
Araştırma Makalesi / Research Article

Tek Silindirli Dizel Bir Motorun Performans ve Emisyonları Üzerinde Biodizel Karışımli Yakıtların Etkisinin Deneysel ve Sayısal İncelenmesi

İlker TEMİZER*, Bünyamin ESKİCİ

*Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Sivas
(ORCID: 0000-0003-1170-3898) (ORCID: 0000-0001-5713-0840)*

Öz

Bu çalışmada, direkt enjeksiyonlu dizel bir motorda belirli oranlarda kullanılan kanola yağı metil ester/motorin karışımli yakıtların motor performans, emisyon ve yanma parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır. Ayrıca, çalışmada kullanılan yakıtların motor üzerindeki etkisi sayısal olarak da incelenmiştir. Sayısal çalışma AVL-FIRE yazılımının ESE-Diesel kısmında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan motor ve farklı yakıtlar sayısal olarak modellenmiştir. Motor karakteristik özelliklerinin incelendiği deneysel çalışmada, biodizel karışımli yakıtlar motor performansını çok az da olsa düşürmüştür. Aynı zamanda biodizel karışımli yakıtlar motorda CO ve HC gibi emisyonların azalmasına neden olmuştur. Hem deneysel hem de sayısal yanma analizlerine bakıldığında, biodizel/motorin karışımli yakıtların silindir içi maksimum basınçların ve ısı salınımlarının artmasına neden olduğu görülmektedir. Ek olarak bu çalışmada, AVL-FIRE yazılımında yanma odası içerisindeki CO oluşumu farklı krank açılarında incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yanma analizi, Dizel motor, Biodizel, AVL-FIRE

Experimental and Numerical Investigation of Biodiesel Mixed Fuels Effect on Performance and Emissions of Single Cylinder Diesel Engine

Abstract

In this study, the engine performance, emission and combustion parameters of canola oil methyl ester/diesel mixed fuels used certain proportions indirect injection the diesel engine has been investigated experimentally. In addition, the effect on the engine of the fuels used in the study has been examined numerically. The numerical study was performed in ESE-Diesel part of AVL-FIRE software. The engine and different fuels used in the experimental study were modeled numerically. In the experimental study examining the engine characteristics, biodiesel mixed fuels have slightly reduced engine performance. However, these fuels have led to reduced engine emissions such as CO and HC. When looking at both the experimental and numerical combustion analyzes, It is seen that biodiesel/diesel mixed fuels led to increase of the cylinder maximum pressures and heat releases. In addition, in the AVL-FIRE software, CO formation in the combustion chamber was examined at different crank angles.

Keywords: Combustion analysis, Diesel engine, Biodiesel, AVL-FIRE

1. Giriş

Artan petrol fiyatları ve tükenen fosil yakıt rezervleri biodizel yakıtlarının motorlarda daha yoğun kullanılacağına işaret etmektedir. Özellikle dizel motorlarda sorun çıkarmadan doğrudan kullanımları ve bazı emisyonların iyileştirilmesine katkı sunması, araştırmacıları farklı geliştirilecek biodizel kaynaklarına yönlendirmektedir [1-5]. Biodizel yakıtlarının dizel motorlarının yakıt sistemlerinde herhangi bir değişiklik gerektirmeden doğrudan kullanımı, kimyasal yapısında ihtiva ettiği oksijen içeriği, yerel kaynaklardan üretilebilir olması, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynağından üretilebilir olması bu yakıtların en önemli üstünlükleridir [6-8]. Özellikle dizel motorlardan salınan

*Sorumlu yazar: itemizer@cumhuriyet.edu.tr

Geliş Tarihi: 13.06.2019, Kabul Tarihi: 09.08.2019

emisyonlar önemli bir sağlık ve çevre problemidir. Bu problemin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmada, dizel/biodizel/etanol ve dizel/biodizel/metanol karışımlarına Di-Etil Eter (DEE) ilave edilerek motorun NO_x ve is emisyonları düşürülmüştür. Ancak yapılan bir çok çalışmada, biodizel yakıtlarının sahip oldukları oksijen içeriği ve beraberinde artan silindir içi sıcaklıkların NO_x emisyonlarını arttırdığı vurgulanmıştır [9-13]. Bununla birlikte, bu yakıtların motorine kıyasla %15-%18 daha düşük ısıl değere sahip olmalarının motorlarda özgül yakıt tüketim değerlerinin artmasına neden olduğu bildirilmiştir [14-15]. Literatür incelendiğinde, biodizel yakıtlarının motordaki yanma ve emisyonlar üzerindeki etkisini araştıran birçok çalışmaya rastlanmaktadır [16-20]. Bütün bu çalışmaların genelinde, biodizel yakıtlarının özellikle CO ve HC gibi bazı emisyon değerlerini azalttığı vurgulanmaktadır [21-22]. Dizel motorlarda biodizel yakıt kullanımının motorin yakıtına kıyasla daha düşük miktarlarda HC emisyonlarına neden olduğu yapılan çalışmalarda görülmektedir [16,18,23].

D.Qi vd. soya fasulyesi yağından elde ettikleri biodizelin sıkıştırma ateşlemeli dizel bir motorun performans ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Biodizel yakıtının kullanımı ile motor gücünün neredeyse dizel yakıt ile aynı olduğunu, egzoz emisyonlarda ise CO, HC, NO_x ve is değerlerinin azaldığını vurgulanmıştır [24]. Karahan, kanola yağından elde edilmiş biodizel yakıtını direkt püskürtmeli dizel bir motorda kullanarak motor performans ve egzoz emisyonlarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda, motorin kullanılan motorda özellikle 2400-3000 devirleri arasında tork ve gücün biodizele göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, biodizel yakıtının kullanıldığı motorda özgül yakıt tüketiminin, CO₂ ve NO emisyonlarının ise daha yüksek olduğu belirtilmektedir [25]. Motor performans ve emisyonları dışında, biodizel yakıtlarının motorlarda kullanılabilirliğinin bir başka göstergesi ise motorda oluşan titreşim yoğunluğu ve seviyesidir. Özellikle silindir içi yanma parametrelerine bağlı olarak gelişen titreşimler biodizel/motorin karışımları içerisindeki karışım yüzdelere bağlı olarak değiştiği vurgulanmıştır [26].

