



## Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunda Atık Zeytinyağı Biyodizelinin Yanma, Performans ve Emisyon Karakteristikleri

Ahmet UYUMAZ<sup>1,\*</sup>, Fahrettin BOZ<sup>1</sup>, Şükrü Ayhan BAYDIR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Programı, 15100, Burdur/Türkiye

<sup>2</sup>Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 03200, Afyonkarahisar/Türkiye

### Öz

Bu çalışmada tek silindirli, direkt enjeksiyonlu bir dizel motoru atık zeytinyağından elde edilen biyodizel ve dizel yakıt karışımları ile çalıştırılmış, yanma, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler motorun maksimum tork devri olan 2200 rpm, 3,75, 7,5, 11,5, 15 ve 18,75 Nm motor yüklerinde sabit emme havası giriş sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Motor yükü arttıkça silindir basıncı ve ısı dağılımı artmıştır. Orta ve yüksek motor yüklerinde karışım yakıtlardaki biyodizel miktarı arttıkça maksimum silindir basıncının arttığı görülmüştür. Biyodizelin ısı değerinin dizele göre düşük olmasından dolayı tüm motor yüklerinde karışım yakıtlar ile ısı verim azalmıştır. Maksimum ısı verim B10 ve B20 yakıtı ile tam yükte dizele göre sırasıyla % 7,1 ve %11,7 azalmıştır. Karışım yakıtlardaki biyodizel miktarı arttıkça karbonmonoksit (CO) ve is emisyonları azalmış, azot oksit (NO<sub>x</sub>) emisyonu artmıştır. Tam yükte B10 ve B20 ile sırasıyla NO<sub>x</sub> %1,5 ve %7,5 artış göstermiştir. Sonuç olarak dizel motorunda hiçbir değişiklik yapılmadan dizel-atık zeytinyağı biyodizeli karışımlarının kullanılabilceği görülmüştür.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 30/05/2017

Düzeltilme: 02/11/2017

Kabul: 20/11/2017

### Anahtar Kelimeler

Atık zeytinyağı biyodizeli

Yanma

Motor performansı

Egzoz emisyonları

### Keywords

Waste olive oil biodiesel

Combustion

Engine performance

Exhaust emissions

## Combustion, Performance and Emission Characteristics of Waste Olive Oil Biodiesel in a Direct Injection Diesel Engine

### Abstract

In this study, a single cylinder, direct injection diesel engine was run with biodiesel from waste olive oil and the effects of diesel-biodiesel fuel blends on combustion, engine performance and exhaust emissions were investigated experimentally. The experiments were performed at maximum engine torque speed 2200 rpm, and constant intake air temperature 3.75, 7.5, 11.25, 15 and 18.75 Nm brake torques. In-cylinder pressure and heat release rate increased with the increase of engine load. Maximum in-cylinder pressure increased with the usage of fuel blends at medium and high engine loads. Thermal efficiency decreased with biodiesel fuel blends at all engine loads due to lower heating value of biodiesel than diesel. Maximum thermal efficiency decreased by about 7.1 % ve 11.7% with B10 and B20 according to diesel at full load respectively. CO and soot emissions reduced with the increase of biodiesel fraction in fuel blends. However NO<sub>x</sub> increased. NO<sub>x</sub> increased 1.5 % and 7.5% with B10 and B20 compared to diesel at full load respectively. As a result, it was seen that diesel engine can be operated efficiently with diesel-waste cooking oil biodiesel fuel blends without any modification.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

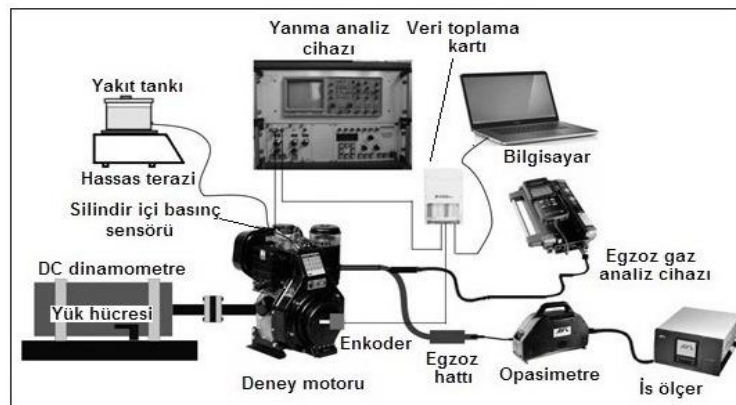
Petrol kökenli yakıt rezervlerin tükenmesi, küresel ısınma, çevreye ve doğaya verilen zararın her geçen gün artması araştırmacıları yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Meydana gelen zararın büyük bir kısmı taşıtlarda kullanılan içten yanmalı motorlardan kaynaklanan egzoz emisyonlarıdır [1-8]. Bu noktada özellikle ulaşımda ve taşımacılıkta yaygın bir şekilde kullanılan dizel motorda kullanılabilecek çevreci ve alternatif yakıtlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bitkisel ve hayvansal yağlardan elde edilen

\*İletişim yazarı, e-mail: [auyumaz@mehmetakif.edu.tr](mailto:auyumaz@mehmetakif.edu.tr)

