

Metil ve Etil Ester Kullanılan Bir Common-Rail Dizel Motorda Performans, Yanma ve Enjeksiyon Karakteristiklerinin Karşılaştırılması

Ertan ALPTEKİN^{*,1,2}

¹Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli

²Kocaeli Üniversitesi, Alternatif Yakıtlar AR&GE ve Uygulama Merkezi, 41275, Kocaeli

(Alınış / Received: 26.07.2016, Kabul / Accepted: 10.01.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 03.02.2017)

Anahtar Kelimeler

Etil ester,
Metil ester,
Enjeksiyon,
Yanma,
Dizel motor

Özet: Biyodizel, dünyada kullanımı yaygınlaşan yenilebilir ve alternatif bir dizel yakıttır. Biyodizel üretiminde kullanılan alkol büyük önem arz etmekte ve üretilen biyodizelin yakıt özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Farklı yakıt özellikleri, dizel motorlarda farklı yakıt enjeksiyon ve yanma karakteristiklerine sebep olabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, metanol ve etanol kullanılarak üretilen iki farklı ester yakıtı ve saf motorin, common-rail yakıt enjeksiyon sistemine sahip bir dizel motorda üç farklı motor yükü (50 Nm, 100 Nm ve 150 Nm) ve 2000 dev/dk sabit motor devrinde deney yakıtı olarak kullanılmıştır. Bu yakıtların performans, yanma ve yakıt enjeksiyon analizi karşılaştırmalı olarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, etil ve metil ester kullanımıyla özgül yakıt tüketimi (ÖYT) motorine kıyasla artış göstermiştir. Etil ve metil ester yakıtlarının silindir içi basıncı ve ısı yayılımı değerleri tüm deney şartlarında motorine kıyasla daha yüksek olmuştur. Yakıt enjeksiyon karakteristikleri, yakıt tipi ve motor yüküne bağlı olarak farklılık göstermiştir.

Comparison of Performance, Combustion and Injection Characteristics of Methyl and Ethyl Ester Used In a Common Rail Diesel Engine

Keywords

Ethyl ester,
Methyl ester,
Injection,
Combustion,
Diesel engine

Abstract: Biodiesel is a renewable alternative diesel fuel and its usage has become more popular in the world. The alcohol which is used in the biodiesel production is very important and it directly affects the fuel properties. Different fuel properties may cause different injection and combustion characteristics in diesel engines. Therefore, in this study, pure diesel fuel and two different esters produced via ethanol and methanol were used as test fuels in a common rail direct injection diesel engine under three different engine loads (50 Nm, 100 Nm and 150 Nm) and the constant engine speed (2000 rpm) test conditions. Detailed and comparative performance, injection and combustion analysis of these test fuels were done. According to the test results, brake specific fuel consumption (BSFC) increased with using ethyl and methyl ester compared with diesel fuel. Maximum in-cylinder pressure and heat release rate of ethyl and methyl ester were higher than those of diesel fuel for all test conditions. Fuel injection characteristics changed with the fuel type and engine load.

1. Giriş

Biyodizel bitkisel veya hayvansal yağlardan elde edilebilen alternatif bir dizel yakıttır. Biyodizel, bu yağların bir alkol ve katalizör ile reaksiyona girmesiyle üretilmektedir. Fiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından petrol kökenli dizel yakıtlarla benzerlik göstermektedir. Bitkisel veya hayvansal yağları biyodizele dönüştürmek için kullanılan metot transesterifikasyon olarak adlandırılmaktadır.

Biyodizel, bünyesinde doymuş ya da doymamış yağ asidi etil ester veya yağ asidi metil ester bileşiklerini içermektedir. Biyodizelin yağ asidi dağılımı ve üretilen biyodizelin özellikleri kullanılan hammaddeye göre farklılık göstermektedir [1]. Bununla birlikte, transesterifikasyonda kullanılan alkol tipi de üretilen biyodizelin yakıt özelliklerine doğrudan etki etmektedir.

Biyodizel genellikle yüksek kaliteli kullanılmamış bitkisel yağlardan üretilmektedir. Biyodizel üretiminde bu yağların kullanımı, motorine kıyasla biyodizeli hem daha pahalı hale getirmekte hem de yağ fiyatlarını arttırmaktadır [2]. Bu nedenle, araştırmacılar maliyeti daha düşük hammaddelere yönelmiştir. Atık bitkisel yağlar düşük maliyetli biyodizel hammaddesi olarak göze çarpmaktadır. Kullanılmış yağlar lavaboya döküldüğü zaman, kanalizasyon borusu içindeki atıkların yapışmasına ve zamanla borunun daralmasına neden olmaktadır. Türkiye’de önemli miktarda atık bitkisel yağ potansiyeli bulunmaktadır [3]. Ülkemizde oluşan bitkisel atık yağlar kanalizasyona dökülmeyip biyodizel üretimi için geri kazanılabilsen, ülke ekonomisine önemli bir kaynak sağlanabilecek ve atık yağların çevreye verdiği zarar bertaraf edilebilecektir. Bunun yanında, biyodizel üretiminde atık bitkisel yağların kullanımı, gıda zincirine de olumlu yönde katkı sağlayabilecektir.