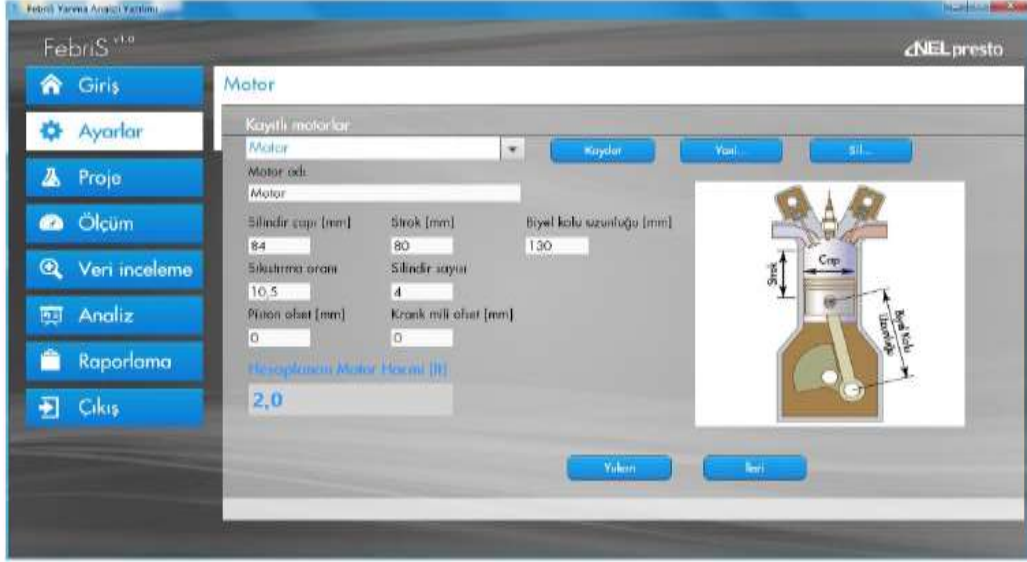
Lee ve Huh soya yağından üretilen soya yağı metil ester biodizel/motorin yakıt karışımları için püskürtme ve yanma olayını araştırmıştır. Çalışmada, farklı yakıtların motor performans ve emisyonlar üzerine etkisi incelenmiştir. Üç farklı oranda (%20, %60 ve %100) motorin yakıtına katılan biodizel yakıtlı çalışmalarda motorun az da olsa yanma sonu basınç değerlerinde azalmalar yaşanırken, NO emisyonları artış göstermiştir [27]. Saad vd. biodizel yakıtı kullanılan bir dizel motorunda silindir içi türbülans oluşumunu incelemişlerdir. Çalışmada, ANSYS-CFX yazılımı kullanarak üç boyutlu sayısal model oluşturulmuştur. Karışımın iyileşmesi ile biodizel yakıtlarının yanma verimini arttıracakları görülmüştür [28]. Bir başka çalışmada ise biodizel ve motorin yakıtları kullanılan bir dizel motorunun performans ve egzoz emisyon analizleri deneysel olarak araştırılmış, aynı zamanda sonuçlar hesaplamalı akışkan dinamikleri (CFD) yazılımı olan AVL FIRE sayısal sonuçları ile kıyaslanmıştır [29]. KIVA4-CHEMKIN kodlarının kullanıldığı bir başka çalışmada ise 5 farklı biodizel yakıtı, 3 farklı motor yükünde denenmiştir. Yapılan analizlerde yakıtların doymamışlık seviyesine göre değişen viskozite ve oksijen içerikleri gibi birçok etkenin CO ve NO_x emisyonları üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır [30]. Biodizel yakıtlarının silindir içi ısı ve akış davranışlarının incelendiği bir başka çalışmada, yüksek çözünürlükte kamera kullanılarak yakıt enjeksiyonu ve silindir içi akış davranışları incelenmiştir. Aynı zamanda elde edilen sonuçlar, AVL FIRE 3D CFD yazılımı kullanılarak elde edilen simülasyon sonuçları ile kıyaslanmıştır [31]. Bu alandaki bir başka çalışmada, Jatropha biodizeli ile mineral dizel yakıtının Diesel-RK yazılımı kullanılarak motor sonuçları oluşturulmuştur. Dizel yakıtı ve saf biodizel yakıtlarının motorda kullanımı ile motor verimleri bakımından, deneysel ve sayısal veriler arasındaki benzerlik dikkat çekmektedir [32].

Bu çalışmada, dünyada kullanımı en yaygın olarak kabul edilen kanola yağı metil ester yakıtının motorine belirli oranlarda katılmasıyla, motor performans ve emisyon değişimi deneysel ve sayısal yanma analizleri ile birlikte incelenmiştir. Yanma ve emisyon analizleri hem deneysel hem de sayısal gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan deney motorunun yanma odası, püskürtme sistemi ve kullanılan test yakıtları sayısal olarak modellenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda, biodizel yakıtları gibi alternatif motor yakıtların motorlarda sayısal olarak modellenmesi ve yanma yorumlarının daha da genişletilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

2. Materyal ve Metot

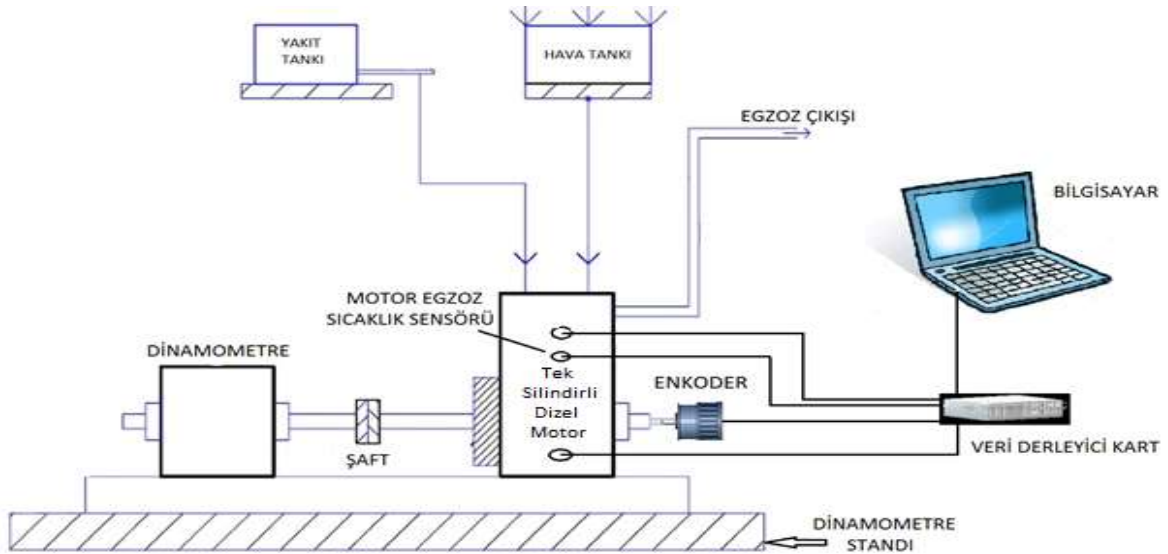
Çalışmada, kanola yağından elde edilen kanola yağı metil esteri (KYME) ve referans kabul edilen motorin (M) yakıtı kullanılmıştır. Tek silindirli direkt enjeksiyonlu dizel motor, Cumhuriyet

Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Laboratuvarında bulunan ANKA marka elektrikli motor dinamometresine bir şaft aracılığı ile bağlanmıştır. Silindir içi basınç OPRANT marka optik sensör yardımıyla, krank açışı ise KUBLER marka enkoder tarafından ölçülerek veriler anlık olarak Febris Yanma Analiz programına aktarılmıştır. Şekil 1, Febris yanma analizi yazılımındaki motor özellikleri ekranını göstermektedir. Elde edilen veriler, bir veri derleyici kart aracılığı ile bilgisayar ortamına aktarılarak, sonuçlar kayıt altına alınmıştır.