biyodizel hem enerji bakımından dizele yakın özellik göstermekte hem de dizele göre zararlı egzoz emisyonları azaltılabilmektedir. Bunun yanında dizel motorlarda detaylı değişikliğe gidilmeden kolay bir şekilde kullanılabilir [5-12]. Biyodizelin depolama kolaylığı, sülfür içeriğinin az olması, yüksek setan sayısı önemli avantajları arasındadır. Ancak oksijen içeriği nedeni ile  $\text{NO}_x$  oluşumu ve dizel yakıtına göre kalorifik enerjisi düşük olduğu için yakıt tüketimi artmakta, elde edilen ısı verim azalmaktadır. Dizel yakıtına yakın motor performansı elde edilmekte, CO ve is emisyonları azaltılabilmektedir. Bu amaçla sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda farklı motor parametrelerinde biyodizel çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada yaygın bir şekilde kullanılan atık zeytinyağı biyodizel üretiminde oldukça önemli bir potansiyele sahiptir [9-17]. Behçet ve arkadaşları [18] atık kızartma yağı-dizel yakıt karışımlarını (B25, B50, B80) bir dizel motorunda test etmiş, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Değişken motor devirlerinde yapılan deneylerde dizele göre karışım yakıtlar ile güç ve tork azalmış, yakıt tüketimi artmıştır. Bununla birlikte karışım yakıtların kullanımı ile karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ve CO emisyonlarında azalma,  $\text{NO}_x$  emisyonlarında ise artış tespit etmişlerdir. Can [19] atık kızartma yağı biyodizelini hacimsel olarak %5 ve %10 oranlarında dizel yakıtı ile karıştırmıştır. Yakıtları tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda 2200 rpm motor devrinde ve farklı yüklerde (0,48, 0,36, 0,24, 0,12 MPa) test etmiştir. Biyodizel-dizel karışım yakıtlarının kullanımı ile özgül yakıt tüketiminde dizel yakıtına göre yaklaşık % 4 artış, ısı veriminde ise %2,8 azalma gözlemlenmiştir. Biyodizel-dizel karışımları ile  $\text{NO}_x$  emisyonlarının %8,7 arttığını, duman ve hidrokarbon (HC) emisyonlarının azaldığını belirlemiştir. Çelik [1] organik esaslı manganesi pamuk yağı metil esterine 4  $\mu\text{mol/L}$ , 8  $\mu\text{mol/L}$ , 12  $\mu\text{mol/L}$  and 16  $\mu\text{mol/L}$  oranlarında ilave etmiş, yanma performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. 12  $\mu\text{mol/L}$  karışım oranının en iyi performansı verdiğini ifade etmiştir. Organik esaslı manganesi ilavesi ile özgül yakıt tüketiminin ve motor torkunun arttığını belirlemiştir. Dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında C0Mn12 yakıtı ile CO, HC ve is emisyonlarının sırasıyla % 11,63, %5,02 ve % 3,93 azaldığını göstermiştir. Can ve arkadaşları [20] soya yağı biyodizel-dizel karışımının (B20) ve egzoz gazı dönüşümünün (EGR) yanma, performans ve emisyonlar üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 3,75, 7,5, 11,25, 15 Nm motor yüklerinde ve % 5, 10, 15 EGR oranlarında yapılan deneylerde %15 EGR oranında özgül yakıt tüketiminin %6 arttığını, ısı veriminin %3 azaldığını belirlemişlerdir. Aynı zamanda yüksek motor yüklerinde  $\text{NO}_x$  ve is emisyonlarının sırasıyla %55 ve %15 oranlarında azaldığını tespit etmişlerdir. Bu çalışmada, atık zeytinyağından üretilen biyodizel ve dizel yakıtı karışımlarının (B10, B20) yanma karakteristikleri tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, doğal emişli bir dizel motorunda detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Deneyler 2200 rpm motor devrinde ve 3,75, 7,5, 11,25, 15, 18,75 Nm motor yüklerinde gerçekleştirilmiştir. Silindir basıncı, ısı dağılımı, tutuşma gecikmesi, yanma süresi ve kümülatif ısı dağılımı gibi yanma karakteristikleri, motor performans ve emisyon parametrelerinin değişimleri deneysel olarak araştırılmıştır.

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

Atık zeytinyağı biyodizelinin yanma, performans ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla, deney motoru 2200 rpm motor devrinde ve farklı yüklerinde (3,75, 7,5, 11,25, 15 ve 18,75 Nm) çalıştırılmıştır. Deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de görülmektedir. Deneyler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü İçten Yanmalı Motorlar Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü**

Deneylerde tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, doğal emişli bir dizel motoru kullanılmıştır. Deney motorunun teknik özellikleri Tablo 1’de verilmektedir. Deneyler sabit emme havası girişi (25°C) ve motor yağ sıcaklıklarında (80°C±1) gerçekleştirilmiştir. Her deney öncesi motor çalışma sıcaklığına kadar ısıtılmış ve ölçümler bundan sonra yapılmıştır. Deney motoru Cussons P8160 test yatağına bağlanmış ve doğru akım (DC) dinamometre ile yüklenmiştir. Dinamometre 4000 rpm motor devrinde 10 kW güç absorbe edebilmektedir. Motor yükü strain gauge yük hücresi ile belirlenebilmektedir. Bununla birlikte motor devrinin ölçülebilmesi için manyetik pick-up sensör kullanılmıştır. Motor yağı ve emme havası giriş sıcaklıkları K tipi termokupllar ile ölçülmüş ve deneyler sırasında sıcaklıklar sabit tutulmuştur.

**Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri**

Model	Antor / 6LD400
Motor tipi	Direkt enjeksiyon, doğal emişli
Silindir sayısı	1
ÇapxKurs [mm]	86 x 68
Silindir hacmi [cm <sup>3</sup> ]	395
Sıkıştırma oranı	18:1
Maksimum güç [kW]	5,4 @ 3000 rpm
Maksimum tork [Nm]	19,6 @ 2200 rpm
Yanma odası geometrisi	ω tipi
Yakıt enjeksiyon sistemi	PF Jerk tipi yakıt pompası
Enjeksiyon nozulu	0.24 [mm] x 4 delik x 160°
Nozul açılma basıncı [bar]	180
Püskürtme zamanlaması [°KA]	24 Üst ölü noktadan (ÜÖN) önce
Supap zamanlaması	
Emme açılma / Emme kapanma [°KA]	7,5 ÜÖN’den önce /25,5 Alt ölü noktadan (AÖN) sonra
Egzoz açılma / Egzoz kapanma [°KA]	21 AÖN’den önce / 3 ÜÖN’den sonra

Deney yakıtları dizel ve biyodizel yakıtlarının hacimsel olarak karıştırılması ile elde edilmiştir. Deneylerde dizel, B10 (%10 biyodizel-%90 dizel), B20 (%20 biyodizel-%80 dizel) olmak üzere üç farklı yakıt kullanılmıştır. Deney yakıtlarının özellikleri Tablo 2’de görülmektedir. Biyodizel ham atık zeytin yağından transesterifikasyon yöntemi ile elde edilmiştir.