Biyodizel üretiminde en yaygın olarak kullanılan alkol metanoldür. Diğer alkollere göre daha iyi sonuç vermesi ve maliyet avantajı bulunmaktadır. Bununla birlikte etanol, izopropanol ve bütanol gibi diğer alkoller de biyodizel üretiminde kullanılabilir. Özellikle etanol bitkisel kökenli üretilebilir olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Biyodizel üretiminde etanol gibi yenilebilir enerji kaynaklarından elde edilen alkol kullanımı ile birlikte biyodizel üretimi tamamen yenilebilir kaynaklardan sağlanabilecektir [4]. Bazı fiziksel ve termodinamik özellikleri nedeniyle etanolün dizel motorlarında kullanımı uygun değildir [5]. Etanolün biyodizel üretiminde kullanımı ile bu alternatif yakıtın dizel motorlarda dolaylı olarak kullanımı da sağlanabilecektir.

Literatüre bakıldığında dizel motorlarda kullanılan biyodizelin genellikle metil alkol ile üretildiği görülmektedir [6-8]. Aynı hammaddeden üretilen etil ve metil esterinin karşılaştırıldığı makaleler oldukça sınırlı sayıdadır. Baiju vd. [9] karanja yağı metil ve etil esterini tek silindirli, dört zamanlı ve doğal emişli bir dizel motorda test etmişlerdir. Bu çalışmada motor performansı ve egzoz emisyon karakteristiklerini incelemişler ve sonuçları referans yakıt olan motorin ile karşılaştırmışlardır. Farklı motor yüklerinde (Yüksüz durumdan %20 artışlarla tam yüke kadar) ve sabit motor devrinde (1500 dev/dk) yapılan deneyler sonucunda, motorinin termik veriminin tüm deney şartlarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Metil esterinin özgül yakıt tüketiminin (ÖYT) etil esterden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Sanli vd. [4] atık kızartma yağlarından metanol ve etanol kullanılarak üretilen biyodizeli saf halde ve motorin ile %20 oranında karıştırarak direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda farklı devirlerde ve sabit motor yükü şartlarında test etmişlerdir. Etil esterinin ÖYT değerlerinin metil esterden bir miktar daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Yakıt enjeksiyon karakteristiklerine bakıldığında, esterlerin yakıt enjeksiyon başlangıcı

birbirine yakın iken, motorine kıyasla esterler için aşırı püskürtme avansına ihtiyaç duyulduğunu tespit etmişlerdir. Ester yakıtların, daha yüksek silindir içi basınç ve ısı yayılımı değerlerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Lapuerta vd. [10], atık yağlardan üretilen metil ve etil esterini dört silindirli, turboşarj ve ara soğutmaya sahip bir dizel motorda yakıt olarak kullanmışlardır. Dizel motorda etil ve metil ester kullanımı motorine göre ÖYT değerlerinde artışa neden olmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, aynı hammaddeden üretilen etil ve metil esterlerinin özellikle yeni nesil common-rail dizel motorlarda karşılaştırılması ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, atık kızartma yağlarından üretilen metil ester, etil ester ve referans yakıt olarak motorin dört silindirli, turboşarjlı, ara soğutmalı ve common-rail bir dizel motorda test edilmiş, motor performans, yanma ve yakıt enjeksiyon karakteristikleri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Biyodizel üretiminde kullanılan atık kızartma yağı yerel bir işletmeden temin edilmiştir. Transesterifikasyon reaksiyonu için iki farklı alkol kullanılmış, etil ve metil ester olmak üzere iki farklı yakıt üretilmiştir. Metil ester üretiminde reaksiyon için 6:1 metanol-yağ molar oranı ve yağın %0,75'i kadar potasyum hidroksit kullanılmıştır. Reaksiyon 60°C’de 1 saat olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Etil ester üretiminde ise etanol-yağ molar oranı 8:1 ve sodyum metoksit miktarı yağın %1,4’ü kadar iken, reaksiyon 45°C’de 2 saat sürmüştür. Reaksiyon sonrasında oluşan gliserin fazı ayrıştırılmış ve ester yakıtlar yıkama işlemine tabi tutulmuştur. Yıkama işleminden sonra esterlerde kalan artık su ve alkol distilasyon ünitesinde ayrıştırılmıştır. Filtreleme prosesinden sonra biyodizellerin yakıt özellikleri belirlenmiştir. Yakıt üretimi, Kocaeli Üniversitesi Alternatif Yakıtlar Araştırma Geliştirme ve Uygulama Merkezinde (AYARGEM) bulunan pilot biyodizel üretim tesisinde yapılmıştır. Biyodizel üretim tesisi için detaylı bilgi ilgili referansta verilmiştir [2].

Kullanılan atık kızartma yağının fiziksel özellikleri Tablo 1’de, kimyasal kompozisyonları ise Tablo 2’de verilmiştir. Bu çalışmada referans yakıt olarak kullanılan motorin (euro-diesel) yerel bir benzin istasyonundan alınmıştır. Kullanılan deney yakıtlarının temel özellikleri Tablo 3’te gösterilmiştir. Motorin, etil ester ve metil esterinin yakıt özelliklerinin karakterizasyonu, Kocaeli Üniversitesi AYARGEM ve TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Enstitüsünde uluslararası standart deney metotlarına uygun olarak yapılmıştır.