Şekil 1. Febris yanma analizi yazılımında motor özellikleri ekranı

Deneylerde %100 motorin (M100), hacimsel olarak %90 motorin- %10 kanola yağı metil ester (KYME10), %80 motorin- %20 kanola yağı metil ester (KYME20) ve %70 motorin - %30 kanola yağı metil ester (KYME30) yakıtları kullanılmıştır. Bu yakıtların kullanıldığı motora ait güç, tork, özgül yakıt tüketimi, motor egzoz gaz sıcaklığı değişimleri 1250, 1500, 1750, 2000 ve 2250 d/d aralıklarında tam gaz ve tam yükte incelenmiştir. Egzoz emisyon değerlerinin tespiti Bosch Marka BAE350 Model egzoz emisyon cihazı ile yapılmıştır. Motor kararlı rejime geldikten sonra alınan ölçümlerde CO, HC ve NO emisyonları 5 farklı motor devri için kaydedilmiştir. Tablo 1’de deney motoruna ait teknik özellikler, Şekil 2’de ise deney düzeneğinin şematik yapısı görülmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Tablo 1. Deney motorunun teknik özellikleri

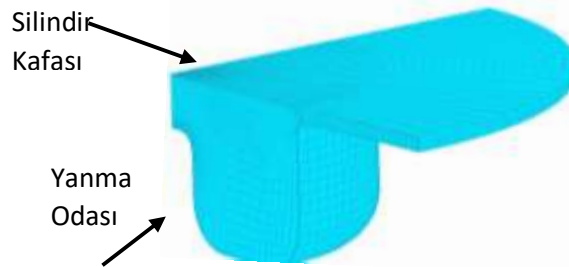
Deney Motoruna ait Teknik Özellikler	
Motor Adı	Antor 3LD 510
Motor Tipi	4- zamanlı, direkt enjeksiyonlu dizel motor
Silindir Sayısı	1
Silindir Hacmi-cm ³	510
ÇapxStrok mm x mm	85 x 90
Sıkıştırma Oranı	17,5:1
Maksimum Güç (kW)	8,8@3000
Maksimum Tork (Nm)	32,8@2000
Püskürtme Açısı	126°

Sayısal çalışma, AVL-FIRE yazılımının ESE-DIESEL kısmında gerçekleştirilmiştir. Modellemede ilk olarak, motor ve deney yakıtlarının özellikleri sisteme tanımlanmıştır. Literatürde en çok kabul gören Püskürtme modeli olarak WAVE modeli, türbülans modeli olarak k-zeta-f modeli ve yanma modeli olarak EFCM-3Z modeli kullanılmıştır [24]. Tablo 2, motorun sayısal modellenmesinde sisteme girilen sınır şartlarını göstermektedir. Deneysel ve sayısal çalışmada, piyasada satışı bulunan ve motorin yakıtı olarak adlandırılan Dizel EN590 yakıt türü seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Test yakıtlarına ait özellikler Tablo 3’de sunulmaktadır.

Tablo 2. Sınır Şartları

Başlangıç ve Sınır Koşulları	
Motor Hızı	2000 d/d
Hava giriş sıcaklığı	293,15 K
Hava giriş basıncı	1 Bar
Yakıt püskürtme sıcaklığı	330,15 K
Silindir kafası sıcaklığı	575,15 K
Silindir duvar sıcaklığı	475,15 K
Püskürtme aralığı	-20-0 KA
Yakıt tüketimi	1.9 lt/h

Şekil 3’de tek silindirli deney motoruna ait yanma odası geometri örgüsü görülmektedir. Hesaplamalar bu çalışmada ideal kabul edilen 50000 hücre için gerçekleştirilmiştir.

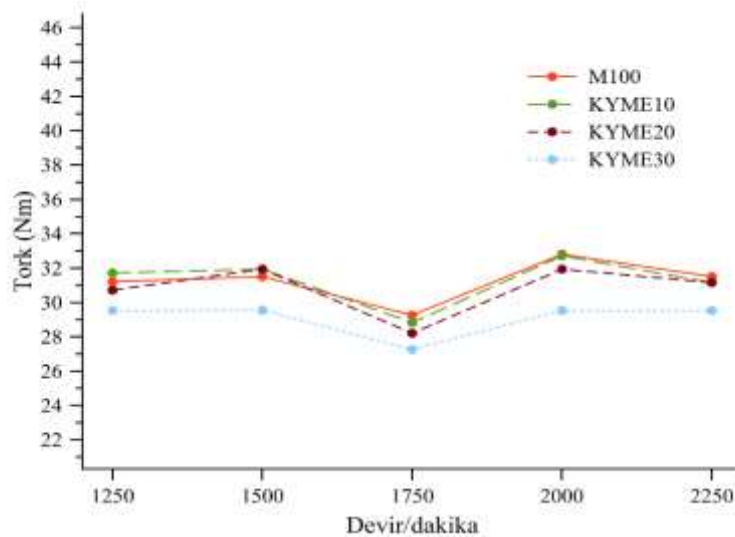
**Şekil 3.** Yanma odası geometrisi

Tablo 3. Dizel yakıtı ve kanola yağı metil ester yakıtlarının özellikleri [33,34].

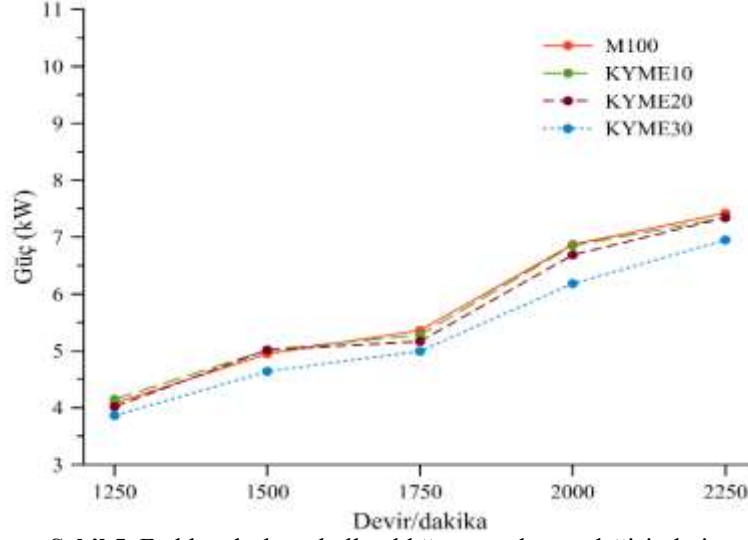
Özellikler	Dizel	Kanola Yağı Metil Ester
Yoğunluk (g/cm ³)	0.8424	0.881
Viskozite (mm ² /s)	3.4301	4.44
Akma Noktası (°C)	-6	-10.0
Donma Noktası (°C)	-	-12.9
Parlama noktası (°C)	58	135.7
Asit değeri (mg KOH/g)	0.15	0.72
Bakır şerit korozyonu (3 h 50 °C)	No 1A	No 1A
Setan indeksi (%)	57.8	47.2-55
Kalorifik Değer (Mj/kg)	43	37.5
Kükürt içeriği	0.154	0