**Tablo 2. Deney yakıtlarının özellikleri [21-27]**

	Dizel	B10	B20
Distilasyon (°C)			
IBP	159,73	153,74	147,6
FBP	372,3	369	364,02
Kükürt (mg/kg)	7,2	6,1	4,8
Yakıtın alt ısı değeri [kJ/kg]	45343	-	-
Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> @15°C]	826,5	831,86	838
Kinematik viskozite [mm <sup>2</sup> /s, 40°C]	2,78	3,177	3,318
Su, mg/kg	23,2	88,70	204,52

Silindir basıncının ölçülmesi için AVL 8QP500c quartz model su soğutmalı basınç sensörü kullanılmıştır. Silindir basıncı verileri basınç sensöründen alındıktan sonra Cussons P4110 model yanma analiz cihazı ile yükseltilmiş ve analog bilgiler veri toplama kartına gönderilmiştir. National Instruments USB 6259 marka veri toplama kartı ile analog silindir basınç verileri dijital verilere dönüştürülmüştür. Dijital basınç verileri daha sonra bilgisayar kaydedilmiştir. Motor devrinin ve üst ölü nokta (ÜÖN) bilgilerinin tespit edilmesi için deney motorunun krank miline bir turda 360 pals üreten enkoder monte edilmiştir. Krank açısı bilgisi 0,36 °KA aralıklarla ölçülmüştür. Çevrimsel farklılıkların etkisini azaltmak amacıyla 50

ardışık çevrimin silindir basınçlarının ortalaması alınmıştır. Yanma analizini gerçekleştirmek için silindir basıncı değerleri kullanılarak ısı dağılımı, yanma başlangıcı ve yanma süresi gibi yanma karakteristikleri belirlenmiştir. Bu amaçla Matlab kullanılarak bir program geliştirilmiş ve silindir basıncı verileri işlenmiştir. Tablo 3’de Testo egzoz gaz analiz cihazının özellikleri verilmektedir.

**Tablo 3. Testo egzoz gaz analiz cihazının özellikleri**

Yanma ürünleri	Çalışma aralığı	Doğruluk
O <sub>2</sub> [vol.%]	0–25	±2 mV
CO [ppm]	0–10000	5 ppm (0–99 ppm)
CO <sub>2</sub> [vol.%]	0–50	±0.3 vol.% + 1 mV.% (0–25) vol.% (0–25 vol.%)
HC [%]	0.01–4	<400 ppm (100–4000 ppm)
NO <sub>x</sub> [ppm]	0–3000	5 ppm (0–99 ppm)

Deneylerde is emisyonları teknik özellikleri Tablo 4’de verilen AVL Di-Smoke 4000 is ölçer ile ölçülmüştür.

**Tablo 4. AVL Di-Smoke 4000 is ölçerin teknik özellikleri**

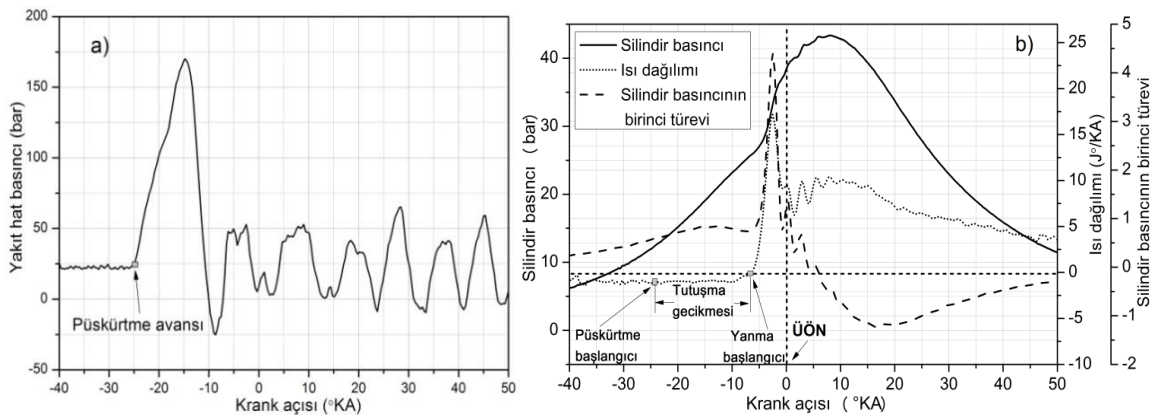
Analiz cihazı	AVL DiSmoke 4000	
Ölçüm metodu	Kısmi akışlı	
	Opasite	K değeri
Çalışma aralığı	0-100 %	Doğruluk
		0,1 %
Doğruluk [m <sup>-1</sup> ]	0-99,99	0,01

Deneylerde sabit motor devrinde motor yüküne bağlı ısıl verim ve yanma karakteristikleri gibi değişkenler belirlenmiştir. Isı dağılımı termodinamiğin birinci yasasına bağlı olarak silindir basıncı kullanılarak belirlenmiştir. Isı dağılımı hesaplanırken silindir içi şarj dolgusunun ideal gaz olduğu kabulü yapılmıştır. Bununla birlikte silindirde supaplardan ve segmanlardan gaz kaçaklarının olmadığı kabul edilmiştir [24-27]. Isı dağılımını hesaplamak için eşitlik (1) kullanılmıştır.

$$\frac{dQ}{d\theta} = \frac{k}{k-1} P \frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{k-1} V \frac{dP}{d\theta} + \frac{dQ_{heat}}{d\theta}$$

1

Eşitlik (1)’de  $dQ$ ,  $dQ_{heat}$  ve  $d\theta$  sırasıyla ısı dağılımı, silindir cidarlarına transfer edilen ısıyı ve krank açısını göstermektedir.  $k$  ise özgül ısıların oranını ifade etmektedir. Yanma analizi için silindir basıncı ve yakıt hat basıncının belirlenmesi önemlidir. Şekil 2-a krank açısına bağlı yakıt hat basıncının değişimini göstermektedir. Silindir basıncı, ısı dağılımı ve silindir basıncının birinci türevi Şekil 2-b’de görülmektedir.