Motorin, etil ester ve metil ester saf halde su soğutmalı, turboşarjlı, ara soğutmalı (inter-cooler) common-rail direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda deney yakıtı olarak kullanılmıştır. Deney motorunun

teknik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Bilindiği gibi, dizel motora sahip taşıt motorları genellikle yaklaşık 2000 dev/dk motor devri ve kısmi yük şartlarında kullanılmaktadır. Bu çalışmada, bu durum göz önüne alınarak motor deneyleri için 2000 dev/dk sabit motor devri ve 50, 100 ve 150 Nm olmak üzere üç farklı motor yükü seçilmiştir.

Tablo 1. Atık kızartma yağının fiziksel özellikleri

Özellik	Birim	Değer
Yoğunluk (15°C)	kg.m ⁻³	922,1
Viskozite (40°C)	mm ² .s ⁻¹	36,2
Asit Değeri	mg KOH.g ⁻¹	1,7
Isıl Değer	MJ.kg ⁻¹	39,5
İyot Değeri	g l.100g ⁻¹	107,3
Su İçeriği	ppm	1494,7

Tablo 2. Atık kızartma yağının yağ asidi dağılımı

Yağ Asidi	(%)	Yağ Asidi	(%)
C 12:0	1,03	C 18:2	44,71
C 14:0	0,68	C 18:3	0,51
C 16:0	16,18	C 20:0	0,28
C 18:0	4,11	C 22:0	0,48
C 18:1	30,69	Doymuşluk	22,76

Tablo 3. Deney yakıtlarının bazı yakıt özellikleri

Özellik	Birim	Motorin	Metil Ester	Etil Ester
Ester İçeriği	%	-	98,2	-
Setan Sayısı	-	56,8	54,9	53,5
Yoğunluk (15°C)	kg.m ⁻³	831,7	884,3	883,4
Viskozite (40°C)	mm ² .s ⁻¹	2,6	4,5	4,9
Parlama Noktası	°C	63	153	158
Isıl Değer	MJ.kg ⁻¹	45,98	39,87	40,05
Kükürt İçeriği	ppm	<10	2,3	4,4
Monogliserin	% (küt.)	-	0,15	0,27
Diğliserin	% (küt.)	-	0,08	0,11
Trigliserin	% (küt.)	-	0,07	0,06
Serbest Gliserin	% (küt.)	-	0,008	0,008
Toplam Gliserin	% (küt.)	-	0,066	0,098
Bakır Şerit Korozyon Derecesi	Korozyon Derecesi	No 1	No 1	No 1

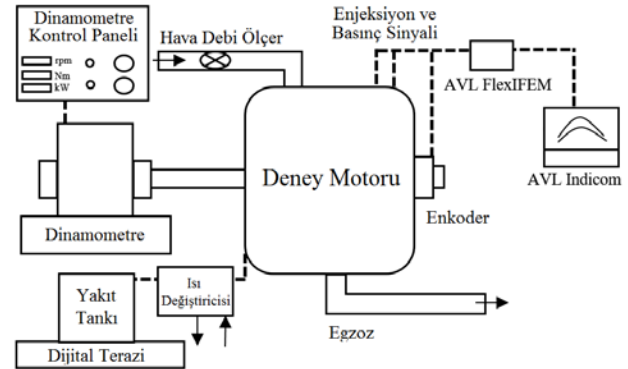
Tablo 4. Deney motorunun teknik özellikleri

Motor	1,9 litre, Fiat JTD
Tip	Direkt enjeksiyon, turboşarj, ara soğutma (inter-cooler), 4 silindir, su soğutmalı, common-rail
Çap-Strok	82 mm - 90,4 mm
Sıkıştırma Oranı	18,45:1
Maksimum Güç	77 kW @ 4000 dev/dk
Maksimum Tork	205 Nm @ 1750 dev/dk

Motor deneyleri öncesinde motorda herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır. Motor deney sisteminin şematik resmi Şekil 1'de verilmiştir. Emme giriş havası, yakıt, motor yağı ve soğutma suyunun sıcaklıkları K tipi termokupllar kullanılarak

ölçülmüştür. Emme giriş havasının kütesel debisi AVL-Flowsonix marka debi ölçer ile ölçülmüştür. Yakıt sıcaklığının sabit olması için, yakıt sıcaklığı su ile soğutulan bir ısı değiştiricisi ile 40°C ± 3°C civarında tutulmuştur. Deney motoru her deneyden önce motor suyu ve yağ sıcaklığı yaklaşık 80°C oluncaya kadar ısıtılmıştır. Motor kararlı hale geldikten sonra tüm veriler anlık olarak toplanmıştır.

Motor yükünü kontrol edebilmek için bir hidrolik dinamometre (BT-190 FR, Baturalp Taylan) kullanılmıştır. Krank açısı (°KA) ve pozisyonunu tespit etmek için bir şaft enkoder (AVL, 365C) kullanılmıştır. Silindir içi basıncı ölçmek için ısıtma bujisi yerine takılabilen bir basınç dedektörü (AVL, GH13P) ve ölçülen verileri alabilmek için AVL FlexIFEM marka veri toplayıcı kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanlarını belirlemek için Fluke marka bir akım probu kullanılmıştır. Enjeksiyon zamanları, enjektör akımına bağlı olarak tespit edilmiştir. Silindir basıncı ve enjeksiyon zamanlamasının analizi için AVL Indicom marka yanma analiz programı kullanılmıştır. Silindir içi gaz basıncı ve enjeksiyon verileri 50 çevrimin ortalaması alınarak 0,2 °KA çözünürlüğünde tespit edilmiştir. Isı yayılımı analizi için detaylı bilgi referans [11]'de verilmiştir. Yakıt tüketimi, 20 dakika süre ile bir gram hassasiyetinde bir dijital terazi kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Motor deney sistemi