3. Bulgular ve Tartışma

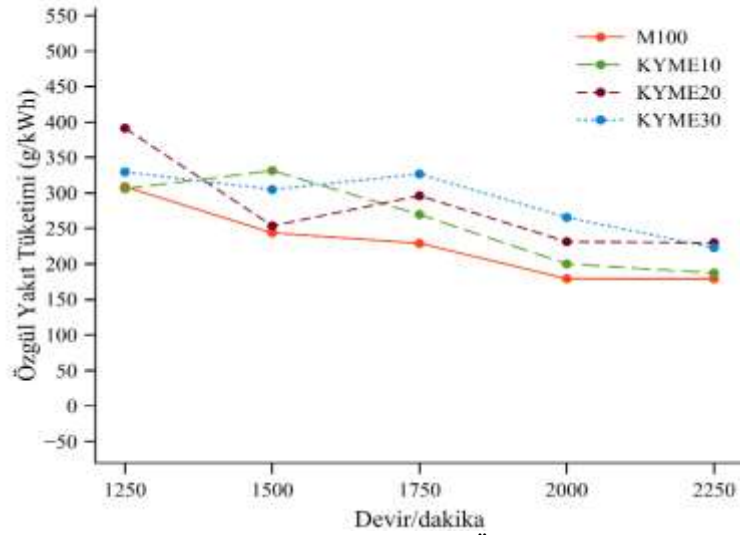
İçten yanmalı motorlarda performans ve emisyon karakteristikleri birçok bileşene bağlı olarak değişir [13, 25]. Özellikle dizel motorlarda tutuşma gecikmesi süresi, silindir içi yakıt hava hareketliliği, enjektör basıncı ve püskürtme açısı, yakıtın setan sayısı, viskozitesi ve bağ yapısı gibi birçok parametre yanma olayı ile yakından ilişkilidir. Şekil 4, motorin/kanola yağı metil ester karışımlarının kullanıldığı motor ait tork değerleri görülmektedir. Şekil incelendiğinde, bütün test yakıtları için maksimum motor torku 2000 d/d için elde edilmiştir. Özellikle KYME10 ve KYME20 yakıtlarının kullanıldığı motorda ki tork değerleri, M100 yakıtının kullanıldığı motorun tork değerlerine yakın olduğu görülmektedir. Ancak KYME30 yakıtı diğer yakıtlara kıyasla, motor torkunda yaklaşık olarak % 14,7 oranında azalmaya neden olmuştur. Maksimum motor torku M100 yakıtı kullanılan motorda elde edilmiştir. Referans kabul edilen M100 yakıtlı çalışmalara kıyasla, KYME yakıtının düşük ısıl değerleri motor torkunun azalmasına neden olmaktadır. Şekil 5, farklı yakıtlara ait hesaplanan motor güç parametrelerini, Şekil 6 ise motora ait ÖYT değerlerini göstermektedir. Motor tork grafiğine benzer durum burada da görülmektedir. Özellikle 2000 d/d 'da KYME10 VE KYME20 yakıtları referans kabul edilen M100 yakıtına yakın sonuçlar oluştursa da, KYME30 yakıtı ile motor gücünde %14,3 oranında bir azalma gerçekleşirken, ÖYT değerlerinde % 40 oranında bir artış gözlemlenmiştir. Motorda devir sayının artmasıyla birlikte çevrim başına püskürtülen yakıt miktarlarındaki artışlar bütün test yakıtları için motor gücünü arttırmıştır. Referans kabul edilen motorin yakıtına belirli oranlarda ilave edilen KYME yakıtı motor gücünde azalmalara neden olmuştur. Karışım yakıtları içerisinde KYME oranının artmasına paralel olarak karışımın sahip olduğu düşük ısıl değer ve artan yakıt viskozitesi atomizasyon problemlerini beraberinde oluşturur. Biodizel yakıtlarının kimyasal yapısında ihtiva ettikleri oksijen molekülleri yakıtın kalorifik değerlerini azaltır. Bu azalma sonucunda, Şekil 6'da görüldüğü gibi, karışım oranının artmasına paralel olarak ÖYT değerleri de artırmaktadır.



Şekil 4. Farklı yakıtların kullanıldığı motorda tork değişimleri

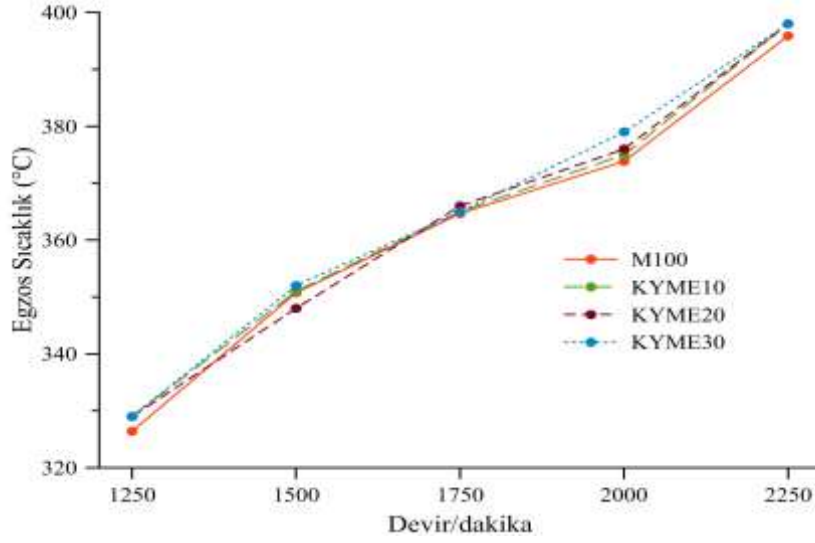


Şekil 5. Farklı yakıtların kullanıldığı motorda güç değişimleri



Şekil 6. Farklı yakıtların kullanıldığı motorda ÖYT değerindeki değişimler

Şekil 7, farklı motor devirleri ve yakıtlar için egzoz gazlarının sıcaklık değişimini göstermektedir. Bütün motor devirlerinde KYME karışimli yakıtlar motorin yakıtına kıyasla, egzoz gazı sıcaklıklarını arttırmıştır. Bilindiği gibi, motorlarda yanma sonu sıcaklıkları birçok değişkene bağlı gelişen bir parametredir. Özellikle KYME karışimli yakıtların sahip oldukları oksijen içeriği, silindir içerisinde yanmanın gelişmesine olumlu katkı sağlamıştır. KYME30 yakıtının motorda kullanımı ile maksimum egzoz gaz sıcaklıkları elde edilmiştir. Bu artışın bir başka nedeni ise, yakıtların sahip oldukları yoğunluk farkıdır. Bu durum, her bir çevrimde silindir içerisine püskürtülen yakıt miktarları değiştirmektedir. Çünkü biodizel yakıtlarının motorin yakıtlarına kıyasla sahip oldukları yüksek yoğunluk, birim hacimde daha fazla yakıtın silindir içerisine püskürtülmesine neden olur. Bu faktöründe gaz sıcaklıklarının yükselmesinde etkili olduğu söylenebilir.