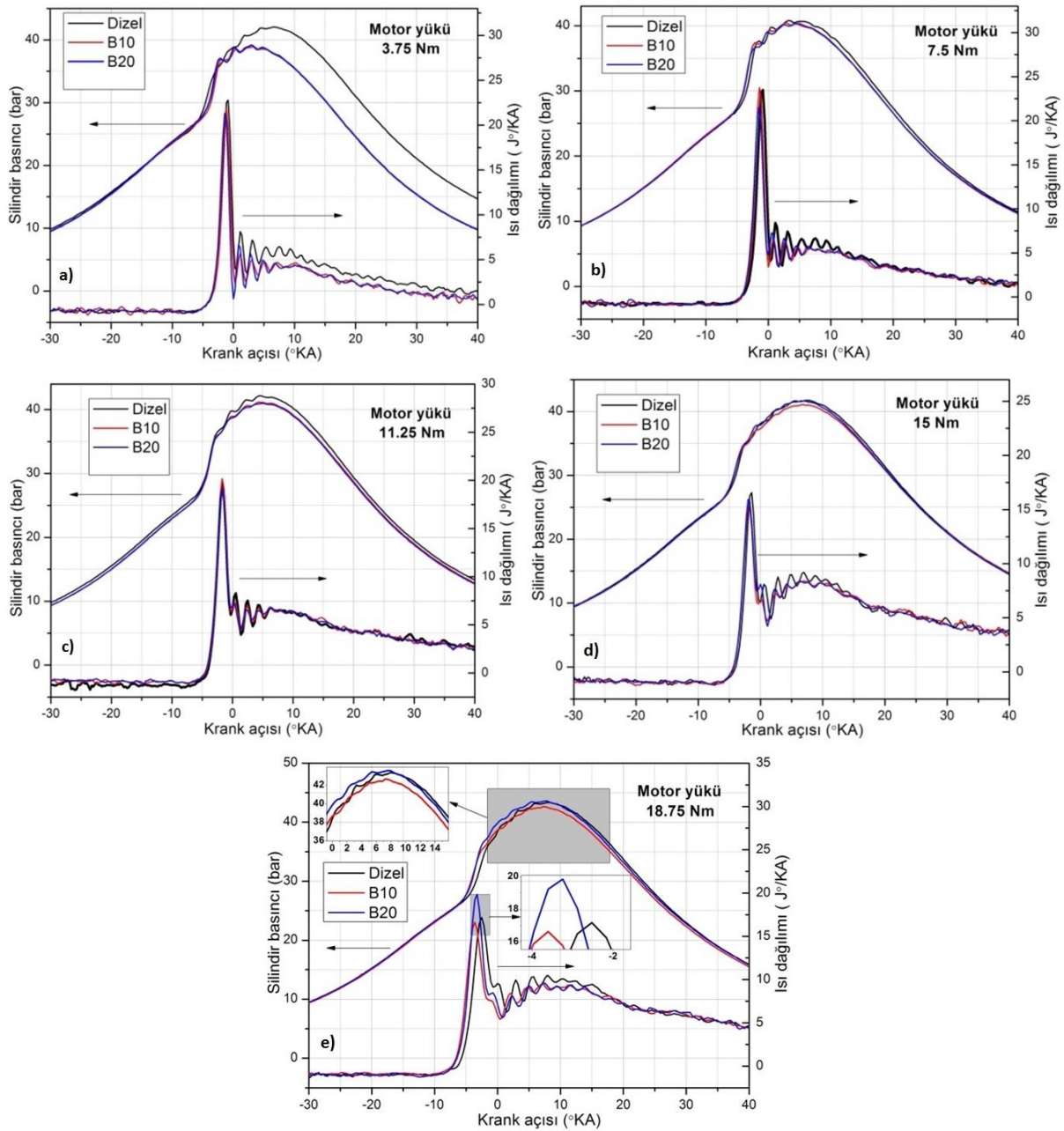


**Şekil 2.** a) Yakıt hat basıncı b) Silindir basıncı, ısı dağılımı ve silindir basıncının birinci türevi

Yapılan deneylerde yanma başlangıcı krank açısına göre ısı dağılımının negatif değerden pozitif değere yükseldiği nokta olarak kabul edilmiştir. Püskürtme başlangıcı ile yanma başlangıcı arasındaki süre tutuşma gecikmesini göstermektedir. Yanma sonunun tam olarak belirlenmesi güçtür. Silindirden duvarlara gerçekleşen ısı transferi ve yanma odasındaki termodinamik şartla değişmektedir. Bu çalışmada yanma sonu karışımın % 90'ının yanmasını tamamladığı nokta olarak kabul edilmiştir.

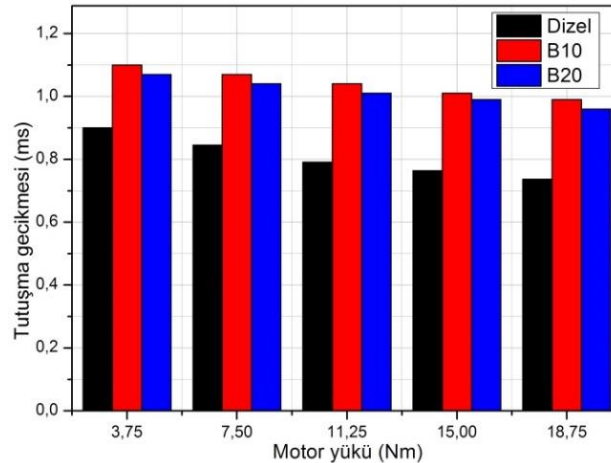
### 3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Atık zeytin yağı biyodizelinin dizel motorlarda kullanımı, yanma, performans ve emisyon üzerindeki etkileri detaylı incelenmelidir.



**Şekil 3.** a-3,75 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı dağılımı b-7,5 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı dağılımı c-11,25 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı dağılımı d-15 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı dağılımı e-18,75 Nm motor yükü için silindir basıncı ve ısı dağılımı