3. Bulgular ve Tartışma

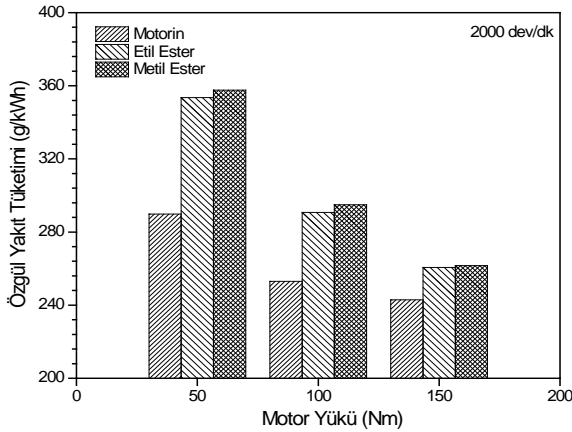
Motor deneyleri, verilerin tekrarlanabilirliğinden emin olmak için en az üç defa tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Bu çalışmada motor deneylerinde kullanılan motor yükleri, sırasıyla düşük (50 Nm), orta (100 Nm) ve yüksek (150 Nm) yük olarak ifade tanımlanmıştır.

3.1. Özgül yakıt tüketimi

Motor deneylerinde, farklı yakıtlar için motor performansının karşılaştırılması açısından en önemli parametrelerden biri özgül yakıt tüketimidir (ÖYT). Motor deneylerinden elde edilen ÖYT sonuçları Şekil 2'de verilmiştir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi, motor yükünün artışı ile ÖYT'nin azaldığı tespit edilmiştir. Düşük yükten,

yüksek yüklere çıkıldığında artan silindir içi basınç ve sıcaklıktan kaynaklanan efektif verimin artışı ÖYT'nin azalmasına neden olmuştur [9]. Motorin için ÖYT değeri, etil ve metil esterden daha düşük bulunmuştur. Etil ve metil esterin ÖYT değerinin motorine kıyasla ortalama olarak sırasıyla %14,7 ve %15,9 daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum, Tablo 3'te görüldüğü gibi motorinin ısı değerinin etil ve metil estere kıyasla daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Motorinin ısı değeri, etil ve metil esterden yaklaşık sırasıyla %14,8 ve %15,3 daha yüksektir. Literatürde yapılan bazı çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir. Gürü vd. [12] yaptıkları çalışmada, %10 biyodizel, %90 motorin içeren (B10) karışım kullanılan dizel motorda motorine kıyasla maksimum torkun alındığı motor devrinde yakıt tüketiminin yaklaşık %5,2 arttığı tespit edilmiştir. Zhu vd. [13], farklı motor yüklerinde saf biyodizelin daha yüksek ÖYT değerlerine sahip olduğunu belirlemişlerdir. Özcelik vd. [14] ise B7 deney yakıtının saf motorine kıyasla ÖYT'nde %12,2 artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir.



Şekil 2. Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) sonuçları

Ester yakıtlar kendi aralarında karşılaştırıldığında, etil esterinin ÖYT değerinin metil estere kıyasla bir miktarda daha düşük olduğu görülmektedir. Metil esterinin ÖYT'nin etil esterden ortalama %1 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Baiju vd. [9] ve Sanli vd. [4] metil esterinin etil estere kıyasla daha yüksek ÖYT değerlerine neden olduğunu belirtmişlerdir.