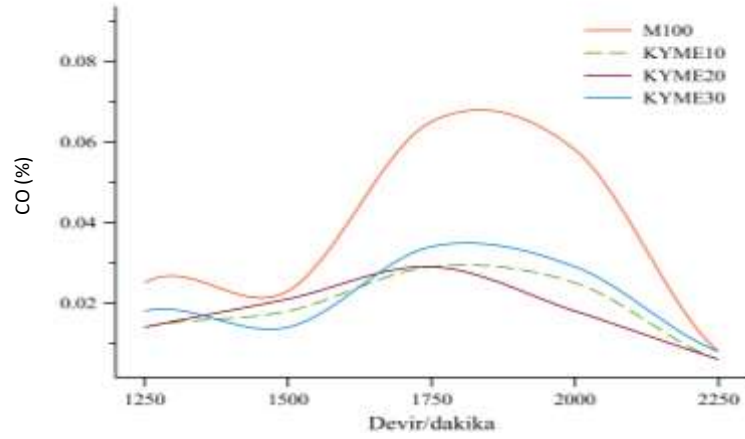


Şekil 7. Farklı yakıtların kullanıldığı motorda egzoz gaz sıcaklıklarındaki değişimler

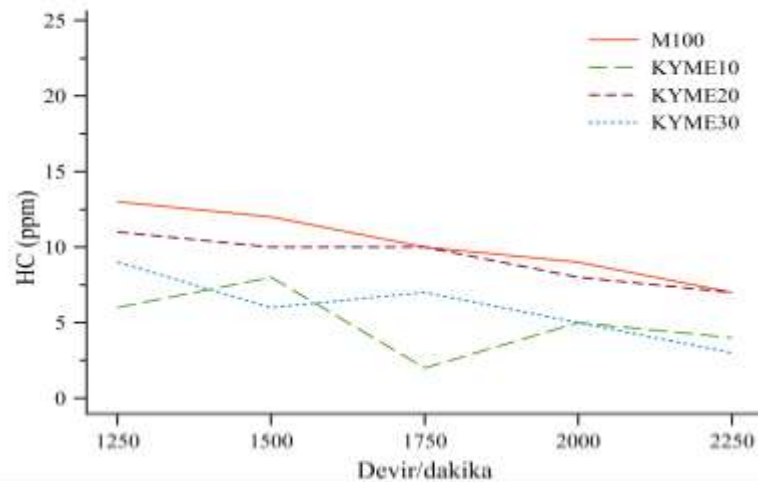
Son derece zehirleyici ve ölümcül bir gaz olan CO emisyonu, motorlu taşıtlardan kaynaklanan zararlı bir emisyon türüdür. Motorlarda hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak değişen bu emisyonun temel oluşum sebebi oksijen yetersizliğidir. CO emisyonunun farklı motor devirlerinde ve farklı yakıt kullanımına bağlı olarak değişimi Şekil 8’de görülmektedir. Özellikle 1750-1800 d/d sonrasında silindir içi artan sıcaklıklar ve hava hareketliliği, CO emisyonlarının bütün test yakıtlarında azalmasına neden olmuştur. KYME karışimli yakıtlar incelendiğinde, M100 yakıtına kıyasla CO emisyonlarında ciddi azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Özellikle yanmanın idealleşme eğilimi gösterdiği 2000-2250 d/d aralıklarında bütün test yakıtlarında CO emisyonlarında azalmalar görülmüştür. Aynı zamanda, karışım içerisindeki KYME oranının artışına paralel olarak da CO emisyonu azalmaktadır. Bu azalma biodizel yakıtlarının sahip oldukları oksijen içeriğinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. M100 yakıtı ile kıyaslandığında 2000 d/d için, KYME karışimli yakıtlar CO emisyonlarında yaklaşık % 38-60 oranlarında bir azalmaya neden olmaktadır. Eksik yanma ürünlerinden biri olarak kabul edilen HC emisyonundaki değişim, farklı motor devirleri ve yakıtlar için Şekil 9’da görülmektedir. Genel olarak bütün test yakıtlarında, artan devir sayısı ile HC emisyonları azalmaktadır. M100 yakıtına kıyasla, KYME karışimli yakıtların oksijen içeriği ve artan gaz sıcaklıkları HC emisyonlarının yaklaşık %10-%35 gibi oranlarda azalmasına neden olmuştur. Bilindiği gibi, HC emisyonları silindir içi sıcaklıkların bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Dizel motorlarda bir başka önemli emisyon ise NO’dur. NO emisyonları silindir içi sıcaklık, yanma süreleri ve hava fazlalık katsayısının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Bu çalışmada özellikle NO emisyonlarının pik yaptığı 1750 d/d için, M100 yakıtına kıyasla KYME karışimli yakıtlar NO emisyonlarının yaklaşık % 4-%10 oranlarında artmasına neden olmuştur. Özellikle KYME30 yakıtlı çalışmada en yüksek NO değeri tespit edilmiştir. Bu artışların temelinde artan gaz sıcaklıklarının olduğu söylenebilir. Şekil 10, farklı devir sayıları ve farklı yakıtlarla motorda oluşan NO değişimini göstermektedir.