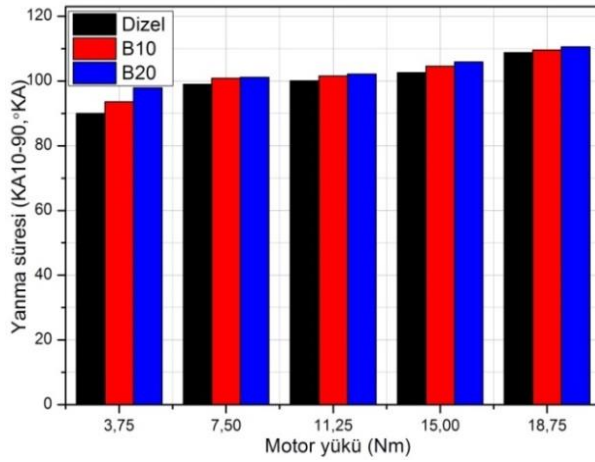
Şekil 3 dizel ve biyodizel yakıt karışımlarının motor yüküne göre silindir basıncı ve ısı dağılımı üzerindeki etkilerini göstermektedir. Dizel yanmasında ön karışimli yanma ve difüzyon yanma safhaları görülmektedir. Motor yükü arttıkça ısı dağılımının ÜÖN'dan öne doğru alındığı görülmektedir. Buna benzer şekilde motor torku arttıkça biyodizel ile elde edilen basınç ve ısı dağılımlarının dizele göre arttığı görülmektedir. Şekil 3 incelendiğinde düşük yüklerde B10 ve B20 ile elde edilen silindir basıncı değerlerinin dizelden az olduğu görülmektedir. Fakat şekil 3'te görüldüğü gibi tam yükte (18,75 Nm) maksimum silindir basıncı ve ısı dağılımı B20 yakıtı ile elde edilmiştir. Bununla birlikte motor yükü arttıkça maksimum silindir basıncının daha geç elde edildiğini ifade etmek mümkündür. Özellikle yüksek motor yüklerinde biyodizelin oksijen içeriğinin fazla olması, dizele yakın ısıl enerjisinin olması açığa çıkan ısı enerjisini arttırmaktadır. Düşük yükte B10 ve B20 yakıtları ile bir vuruntu temayülünden bahsetmek mümkündür. 3,75 Nm motor yükünde maksimum silindir basıncı ÜÖN yakınlarında elde edilmiş ve maksimum ısı dağılımı azalmıştır. Motor yükü 7,5 Nm'ye çıkarıldığında karışım yakıtlar ile maksimum silindir basıncı dizele ulaşmakta ve elde edilen basınçlar ÜÖN'ı geçtikten sonra (5-6 KA) elde edilmektedir. Motor yükü daha da artırıldığında B10 ve B20 yakıtları benzer silindir basıncı değişimi göstermektedir ve ısı dağılımları arasında çok fazla fark bulunmamaktadır. 15 Nm yükte B10 ve B20 yakıtları ile vuruntu eğilimi azalmakta B20 yakıtı ile dizele göre daha fazla silindir basıncı elde edilmektedir. Tam yükte maksimum silindir basıncı B20 ile elde edilmiştir. Biyodizelin oksijen içeriği yanmayı iyileştirmekte ve daha fazla basıncın açığa çıktığı görülmektedir. Şekil 4 test yakıtları ile motor yüküne bağlı tutuşma gecikmesi sürelerini göstermektedir. Tutuşma gecikmesi yakıtın setan sayısı, yoğunluğu ve viskozite değerlerine göre değişmektedir. Motor yükü arttıkça tutuşma gecikmesi süreleri kısalmaktadır. Silindir içinde daha fazla karışım kütesinin yanması silindir sıcaklığını arttırmakta, yanma şartları iyileşmektedir. Bu durum yakıtın daha erken buharlaşması ve tutuşmaya başlayarak yanmasına neden olmaktadır. Sonuçta tutuşma gecikmesi süresi kısalmaktadır. Biyodizel yakıt karışımları ile tutuşma gecikmesi süreleri artmıştır. Biyodizelin ısıl değerinin düşük olması, viskozite ve yoğunluğunun yüksek olması tutuşma gecikmesini arttırmaktadır. Bu noktada biyodizel karışımları içinde en uygun yakıtın B20 olduğunu ifade etmek mümkündür. Daha yüksek setan sayısı ve B20 yakıtındaki daha fazla oksijen içeriği, karışımın reaktivitesi artırarak tutuşma gecikmesini düşürmüştür. Literatüre bakıldığında bir noktadan sonra karışımdaki biyodizel oranının artmasıyla, viskozite artışının yakıtın atomizasyonunu kötüleştirdiği ve tutuşma gecikmesi süresini uzattığı görülmektedir.



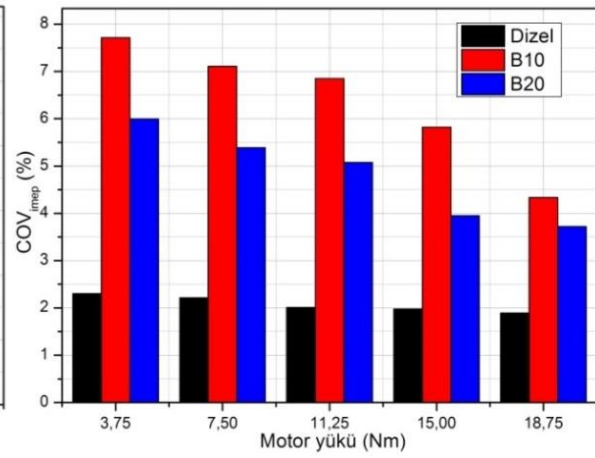
Şekil 4. Tutuşma gecikmesi

Şekil 5'de yanma süresinin motor yüküne göre değişimini görülmektedir. Düşük motor yükünde tüm yakıtlar için yanma süresi krank açısı cinsinden kısadır ve aralarında belirgin bir fark görülmektedir. Ancak yük arttıkça yanma süreleri arasındaki bu fark azalmaktadır. Düşük ve yüksek motor yükleri arasında yanma süresi arasındaki fark artmaktadır. Tüm motor yüklerinde maksimum yanma süresi B20 ile elde edilmiştir. Yüksek yoğunluk ve viskoziteye sahip biyodizelin yanmasını tamamlaması için daha fazla süreye ihtiyaç duyulmaktadır. Yanma odasına çevrimden çevrime alınan karışımın kompozisyonu ve termodinamik haller değişmektedir. Yanmasını tamamlayamamış hidrokarbonlar ve art egzoz gazları bir sonraki çevrime aktarılmaktadır. Bunun sonucunda çevrimsel farklılıklar görülmektedir. Şekil 6'da çevrimsel farklılıkların değişimi görülmektedir. Özellikle düşük motor yüklerinde B10 ve B20 yakıtları

ile dizele göre daha kontrolsüz bir yanma gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda karışım yakıtlar ile çevrimsel farklılıklar artış göstermektedir.