3.2. Yakıt enjeksiyon ve yanma karakteristikleri

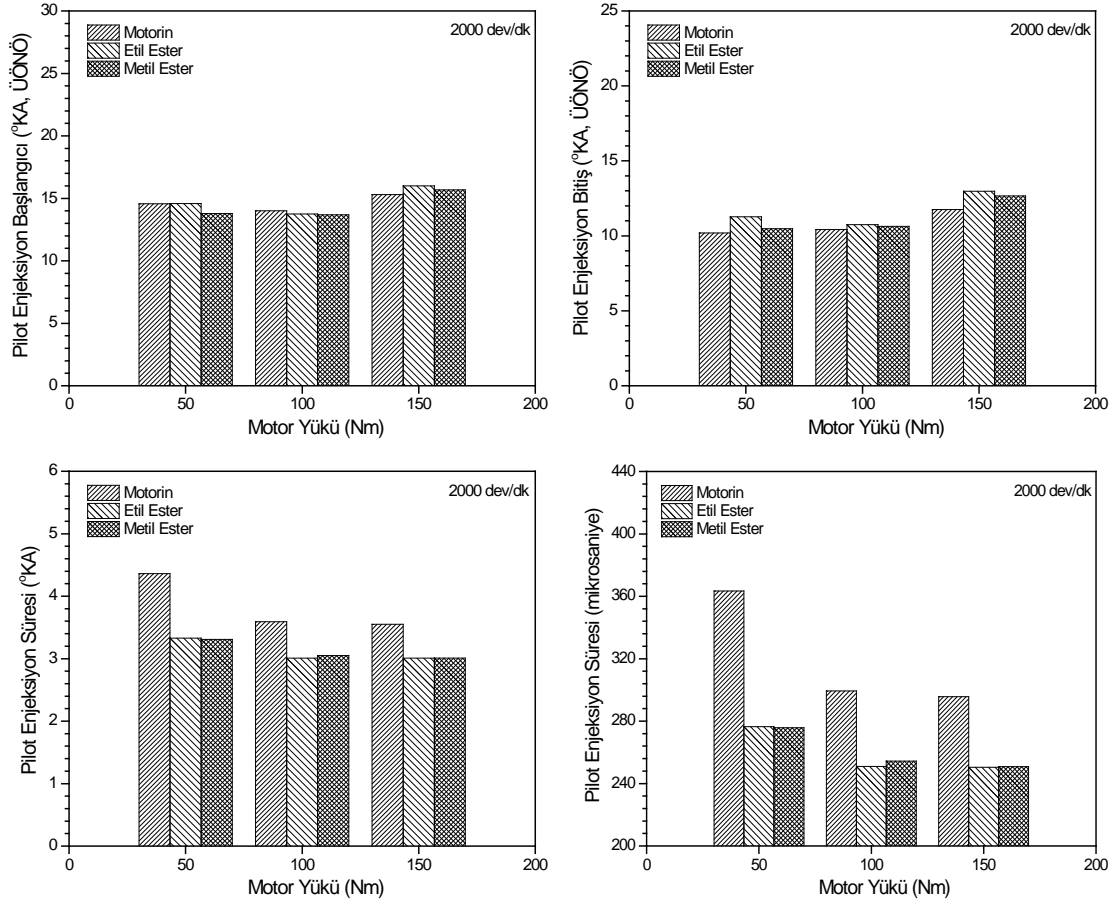
Bu çalışmada kullanılan common-rail dizel motor pilot ve ana enjeksiyon olmak üzere iki kademeli enjeksiyon stratejisine sahiptir. Motor yüküne bağlı olarak sabit motor devrinde elde edilen pilot enjeksiyon ve ana enjeksiyon karakteristikleri Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.

Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü gibi, iki kademeli enjeksiyon süreci yakıt tipine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu durum, motor yönetim sisteminin yakıt tipine göre farklı cevap verdiğini

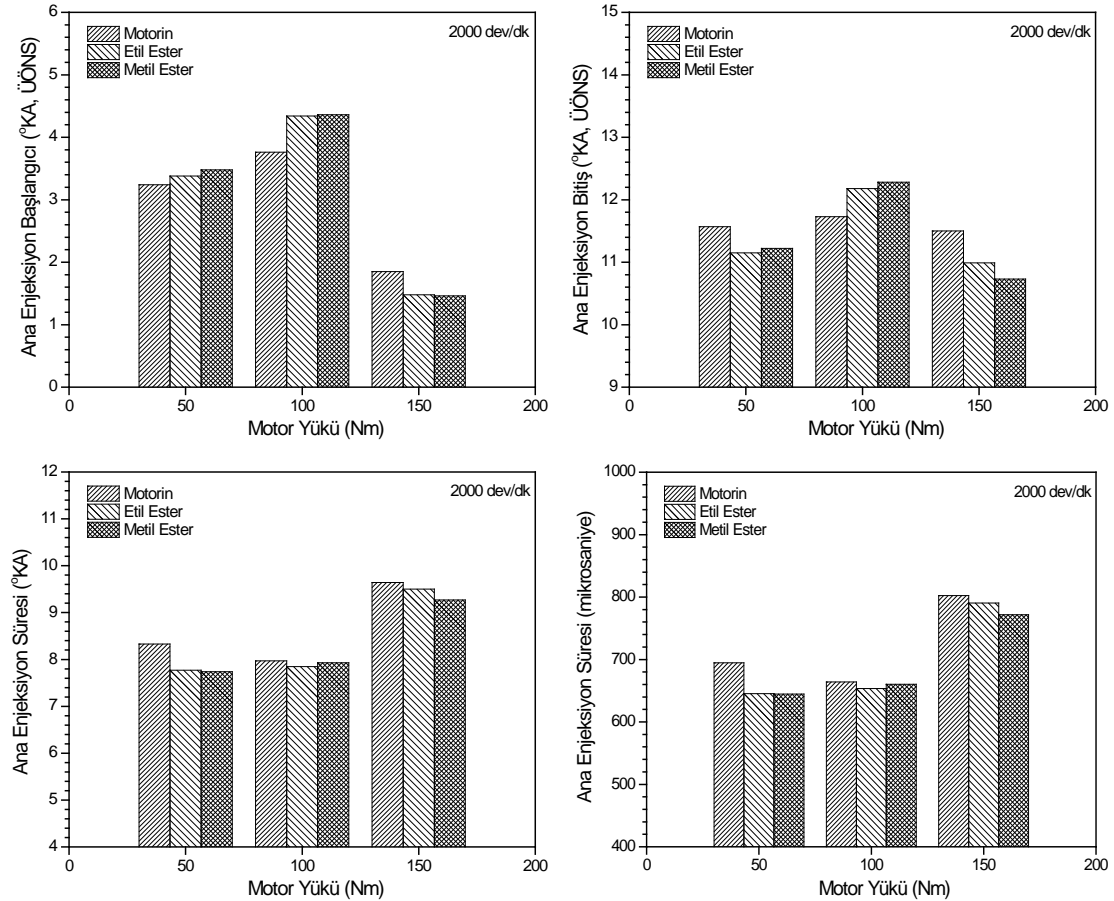
göstermektedir. Pilot enjeksiyon başlangıcı, düşük motor yükünden yüksek motor yüküne doğru geçildiğinde üst ölü noktadan önce (ÜÖNÖ) daha erken krank açılarındaki gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, pilot enjeksiyon bitişi de yüksek yükte daha erken krank açılarındaki olmuştur. Motorin ve ester yakıtların pilot enjeksiyonları arasındaki farkın, tüm deney şartları için 1 °KA'dan daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Pilot enjeksiyon süreleri incelendiğinde, motor yükünün artması ile birlikte pilot enjeksiyon süresinin azaldığı görülmektedir. Etil ve metil esterinin pilot enjeksiyon süreleri birbirlerine yakın iken, motorinin pilot enjeksiyon süresi ester yakıtlarına kıyasla daha yüksek olarak görülmüştür.

