına ve özgül yakıt tüketiminin artış göstermesine neden olmuştur. Tam yük şartları altında ise B50 ve B100 yakıtının dizele göre daha yüksek silindir içi basınç elde edildiği gözlemlenmiştir. Motor yükü ve kullanılan yakıt içeriğindeki biyodizel miktarındaki artış yanma süresinin uzamasına neden olmuştur. Tam yük şartları altında biyodizelin oksijen içeriği CO ve is emisyonlarının dizel yakıtına göre daha düşük olmasını sağlamıştır. Ancak biyodizel içerisindeki oksijen aynı zamanda yanmayı iyileştirdiğinden NO_x emisyonlarının dizel yakıtına göre kötüleşmesine neden olmuştur.

Kaynakça

- [1] Imdadul, H. K., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Zulkifli, N. W. M., Alabdulkarem, A., Kamruzzaman, M., Rashed, M. M. A. 2016. Comparative study of C4 and C5 alcohol treated diesel-biodiesel blends in terms of diesel engine performance and exhaust emission, *Fuel*, Cilt. 179, s. 281-288. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.04.003
- [2] Uyumaz, A., Solmaz, H., Yilmaz, E., Yamık, H., Polat, S. 2014. Experimental examination of the effects of military aviation fuel JP-8 and biodiesel fuel blends on the engine performance, exhaust emissions and combustion in a direct injection engine, *Fuel Processing Technology*, Cilt. 128, s. 158-165. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.07.013
- [3] Çelikten, I., Mutlu, E., Solmaz, H. 2012. Variation of performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, rapeseed oil and hazelnut oil methyl ester blends, *Renewable Energy*, Cilt. 48, s. 122-126. DOI: 10.1016/j.renene.2012.04.040
- [4] Can, Ö. 2014. Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture, *Energy Conversion and Management*, Cilt. 87, s. 676-686. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.07.066
- [5] How, H. G., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Teoh, Y. H., Chuah, H. G. 2018. Effect of *Calophyllum Inophyllum* biodiesel-diesel blends on combustion, performance, exhaust particulate matter and gaseous emissions in a multi-cylinder diesel engine, *Fuel*, Cilt. 227, s. 154-164. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.04.075
- [6] Jayed, M. H., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Mahlia, T. M. I., Husnawan, M., Liaquat, A. M. 2011. Prospects of dedicated biodiesel engine vehicles in Malaysia and Indonesia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 15(1), s. 220-235. DOI: 10.1016/j.rser.2010.09.002
- [7] Tamilselvan, P., Nallusamy, N., Rajkumar, S. A. 2017. Comprehensive review on performance, combustion and emission characteristics of biodiesel fuelled diesel engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 79, s. 1134-1159. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.176
- [8] Bueno, A. V., Pereira, M. P. B., Oliveira, J. V. P., Luna, F. M. T., Cavalcante, Jr C. L. 2017. Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends, *Applied Thermal Engineering*, Cilt. 125, s. 559-566. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.114
- [9] Rashedul, H. K., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Ashraful, A. M., Rahman, S. A., Shahir, S. A. 2014. The effect of additives on properties, performance and emission of biodiesel fuelled compression ignition engine, *Energy Conversion and Management*, Cilt. 88, s. 348-364. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.08.034
- [10] Al_Dawody, M. F., Bhatti, S. K. 2014. Experimental and computational investigations for combustion, performance and emission parameters of a diesel engine fueled with soybean biodiesel-diesel blends, *Energy Procedia*, Cilt. 52, s. 421-430. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.094
- [11] Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., Alenezi, R. 2017. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines-A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 72, s. 497-509. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.001
- [12] How, H. G., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Teoh, Y. H. 2014. Engine performance, emission and combustion characteristics of a common-rail diesel engine fuelled with bioethanol as a fuel additive in coconut oil biodiesel blends, *Energy Procedia*, 61, 1655-1659. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.12.185
- [13] Yasin, M. H. M., Mamat, R., Yusop, A. F., Rahim, R., Aziz, A., Shah, L. A. 2013. Fuel physical characteristics of biodiesel blend fuels with alcohol as additives, *Procedia Engineering*, Cilt. 53, s. 701-706. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.091
- [14] Campos-Fernandez, J., Arnal, J. M., Gomez, J., Lacalle, N., Dorado, M. P. 2013. Performance tests of a diesel engine fueled with pentanol/diesel fuel blends, *Fuel*, Cilt. 107, s. 866-872. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.01.066
- [15] Niemi, S. A., Illikainen, P. E., Mäkinen, M. L., Laiho, V. O. 1997. Performance and exhaust emissions of a tractor engine using mustard seed oil as fuel, *SAE Technical Paper*, No. 970219. DOI: 10.4271/970219
- [16] Halek, F., Delavari, A., Kavousi-rahim, A. 2013. Production of biodiesel as a renewable energy source from castor oil, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Cilt. 15(6), s. 1063-1068. DOI: 10.1007/s10098-012-0570-6
- [17] Wilkes, M. A., Takei, I., Caldwell, R. A., Trethowan, R. M. 2013. The effect of genotype and environment on biodiesel quality prepared from Indian mustard (*Brassica juncea*) grown in Australia, *Industrial Crops and Products*, Cilt. 48, s. 124-132. DOI: 10.1016/j.indcrop.2013.04.016
- [18] Lapuerta, M., Armas, O., Rodriguez-Fernandez, J. 2008. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions, *Progress in Energy and Combustion Science*, Cilt. 34(2), s. 198-223. DOI: 10.1016/j.pecs.2007.07.001
- [19] Ghazali, W. N. M. W., Mamat, R., Masjuki, H. H., Najafi, G. 2015. Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 51, s. 585-602. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.031
- [20] Srithar, K., Balasubramanian, K. A., Pavendan, V., Kumar, B. A. 2017. Experimental investigations on mixing of two biodiesels blended with diesel as alternative fuel for diesel engines, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, Cilt. 29(1), s. 50-56. DOI: 10.1016/j.jksues.2014.04.008
- [21] Bruwer, J. J., Hugo, F. J. C., Hawkins, C. 1980. Sunflower seed oil as an extender for diesel fuel in agricultural tractors, *Symposium of the South African Institute of Agricultural Engineers*.
- [22] Tahir, A. R., Lapp, H. M., Buchanan, L. C. 1982. Sunflower oil as a fuel for compression ignition engines, *University of Manitoba, Department of Agricultural Engineering, M.Sc., 82s., Winnipeg*.
- [23] Engler, C. R., Johnson, L. A., Lepori, W. A., Yarbrough, C. M. 1983. Effects of processing and chemical