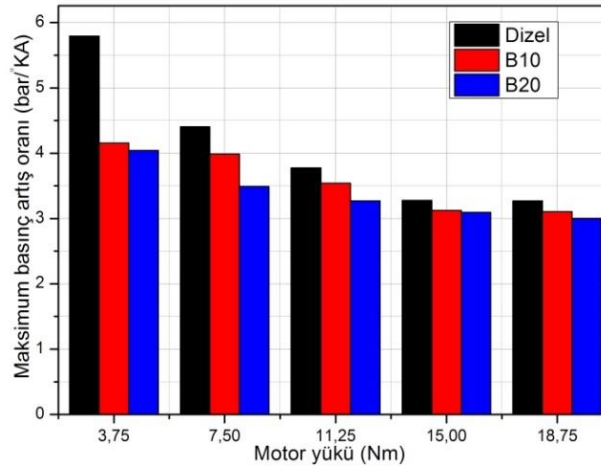


Şekil 5. Yanma süresinin değişimi



Şekil 6. Çevrimsel farklılıklar

Literatürde çevrimsel farklılıkların %10'u geçmemesi istenmektedir [22-27]. Şekil 6 incelendiğinde bu tüm motor yüklerinde bu değer aşılmadığı görülmektedir. Tam yükte B10 ve B20 ile elde edilen  $COV_{imep}$  değerleri arasındaki fark azalmıştır. Maksimum çevrimsel farklılıklar B10 ve B20 ile 3,75 Nm motor yükünde sırasıyla %7,71 ve %5,99 hesaplanmıştır. Yük arttıkça yakıt ile oksijen molekülleri daha kolay buluşma imkanı bulmakta, bunun sonucunda silindir cidar sıcaklığı yükselmektedir. Yanmaya daha elverişli bir yanma odası olduğundan daha stabil bir yanma gerçekleşmektedir. Şekil 7'de motor yüküne göre maksimum basınç artış oranının değişimi görülmektedir. 3,75 Nm yükte maksimum basınç artışı dizel ile elde edilmiştir. Yük arttığında tüm yakıtlar için maksimum basınç artışı azalmaktadır. Tüm yüklerde minimum basınç artışı B20 ile elde edilmiştir. Tam yükte dizel, B10 ve B20 ile sırasıyla 3,27, 3,10 ve 3,00 bar/KA maksimum basınç artış oranı hesaplanmıştır.

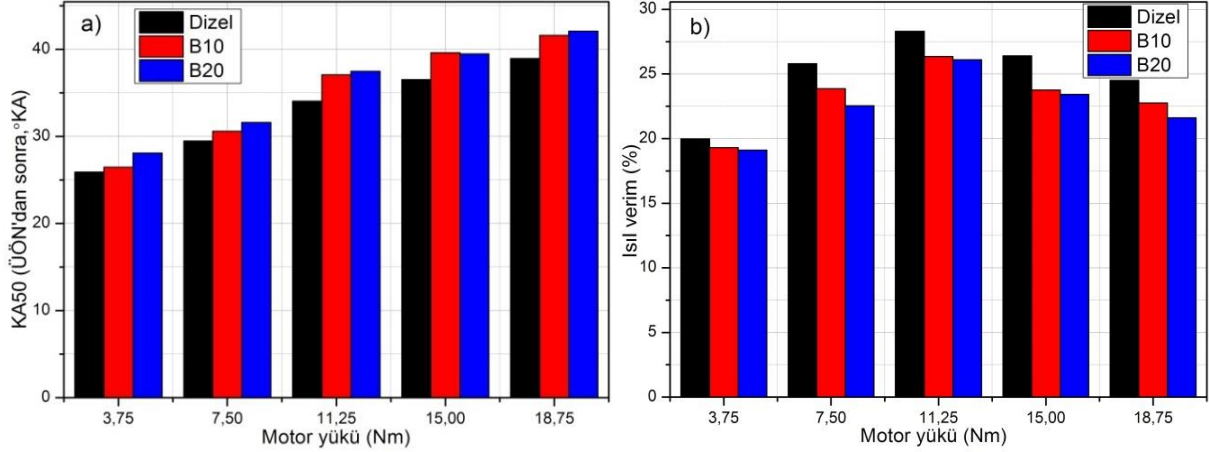


Şekil 7. Maksimum basınç artış oranının motor yüküne göre değişimi

Şekil 8-a ve Şekil 8-b KA50 ve ısı verim değerlerinin değişimini göstermektedir. Yüksek ısı verim için KA50 ÜÖN'dan hemen sonra elde edilmelidir. Bu noktada KA50 ve hesaplanan ısı verimleri arasında uyum görülmektedir. Maksimum KA50 tüm yüklerde B20 ile elde edildiğinden minimum ısı verim bu test yakıtı ile hesaplanmıştır. Dizelin ısı değeri biyodizelden yüksek olduğundan maksimum ısı verim dizel ile elde edilmiştir. Maksimum ısı verim 11,25 Nm yükte dizel, B10 ve B20 ile sırasıyla %28,3, %26,35 ve %26,09 olarak hesaplanmıştır. Karışımındaki biyodizel oranı arttıkça ısı verim azalmaktadır. Tam yükte ise ısı verim B10 ve B20 yakıtı ile sırasıyla dizele göre %7,1 ve %11,7 azalmıştır. Yüksek motor yüklerinde yanma odasında oksijen konsantrasyonu azalmakta, yakıtın oksidasyonu kötüleşmektedir. Bununla birlikte birim hacimde silindire kütlece püskürtülen biyodizel yakıt miktarı arttığından aynı gücü

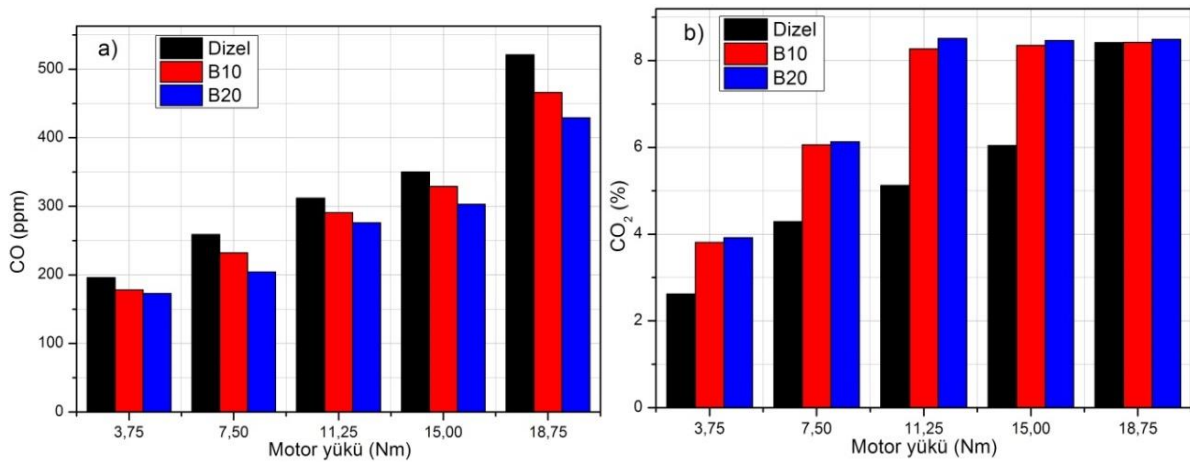
motorun üretebilmesi için daha fazla yakıt tüketmek zorunda kalmaktadır. Sonuçta ısı verim azalmaktadır.