Şekil 4'te görüldüğü gibi, ana enjeksiyon başlangıcı düşük yükten orta yüke geçildiğinde üst ölü noktadan sonra (ÜÖNS) daha geç °KA değerlerinde iken, orta yükten yüksek yüke geçildiğinde daha erken °KA değerlerinde tespit edilmiş ve ÜÖN'ya yaklaşmıştır. Benzer şekilde ana enjeksiyon bitişi de motor yüküne bağlı olarak aynı değişim karakteristiğini göstermiştir. Yine pilot enjeksiyon karakteristiklerine benzer olarak, kullanılan deney yakıtlarının ana enjeksiyon değerleri arasındaki farkın da tüm deney şartları için 1 °KA'dan daha az olduğu belirlenmiştir. Ana enjeksiyon süreleri pilot enjeksiyonun aksine yüksek yükte artış göstermiştir. Pilot enjeksiyon sürelerinde olduğu gibi, motorinin ana enjeksiyon süresinin ester yakıtlarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ester yakıtların pilot ve ana enjeksiyon sürelerinin daha kısa olmasının temel sebeplerinden bir tanesinin, motorine kıyasla daha yüksek yoğunluğa sahip olmaları gösterilebilir. Ester yakıtların yüksek yoğunluğa sahip olması, yanma için gereken yakıtın silindir içine daha kısa sürede gönderilmesini sağlamıştır. Bu çalışmada, enjeksiyon başlangıçları enjeksiyon sinyaline göre ifade edilmiştir. Ester yakıtların motorine kıyasla daha yüksek viskoziteye sahip olmaları da enjektör iğnesinin dinamik kalkışının değişmesine yani motor şartlarına bağlı olarak gecikmesine neden olabilmektedir [15]. Bu da doğrudan yanma ve enjeksiyon karakteristiklerine etki etmektedir. Bunun yanında, rail basıncı da enjeksiyon karakteristiklerini doğrudan değiştirmektedir.

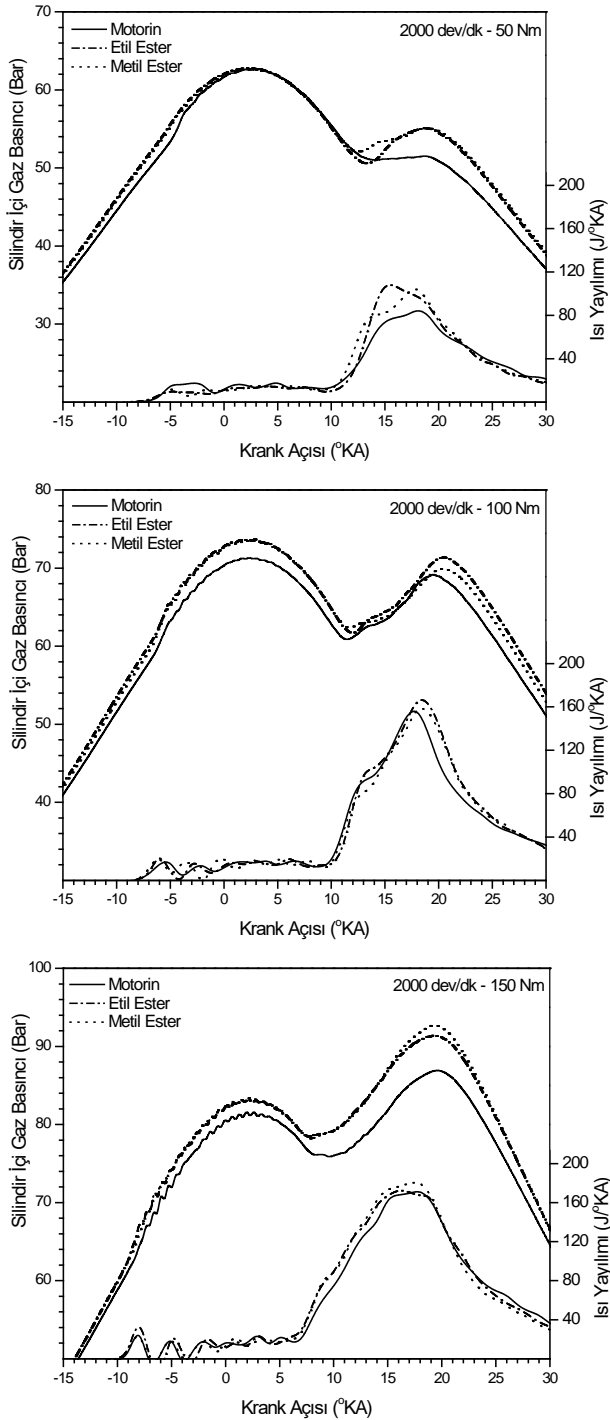
Tziourtzioumis ve Stamatelos [16], %30 motorin, %70 biyodizel içeren bir karışım (B70) kullanarak yapmış oldukları çalışmada, dizel motorda saf motorine kıyasla biyodizel karışımı kullanıldığında rail basıncının 100 bar'a kadar artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu eğilim motor yüküne ve hızına bağlı olarak da değişmiştir. Bunun yanında, Han vd. [17], ana enjeksiyonda enjekte edilen yakıt miktarının rail basıncı ile değiştiğini ortaya koymuştur. Buradan da anlaşılacağı gibi, ester yakıtların rail basıncında neden olduğu değişikliklerin de doğrudan enjeksiyon karakteristiklerine etki etmiş olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3. Pilot enjeksiyon sonuçları