Motorlardaki yanma ve emisyon analizleri, birtakım silindir içi parametrelerin elde edilmesi ile mümkündür. Bu parametrelerden ikisi, motor krank mili dönme açısını ölçen enkoder ve silindir içi basınç değişimini tespit eden optik basınç sensörleridir. Bu çalışmada, test yakıtlarının motor performans ve emisyon değişimlerinin yanı sıra, silindir içi basınç/krank açısındaki değişimleri ve ısı salınım oranları da hesaplanmıştır. Şekil 11’de, farklı yakıtlar kullanılan motora ait silindir içi basınç/krank açısındaki değişimler görülmektedir. Deneysel gerçekleştirilen bu ölçümlerde bütün test yakıtları için 200 çevrimin ortalama hesabı yapılarak hata payının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Referans kabul edilen M100 yakıtına kıyasla, KYME10, KYME20 ve KYME30 yakıtlı çalışmalarda motorun silindir içi maksimum basınç değerleri çok az da olsa artmaktadır. Özellikle biodizel yakıtlarının yoğunluğunun motorine kıyasla fazla olması, enjektörden daha fazla yakıt kütlelerinin yanma odasına transferi anlamına gelmektedir. Bu durum KYME karışimli yakıt çalışmalarında, maksimum

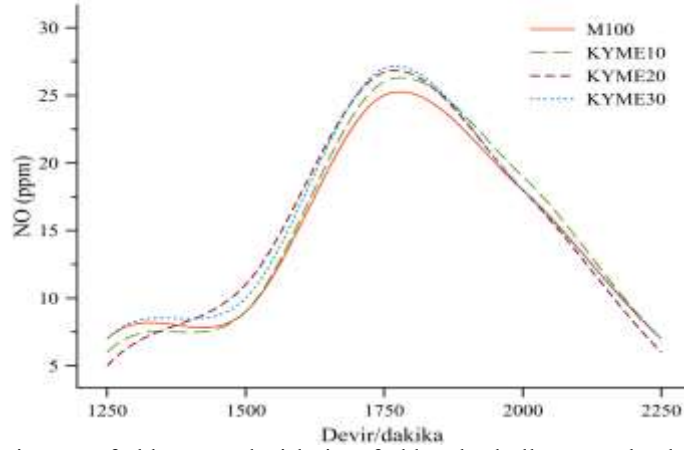
basınçların artmasının nedenlerinden biri olabilir. Bir başka etken ise biodizel yakıtlarının kimyasal yapısında buldukları oksijen içeriğidir. Oksijenin yanma olayına katılması ve pozitif katkısı, silindir içi sıcaklıkları arttırarak maksimum basınçların da bir miktar yükselmesine neden olmuştur. Nitekim bu sonuçlar AVL-FIRE progmanında yapılan yanma analizleriyle de örtüşmektedir. Farklı oranlarda biodizel yakıtlarla yapılan deneysel çalışmaların sayısal çalışmalarla olan benzerliği, test yakıtlarının sayısal sonuçlarını da geçerli kılmaktadır. Silindir içi basınç/krank açısı değişimlerinde dikkat çeken bir başka durum ise, biodizel karışımı yakıt çalışmalarında yanma fazında oluşan kaymadır. M100 yakıtının KYME karışımı test yakıtlarına kıyasla daha iyi buharlaşması ve hava ile kolay karışım oluşumu, bu yakıtın daha kolay tutuşmasını sağlar. Biodizel karışımı yakıtların yüksek viskozitesi ve düşük buharlaşma eğilimi, bu yakıtların karışım oluşumunu zorlaştırmaktadır. Şekil 12, farklı test yakıtlarının kullanıldığı motora ait net silindir içi ısı salınım oranı/krank açısı değişimini göstermektedir. Özellikle motorine KYME ilavesi, yakıtın yanmasıyla açığa çıkan maksimum enerji seviyesini arttırmaktadır. Isı salınım oranı aynı zamanda, yakıtın yanmasıyla oluşan toplam ısı salınım oranıdır. Toplam ısı salınım oranı yanma hakkında birtakım bilgiler sağlar. KYME karışımı yakıtların silindir içi basınç ve sıcaklık artışına paralel olarak, ısı salınım oranları da artmaktadır. Özellikle yakıtların tutuşma gecikmesi sürelerindeki artışların maksimum ısı salınım oranları üzerinde etkisi büyüktür. Bu duruma paralel olarak, silindir içi maksimum sıcaklıklarda artış göstermiştir.



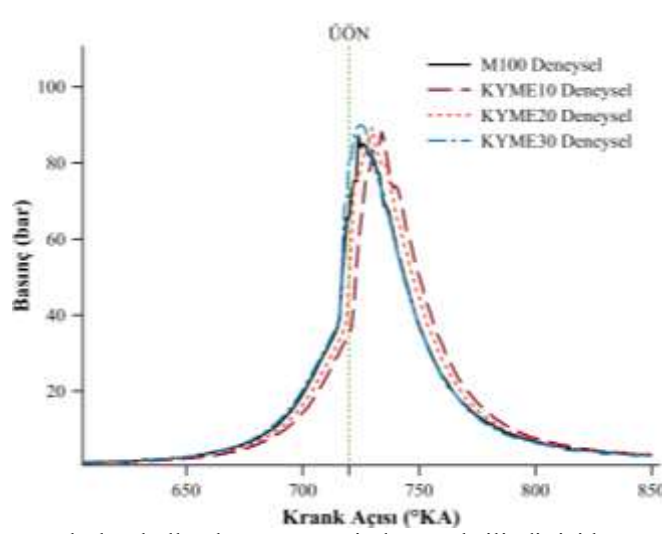
Şekil 8. CO emisyonunun farklı motor devirleri ve farklı yakıt kullanımına bağlı olarak değişimi



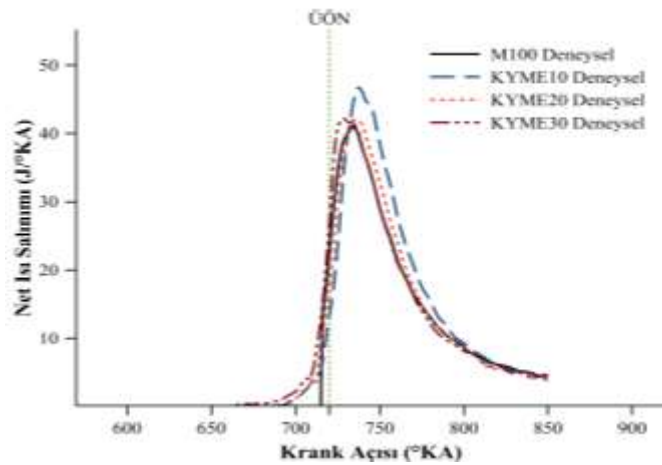
Şekil 9. HC emisyonunun farklı motor devirleri ve farklı yakıt kullanımına bağlı olarak değişimi



Şekil 10. NO emisyonunun farklı motor devirleri ve farklı yakıt kullanımına bağlı olarak değişimi



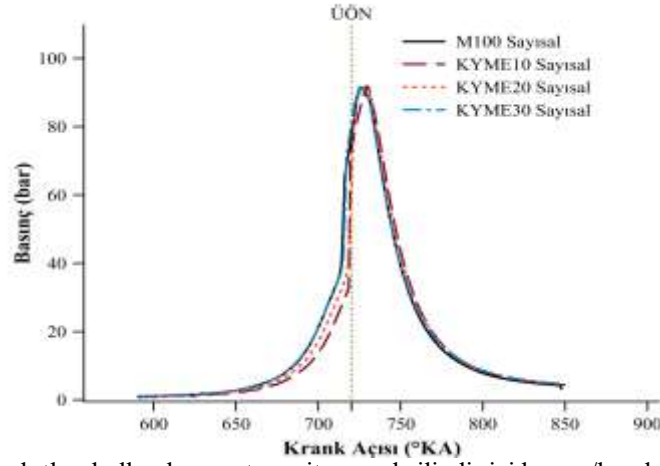
Şekil 11. Farklı test yakıtları kullanılan motora ait deneysel silindir içi basınç/krank açısı değişimi