CO yetersiz sıcaklık ve oksijen miktarına bağlı olarak açığa çıkan eksik yanma ürünüdür [22-27]. Yanma odasındaki oksijen konsantrasyonu eksikliği yakıtın oksidasyonunu yavaşlatır ve CO oluşumu görülür.



Şekil 8. KA50 ve ısı verim

Şekil 9-a'da motor yüküne bağlı CO emisyonunun değişimi görülmektedir. Dizel ile ölçülen CO tüm yüklerde karışım yakıtlardan fazladır. Yük arttıkça yanma odasında oksijen konsantrasyonu azaldığı için CO oluşumu artmaktadır. Tam yanma gerçekleşmemekte CO açığa çıkmaktadır. Bunun yanında biyodizelin oksijen içermesi tam yanma işlemini iyileştirmekte ve yanma kalitesi artabilmektedir. Bunun sonucunda yeterli oksijeni bulabilen yakıt tutuşarak yanmasını tamamlayabilmektedir. Tam yükte (18,75 Nm) B10 ve B20 yakıtı ile dizele göre CO sırasıyla % 10,5 ve % 17,6 azalmıştır. Şekil 9-b'de CO<sub>2</sub> emisyonunun değişimi görülmektedir. CO<sub>2</sub> benzer şekilde yük arttıkça tüm yakıtlar için artış göstermektedir. Fakat CO emisyonundan farklı olarak karışımındaki biyodizel miktarı arttığında CO<sub>2</sub> artmaktadır. Motor yükünün artması yanma odasına sürülen ve oksidasyonu sağlanan yakıt miktarının ve silindir sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Yeterli sıcaklık ile yakıtın yanmasını tamamlaması ve CO<sub>2</sub> oluşumu görülmektedir. 18,75 Nm motor yükünde CO dizel, B10 ve B20 yakıtı ile sırasıyla %8,41, %8,42 ve %8,49 ölçülmüştür. Şekil 10-a'da NO<sub>x</sub> emisyonunun değişimi görülmektedir. Yüksek yanma sonu gaz sıcaklıklarında azot ve oksijen molekülleri reaksiyona girerek NO<sub>x</sub> emisyonlarını açığa çıkarır [5, 9, 24-26]. Şekil 10-a incelendiğinde motor yükü arttıkça oksidasyon reaksiyonlarına katılan yakıt miktarı artmakta, yanma sonu gaz sıcaklığı yükselmektedir.

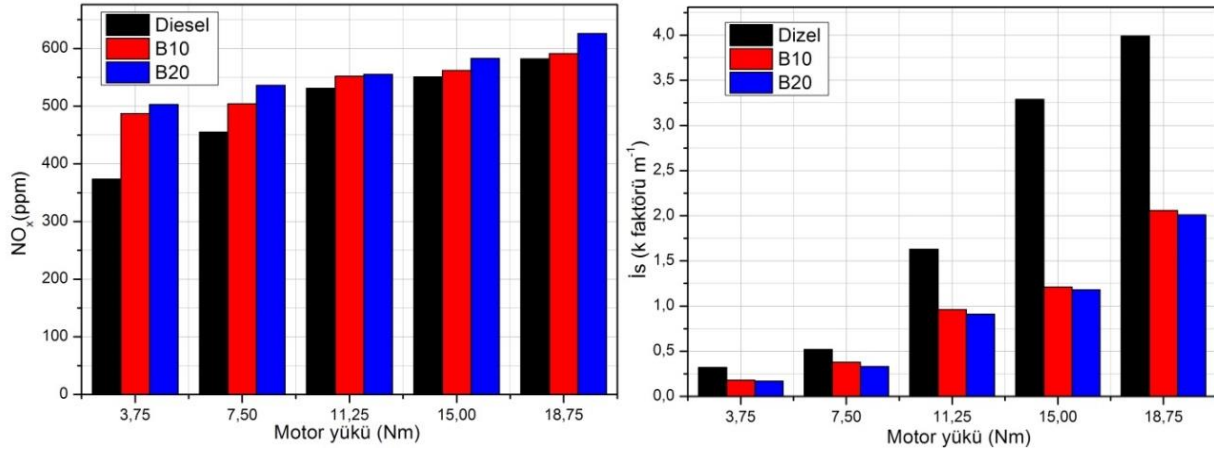


Şekil 9. CO ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının değişimi

NO<sub>x</sub> yüksek yanma sonu gaz sıcaklıklarında meydana geldiğinden artmaktadır. Aynı zamanda her bir motor yükü için maksimum NO<sub>x</sub> B20 ile ölçülmüştür. Biyodizelin yoğunluğunun ve oksijen içeriğinin fazla olması yanma sonu gaz sıcaklığının ve NO<sub>x</sub> emisyonlarının artmasına neden olmaktadır. Tam yükte



B10 ve B20 ile dizele göre  $NO_x$  sırasıyla %1,5 ve %7,5 artmıştır. Şekil 10-b'de motor yüküne bağlı is emisyonlarının değişimi görülmektedir. Atık zeytinyağı biyodizelinin en önemli etkilerinden biri is emisyonları üzerindedir. Motor yükü arttıkça tüm yakıtlar için is oluşumu artmaktadır. Silindire sürülen yakıtın artması oksidasyon reaksiyonlarını kötüleştirmektedir. Bununla birlikte yanma odasında oksijen konsantrasyonunun azalması kısmi zengin karışım bölgelerinin oluşmasına ve is emisyonlarının açığa çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 10. a)  $NO_x$  emisyonunun değişimi b) Is emisyonunun değişimi

Ölçülen is emisyonları karşılaştırıldığında dizel ve karışım yakıtlar arasında büyük farkların olduğu görülmektedir. Tam yükte (18,75 Nm) B10 ve B20 yakıtları ile dizele göre is emisyonları sırasıyla %48,3 ve %49,5 azalmıştır. Atık zeytinyağı biyodizelinin oksijen içermesi ve sülfür içeriğinin az olması is emisyonlarının azalmasına neden olmaktadır.