Şekil 4. Ana enjeksiyon sonuçları



Şekil 5. Silindir içi gaz basıncı ve ısı yayılımı sonuçları

Diğer yandan, yapılan bu çalışmada motor torku ve motor devrinin sabit olduğu dikkate alındığında gaz pedalı konumunun da doğrudan yakıt enjeksiyon karakteristiklerine müdahalede bulunduğu anlaşılmaktadır. Yukarıda nedenlere bağlı olarak, motor kontrol ünitesindeki strateji ve kalibrasyondan dolayı enjeksiyon karakteristikleri de farklılık göstermiştir.

Sabit motor hızında ve farklı motor yüklerinde tüm deney yakıtları için elde edilen silindir içi basınç ve ısı yayılım değeri sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi, motor yükünün artması ile birlikte maksimum silindir basıncı (P_{max})

değerlerinin kullanılan tüm yakıtlar için arttığı tespit edilmiştir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, kullanılan deney motorunun yakıt enjeksiyon sistemi pilot ve ana enjeksiyon olmak üzere iki adet yakıt enjeksiyonu yapmaktadır. Bu iki enjeksiyon, silindir içi basınç eğrilerinde birbirini takip eden iki farklı pik basıncın oluşmasına neden olmuştur. Düşük ve orta yükte P_{max} değeri birinci pikte elde edilirken, yüksek yükte P_{max} değeri ikinci pikte elde edilmiştir. Tüm deney şartlarında ester yakıtlarının daha yüksek P_{max} değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Alptekin vd. [11], Mancaruso vd. [18] ve Venkanna ve Reddy [19], yapmış oldukları çalışmalarda da dizel motorlarda hayvansal yağ kökenli biyodizel (B100), bitkisel yağ kökenli biyodizel (B100) ve gıda amaçlı kullanılmayan bitkisel kökenli yağ biyodizel (B20) kullanımında silindir içi basınç değerlerinin motor yüküne ve hızına bağlı olarak motorine kıyasla bir miktar daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Şekil 5 incelendiğinde, ester yakıtlar için P_{max} değerlerinin motorine kıyasla yüksek olmasına rağmen, P_{max} değerinin elde edildiği krank açısı değerlerinin tüm deney yakıtları için birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir.

Isı yayılımının yükselmeye başladığı krank açıları (yanma başlangıcı) incelendiğinde, bu değerlerin birbirine oldukça yakın olduğu gözükmektedir. Tüm yakıtlar için ana enjeksiyon başlangıçları arasındaki fark $1^{\circ}KA$ değerinden daha düşüktür. Bu da dizel motorda ilk safha olan tutuşma gecikmesi değerlerinin birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Motor yükü arttıkça artan silindir içi basınç ve ana enjeksiyon başlangıcının ÜÖN'ya daha yakın krank açılarında yapılmasıyla birlikte yanma başlangıcı da daha erken krank açılarında gerçekleşmiştir.

Isı yayılımı eğrilerine bakıldığında, ani yanma fazında gerçekleşen maksimum ısı yayılımı (MIY) değerinin elde edildiği krank açısının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Deney yakıtları arasındaki fark ortalama olarak $1^{\circ}KA$ değerinden daha düşüktür. Ani yanma fazının bittiği krank açısı değerleri de genel olarak birbirine yakın elde edilmiştir. Diğer yandan, etil ester ve metil esterinin MIY değerlerinin motorinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Mikulski vd. [20] yapmış oldukları çalışmada, farklı oranlarda (%25, %50 ve %75) biyodizel içeren biyodizel-motorin karışımları için benzer MIY ve MIY değerinin elde edildiği krank açısı değerleri tespit etmişlerdir.