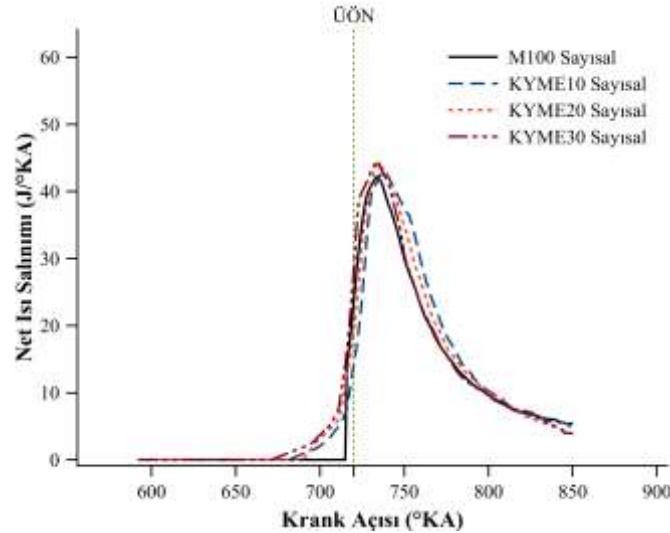
Şekil 12. Farklı test yakıtları kullanılan motora ait deneysel net ısı salınım oranı/krank açısı değişimi

AVL kütüphanesinde bulunan KYME yakıtının seçildiği numerik çalışmada, tıpkı deneysel çalışmada olduğu gibi hacimsel olarak M yakıtına belirli oranlarda KYME yakıtı dahil edilmiştir. Sayısal gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, deneysel veriler ile olan benzerlik dikkat çekmiştir. Sayısal çalışmada elde edilen bu başarı tamamıyla dinamik bir modellemenin gerçekleştirilmiş olunmasıdır. Gerek motor üreticisinden alınan teknik veriler (yanma odası geometrisi, püskürtme açısı, subap zamanlaması vb.), gerekse deneysel çalışmada elde edilen sınır şartlarının

belirlenmesi sayısal modellemedeki en önemli adımlar olmuştur. Sayısal ve deneysel çalışmada elde edilen silindir içi basınç/krank açısı değerleri arasındaki benzerlik tüm test yakıtlarında görülmektedir. Örneğin deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada silindir içi maksimum basınçlar, M100 yakıtı için 87,11 bar, KYME10 için 88,09 bar, KYME20 için 89,21 bar, KYME30 yakıtı için ise 90,73 bar olarak ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise bu değerler sırasıyla 88 bar, 88,1 bar, 88,7 bar, 90,2 bar olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre %98-%99 gibi bir benzerlik oranı elde edilmiştir. Bu çalışmada, deneysel çalışmada kullanılan motorun yanma odası geometrisi, enjeksiyon zamanlaması, miktarı, püskürtme açısı, nozul çapları, subapların açılma-kapanma zamanlaması gibi birçok teknik veri AVL-FIRE programında birebir modellenmiştir. Böylece bu çalışmadaki elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuş, sayısal modelin geçerliliği de tespit edilmiştir. Şekil 13’de, M100 ve KYME10, KYME20, KYME30 yakıtlarının kullanıldığı motora ait silindir içi basınç/krank açısı değişimi sayısal olarak görülmektedir. Aynı zamanda Şekil 14 ise M100, KYME10, KYME20 ve KYME30 yakıtlarının kullanıldığı motora ait ısı salınım oranı/krank açısı değişimi görülmektedir.



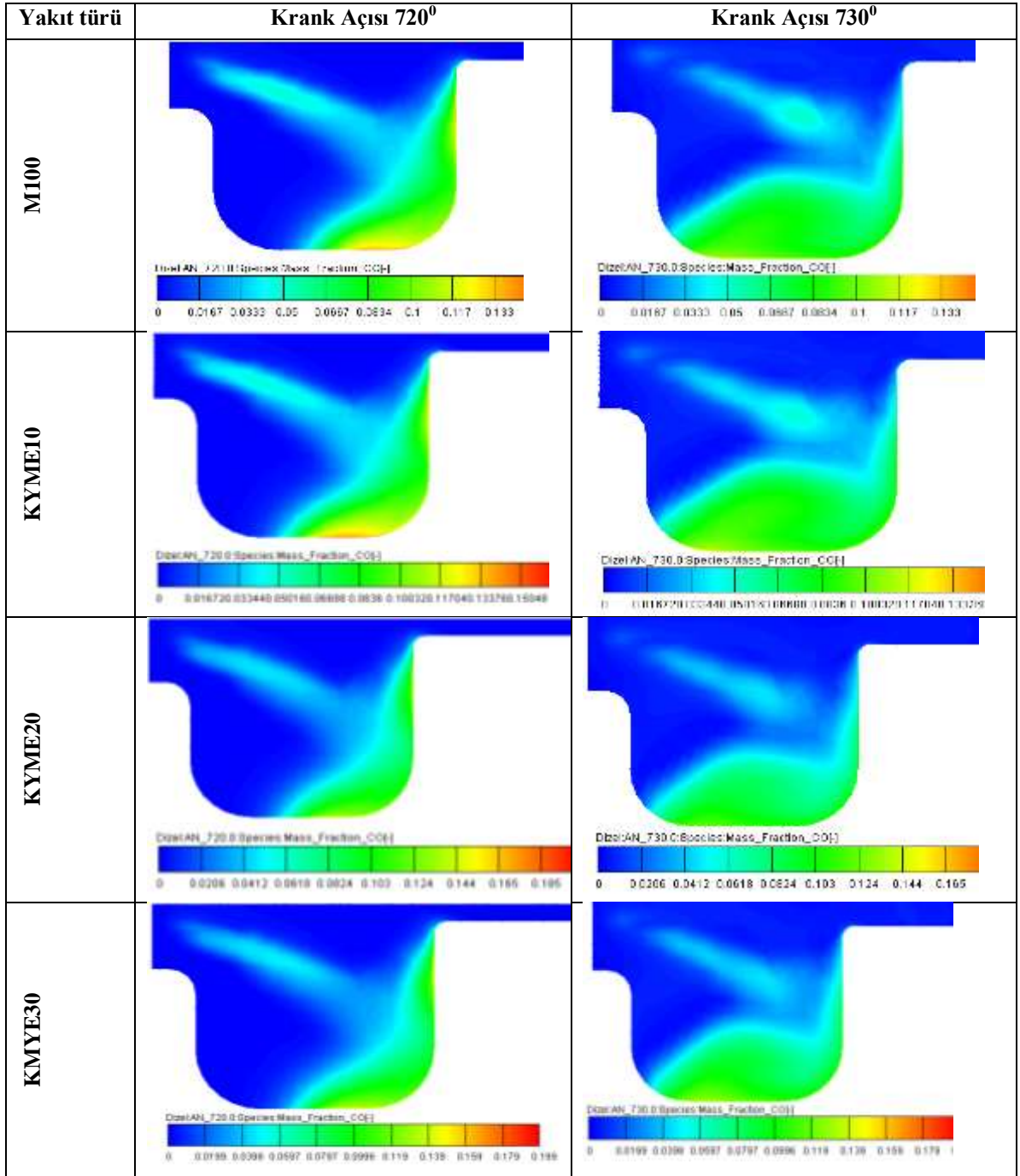
Şekil 13. Farklı test yakıtları kullanılan motora ait sayısal silindir içi basınç/krank açısındaki değişimler