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada atık zeytinyağı biyodizelinin yanma, performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Yakıt karışımlarının dizele yakın performans gösterdiği görülmüştür. Biyodizelin ısıl enerjisinin düşük olması ve viskozite, yoğunluk değerlerinin yüksek olması motor performansını azalmasına neden olmuştur. Tam yükte maksimum silindir basıncı ve ısı dağılımının B20 yakıtı ile elde edildiği görülmüştür. Bu noktada yüksek motor yüklerinde biyodizel karışımları ile daha fazla silindir basıncı ölçülmüştür. Biyodizel yakıt karışımları ile dizele göre tutuşma gecikmesi sürelerinin arttığı görülmüştür. Benzer şekilde motor yükü ve karışım yakıtlardaki biyodizel miktarı arttıkça yanma sürelerinin uzadığı görülmüştür. 11,25 Nm motor yükünde ısıl verim B20 yakıtı ile dizele göre %7,8 azalmıştır. Tam yükte  $NO_x$  emisyonları B20 ile dizele göre %7,5 artmıştır. Aynı yükte B20 ile CO ve is emisyonları dizele göre sırasıyla %17,6 ve %49,5 azalmıştır. Sonuçta atık zeytinyağı biyodizelinin dizel motorda herhangi bir değişikliğe gidilmeden verimli bir şekilde kullanılabileceği görülmüştür.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Çelik, Combustion, performance and exhaust emission characteristics of organic based manganese addition to cotton methyl ester, Applied Thermal Engineering, 108, (2016) 1178-1189.
- [2] E., Büyükkaya, Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics, Fuel, 89, (2010) 3099–3105.
- [3] P., Verma, M.P., Sharma, Performance and Emission Characteristics of Biodiesel Fuelled Diesel Engines, International Journal Of Renewable Energy Research, 5, (2015) 1.
- [4] İ., Sugözü, F., Aksoy, Ş.A., Baydır, Bir Dizel Motorunda Ayçiçeği Metil Esteri Kullanımının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, Makina Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6,2, (2009) 49–56.

- [5] F.,Aksoy, H.,Bayrakçeken, Ş.A.,Baydır, H.,Yavuz, Kanola YağıMetil Esterine Ön Isıtma Uygulamasının Motor Performans ve Emisyonlarına Etkisi, Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi, 1,1, (2009) 25–33.
- [6] S., Kaşifoğlu, M., Gümüş, C., Sayın, Palm Olein ve Soya Karışımı Bitkisel Yağın Metil Esterinin Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Kullanımı, 10. Uluslararası Yanma Sempozyumu, 504–511, 2008.
- [7] E.,Ansari, K.,Poorghasemi, B.K., Irdmoussa, M., Shahbakhti, M., J. D., Naber, Efficiency and Emissions Mapping of a Light Duty Diesel-Natural Gas Engine Operating in Conventional Diesel and RCCI Modes SAE Technical Paper, (2016) (No. 2016-01-2309).
- [8] K.,Poorghasemi, R.K., Saray, E.,Ansari, B.K., Irdmoussa, M.,Shahbakhti, J.D., Naber, Effect of diesel injection strategies on natural gas/diesel RCCI combustion characteristics in a light duty diesel engine, Applied Energy, 199, (2017) 430-446.
- [9] A.,Uyumaz, H., Solmaz, E., Yılmaz, H., Yamık, S., Polat, Experimental examination of the effects of military aviation fuel JP8 and biodiesel fuel blends on the engine performance, exhaust emissions and combustion in a direct injection engine, Fuel Processing Technology, 128, (2014)158-165.
- [10] E.,Dobrucali, R.U., Ozcumalı, S., Ergin, The effect of biodiesel on exhaust emission characteristics of a diesel engine, Marit. Ind. Ocean Eng. Coast. Resour., 1, (2008) 345-350.
- [11] M.,Çelik, H., Solmaz, H.S., Yücesu, Examination of the effects of organic based manganese fuel additive on combustion and engine performance, Fuel Processing Technology, 139, (2015) 100-107.
- [12] N.,Yılmaz,TM., Sanchez, Analysis of operating a diesel engine on biodiesel–ethanol and biodiesel–methanol blends, Energy, 46, (2012) 126-9.
- [13]S.,Dixit, S.,Kanakraj, A.,Rehman, Linseed oil as a potential resource for bio-diesel: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, (2012) 4415–4421.
- [14] D.,Agarwal, L., Kumarb, A.K., Agarwal, Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, Renewable Energy, 33, (2008) 1147–1156.
- [15]A.M.,Ashraful, H.H., Masjuki, M.A., Kalam, I.M.R., Fattah, S., Imtenan, S.A., Shahir, H.M., Mobarak, Production and comparison of fuel properties, engine performance, and emission characteristics of biodiesel from various non-edible vegetable oils: A review, Energy Conversion and Management, 80, (2014) 202–228.
- [16]A.,Demirbas, Production of biodiesel fuels from linseed oil using methanol and ethanol in non-catalytic SCF conditions, Biomass and Bioenergy, 33, (2009) 113-118.
- [17]D.,Ashri, R., Kumar, Effective Process Parameters of Mustard Oil Biodiesel - A Review and Analysis, International Journal on Emerging Technologies, 5, 1, (2014) 99-106.
- [18] R.,Behçet, S., Aydın, C., İlkılıç, H., Aydın, A.V., Çakmak, Atık Kızartma Yağı Metil Esterinin Bir Dizel Motorunda, Motor Performansı ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey.
- [19]Ö.,Can, Combustion characteristics, performance and exhaust emissions of a diesel engine fueled with a waste cooking oil biodiesel mixture, Energy Conversion and Management, 87, (2014) 676-686.
- [20]Ö.,Can, E.,Öztürk, H., Solmaz, F., Aksoy, C., Çınar, H.S., Yücesu, Combined effects of soybean biodiesel fuel addition and EGR application on the combustion and exhaust emissions in a diesel engine, Applied Thermal Engineering, 95, (2016) 115–124.

- [21]D.,Agarwal, L., Kumarb, A.K., Agarwal, Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine, *Renewable Energy*, 33, (2008) 1147–1156.
- [22]RD.,Misra, MS., Murthy, Straight vegetable oils usage in a compression ignition engine:a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, (2010) 3005-13.
- [23]SP.,Singh, D., Singh, Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, (2010) 200-16.
- [24]A.,Karmakar, S., Karmakar, S., Mukherjee, Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production, *Bioresource Technology*, 101, (2010) 7201-10.
- [25]M. R., Uddin, K., Ferdous, M.R., Uddin, M.R., Khan, M.A., Islam, Synthesis of Biodiesel from Waste Cooking Oil, *Chemical Engineering and Science*, 1, 2, (2013) 22-26.
- [26] J.B.,Heywood, *Internal Combustion Engines Fundamentals*, McGraw-Hill, USA, 1988.
- [27]R., Stone, *Introduction to Internal Combustion Engines*, 1999;Macmillan Press Ltd, ISBN 0-333-74013- 0,Tesseraux, I.; Toxicoll, Lett., 2004, 149, 295-300.