4. Değerlendirme

Yapılan bu çalışmada, atık kızartma yağlarından üretilen etil ve metil esterinin direkt enjeksiyonlu common-rail bir dizel motorda motor performans, enjeksiyon ve yanma karakteristikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara bakıldığında, deney motoru aynı koşullarda çalıştırıldığında motorinin ester yakıtlara kıyasla ortalama olarak yaklaşık %15 daha düşük ÖYT sağladığı tespit edilmiştir. Motorine kıyasla minimum ÖYT farkı, yüksek motor yükünde etil ve metil ester için sırasıyla yaklaşık %7,3 ve %7,7 olmuştur. Etil esterinin ÖYT değerinin, metil esterden bir miktar daha düşük olduğu ve aradaki farkın motor şartlarına bağlı olarak maksimum %1,4 olduğu belirlenmiştir. Common-rail enjeksiyon sistemine sahip dizel motor, yakıt tipine ve motor şartlarına bağlı olarak farklı enjeksiyon stratejisi ortaya çıkarmıştır. Pilot ve ana enjeksiyon açıları ve süreleri yakıt tipine bağlı olarak farklılık göstermiştir. Bu da doğrudan silindir içi basınç piklerine ve bunların elde edildiği krank açısı değerlerine etki etmiştir. Yanma sonuçları incelendiğinde, P_{max} değerlerinin etil ve metil ester için motorine kıyasla genel olarak daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ester yakıtların motorine kıyasla P_{max} değerleri arasındaki fark yüksek motor yükünde 6 bara kadar yükselmiştir. Isı yayılımı değerlerine bakıldığında, tüm test şartları için ester yakıtların MIY değerlerinin motorinden ortalama olarak %10 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. P_{max} ve MIY'nın elde edildiği krank açısı değerlerinin ise genel olarak birbirine yakın olduğu görülmüştür. Ester yakıtlar kendi aralarında karşılaştırıldığında, aralarında etkin bir farklılık olmadığı ve birbirlerine benzer performans ve yanma karakteristiği sergiledikleri tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, 2011/37 ve 2013/9 numaralı projeler ile Kocaeli Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] Zhu, L., Cheung, C. S., Huang, Z. 2016. Impact of chemical structure of individual fatty acid esters on combustion and emission characteristics of diesel engine. *Energy*, 107 (2016), 305-20.
- [2] Alptekin, E., Canakci, M., Sanli, H. 2014. Biodiesel production from vegetable oil and waste animal fats in a pilot plant. *Waste Management*, 34 (2014), 2146-54.
- [3] Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E. 2014. Predicting the higher heating values of waste frying oils as potential biodiesel feedstock. *Fuel*, 115 (2014), 850-4.
- [4] Sanli, H., Canakci, M., Alptekin, E., Turkcan, A., Ozsezen, A. N. 2015. Effects of waste frying oil based methyl and ethyl ester biodiesel fuels on the performance, combustion and emission characteristics of a DI diesel engine. *Fuel*, 159 (2015), 179-87.
- [5] Owen, K., Coley, T. 1995. *Automotive fuels reference book*, 2nd ed., Warrendale, USA.
- [6] Berchmans, H. J., Hirata, S. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technology*, 99 (2008), 1716-21.
- [7] Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., Rehman, A. 2008. Biodiesel production from waste tallow. *Fuel*, 87 (2008), 2961-6.
- [8] Alptekin, E., Canakci, M. 2009. Characterization of the key fuel properties of methyl ester-diesel fuel blends. *Fuel*, 88 (2009), 75-80.
- [9] Baiju, B., Naik, N. K., Das, L. M. 2009. A comparative evaluation of compression ignition engine characteristics using methyl and ethyl esters of karanja oil. *Renewable Energy*, 34 (2009), 1616-21.
- [10] Lapuerta, M., Herreros, J. M., Lyons, L. L. 2008. Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel engine performance and emissions. *Fuel*, 87 (2008), 3161-9.
- [11] Alptekin, E., Canakci, M., Ozsezen, A. N., Turkcan, A., Sanli, H. 2015. Using waste animal fat based biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a DI diesel engine. *Fuel*, 157 (2015), 245-54.
- [12] Gürü, M., Koca, A., Can, Ö., Çınar, C., Şahin, F. 2010. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renewable Energy*, 35 (2010), 637-43.
- [13] Zhu, L., Cheung, C. S., Zhang, W. G., Huang, Z. 2010. Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol. *Science of The Total Environment*, 408 (2010), 914-21.
- [14] Ozcelik, A. E., Aydogan, H., Acaroglu, M. 2015. Determining the performance, emission and combustion properties of camelina biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 96 (2015), 47-57.
- [15] Agarwal, A. K., Gupta, J. G., Maurya, R. K., Kim, W., Lee, S., Lee, C. S., Park, S. 2016. Spray evolution, engine performance, emissions and combustion characterization of Karanja biodiesel fuelled common rail turbocharged direct injection transportation engine. *International Journal of Engine Research*, (2016), 1-16.
- [16] Tziourtzioumis, D., Stamatelos, A. 2012. Effects of a 70% biodiesel blend on the fuel injection system operation during steady-state and transient performance of a common rail diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 60 (2012), 56-67.
- [17] Han, D., Duan, Y., Wang, C., Lin, H., Huang, Z., Wooldridge, M. S. 2016. Experimental study of the two-stage injection process of fatty acid esters on a common rail injection system. *Fuel*, 163 (2016), 214-22.
- [18] Mancaruso, E., Sequino, L., Vaglieco, B. M. 2011. First and second generation biodiesels spray

characterization in a diesel engine. *Fuel*, 90 (2011), 2870-83.

- [19] Venkanna, B. K., Reddy, C. V. 2012. Direct injection diesel engine performance, emission, and combustion characteristics using diesel fuel, nonedible honne oil methyl ester, and blends with diesel fuel. *International Journal of Energy Research*, 36 (2012), 1247-61.
- [20] Mikulski, M., Duda, K., Wierzbicki, S. 2016. Performance and emissions of a CRDI diesel engine fuelled with swine lard methyl esters-diesel mixture. *Fuel*, 164 (2016), 206-19.