- characteristics of plant oils on performance of an indirect-injection diesel engine, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, Cilt. 60(8), s. 1592-1596. DOI: 10.1007/BF02666591
- [24] Van der Walt, A. N., Hugo, F. J. C. 1982. Attempts to prevent injector cooking with sunflower oil by engine modifications and fuel additives, *Vegetable Oil Fuels-Proceedings of the International Conference on Plant and Vegetable Oils as Fuels*, 2 Ağustos, Fargo.
- [25] Hawkins, C. S., Fuls, J., Hugo, F. J. C. 1983. Engine durability tests with sunflower oil in an indirect injection diesel engine, *SAE Technical Paper*, No. 831357. DOI: 10.4271/831357
- [26] Karaosmanoğlu, F., Kurt, G., Özaktaş, T. 2000. Long term CI engine test of sunflower oil, *Renewable energy*, Cilt. 19(1-2), s. 219-221. DOI: 10.1016/S0960-1481(99)00034-8
- [27] Karaosmanoğlu, F., Kurt, G., Ozaktas, T. 2000. Direct use of sunflower oil as a compression-ignition engine fuel, *Energy Sources*, Cilt. 22(7), s. 659-672. DOI: 10.1080/00908310050045618
- [28] Özaktas, T. 2000. Compression ignition engine fuel properties of a used sunflower oil-diesel fuel blend, *Energy Sources*, Cilt. 22(4), s. 377-382. DOI: 10.1080/00908310050013974
- [29] Çanakci, M., Ozsezen, A. N., Turkcan, A. 2009. Combustion analysis of preheated crude sunflower oil in an IDI diesel engine, *Biomass and Bioenergy*, Cilt. 33(5), s. 760-767. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.11.003
- [30] Usta, N., Öztürk, E., Can, Ö., Conkur, E. S., Nas, S., Con, A. H., Topcu, M. 2005. Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine, *Energy Conversion and Management*, Cilt. 46(5), s. 741-755. DOI: 10.1016/j.enconman.2004.05.001
- [31] Lin, Y. C., Hsu, K. H., Chen, C. B. 2011. Experimental investigation of the performance and emissions of a heavy-duty diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel/ultra-low sulfur diesel blends, *Energy*, Cilt. 36(1), s. 241-248. DOI: 10.1016/j.energy.2010.10.045
- [32] Aksoy, F. 2011. The effect of opium poppy oil diesel fuel mixture on engine performance and emissions, *International Journal of Environmental Science & Technology*, Cilt. 8(1), s. 57-62.
- [33] Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., Hountalas, D. T., Giakoumis, E. G., Andritsakis, E. C. 2008. Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel of sunflower or cottonseed oils derived from Greek feedstock, *Fuel*, Cilt. 87(2), s. 147-157. DOI: 10.1016/j.fuel.2007.04.011
- [34] Özsezen, A. N., Canakci, M., Turkcan A., Sayin C. 2009. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters, *Fuel*, Cilt. 88(4), s. 629-636. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.09.023
- [35] Heywood, J. B. 1988. *Combustion in compression-ignition engines. Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-hill, New York.
- [36] Palash, S. M., Kalam, M. A., Masjuki, H. H., Masum, B. M., Fattah, I. R., & Mofijur, M. 2013. Impacts of biodiesel combustion on NOx emissions and their reduction approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cilt. 23, s. 473-490. DOI: 10.1016/j.rser.2013.03.003
- [37] Uyumaz, A. 2018. Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with mustard oil biodiesel fuel blends at different engine loads, *Fuel*, Cilt. 212, s. 256-267. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.09.005
- [38] Önsezen, A., ve Çanakçı, M. 2009. Atık palmye ve kanola yağı metil esterlerinin kullanıldığı direkt püskürtmeli bir dizel motorda performans ve yanma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt. 24(2), s. 275-284.