Şekil 14. Farklı test yakıtları kullanılan motora ait sayısal net ısı salınım oranı/krank açısı değişimi

Sayısal analizlerde ayrıca, 4 farklı yakıt türüne ait CO oluşumu, 2 farklı krank açısında incelenmiştir. Sayısal çalışmada, kanola yağı metil esteri için hacimsel olarak %10, %20 ve %30 oranları belirlenmiştir. Silindir içi hava hareketliliği, oksijen konsantrasyonu ve sıcaklık gibi farklı parametrelere bağlı olarak gelişen CO oluşumu Şekil 15’de görülmektedir. Yakıtın püskürtüldüğü alan bölgesinde daha fazla geliştiği ve krank açısındaki artışla artan silindir içi hava hareketliliği ile daha fazla oksijenle bağ yaparak CO seviyesinin azaldığı görülmektedir. Özellikle enjektör tarafından yanma odası oyuklarına yapılan püskürtme, bu bölgelerde bulunan yakıtın duvar ile etkileşimini geliştirmiş ve yakıtın

daha hızlı buharlaşmasını ve yanmasını sağlamıştır. CO zehirleyici ve eksik yanma sonucunda oluşan zararlı bir emisyon türüdür. Büyük oranda hava/yakıt oranının bir fonksiyonu olarak değişir. Silindir içerisinde farklı krank açılarındaki oluşan CO emisyon oluşumu bütün test yakıtları için ayrı ayrı elde edilmiştir. Motorda üst ölü nokta olarak kabul edilen 720 krank açısından önce ve sonra gerçekleşen CO emisyon oluşumları 720° ve 730° olmak üzere 2 farklı krank açısında incelenmiştir. Şekil 15 incelendiğinde, en yüksek CO oluşumu %100 motorin kullanılan çalışmada elde edilmiştir. Biodizel yakıtlarının bünyesinde ihtiva ettikleri oksijen içeriğinin yanmayı iyileştiren bir etken olarak düşünülmektedir. Biodizel yakıtın oranının artmasıyla birlikte, yanmanın iyileşmesinin bir sonucu olarak CO emisyonları azalmıştır. Bütün test yakıtlarında, silindir içi sıcaklık ve basınç artışına paralel olarak yakıtın buharlaşması ve devamında hava ile karışımı 720° krank açısında daha net görülmektedir. Püskürtmenin devam ettiği 730° krank açısında ise yanma odasında yanma etkisinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 15. Farklı krank açılarındaki CO oluşum

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, motorin ve biodizel/motorin karışımli yakıtların motor performans, emisyon ve yanma analizleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçları maddeler halinde sıralamak gerekirse;

a) Motor performans deneyleri sonucunda, KYME10, KYME20 ve KYME30 yakıtlarının kullanımıyla birlikte motor tork ve güç değerlerinin azaldığı, ÖYT değerlerinin ise arttığı görülmektedir. Özellikle maksimum momentin elde edildiği 2000 d/d incelendiğinde, KYME karışımli yakıtlar motor torkunda yaklaşık %14,7 oranında, motor gücünde %14,3 oranında azalmalara, ÖYT değerlerinde ise karışım oranına bağılı olarak %40 'lara varan artışlara neden olmuştur.

b) Egzoz emisyon ölçümlerinde M100 yakıtlı çalışma ile kıyaslandığında, KYME10, KYME20 ve KYME30 yakıtlarının motorda kullanımıyla CO emisyonlarında %38-60 oranlarda, HC emisyonlarında %10-%35 gibi değışen oranlarda azalmalar, NO emisyonlarının ise yine karışım oranına bağılı olarak % 4-%10 gibi değışen oranlarda artışlar görülmüştür.

c) Hem deneysel hem de sayısal gerçekleştirilen yanma analizlerinde, KYME karışımli yakıtların silindir içi maksimum basınç ve ısı salınım oranlarını arttırdığı gözlemlenmiştir.

d) Sayısal yanma analizlerinde silindir içi basınç ve ısı salınım oranlarındaki değışimler ile deneysel veriler ile arasında büyük bir benzerlik tespit edilmiştir.

e) Hem deneysel hem de sayısal sonuçlar incelendiğinde, biodizel yakıtlarının motorin yakıtına kıyasla yüksek viskozite ve düşük buharlaşma derecesinin silindir içi basınç ve ısı salınım oranları üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

f) M100 yakıtına kıyasla, biodizel karışımli yakıtların yanma odasında varlığını daha uzun süre devam ettirdiği AVL FIRE programında gerçekleştirilen sayısal çalışmasında görülmüştür.

g) Farklı çalışma şartları ve yakıtlar kullanılarak, deneysel ve sayısal motor yanma analizleri gerçekleştirilebilir.

Teşekkür

Bu çalışmayı, TEKNO.020 No'lu proje kapsamında maddi olarak destekleyen CÜBAP'a ve çalışanlarına teşekkürlerimizi sunarız.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkısı eşittir.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiğı Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- [1] Acharya N., Nanda P., Panda S., Acharya S. 2017. Analysis of properties and estimation of optimum blending ratio of blended mahua biodiesel. Engineering Science and Technology, an International Journal, 20: 511-517.
- [2] Milano J., Ong H.C., Masjuk H.H., Silitonga A.S., Chen W.H., Kusumo F., Dharma S., Sebayang A.H. 2018. Optimization of biodiesel production by microwave irradiation-assisted transesterification for waste cooking oil-Calophyllum inophyllum oil via response surface methodology. Energy Conversion and Management, 158: 400-415.
- [3] Murillo S., Miguez J.L., Porteiro J., Granada E., Moran J.C. 2007. Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. Fuel, 86 (12): 1765-1771.

- [4] Hwang J., Qi D., Jung Y., Bae C. 2014. Effect of injection parameters on the combustion and emission characteristics in a common-rail direct injection diesel engine fueled with waste cooking oil biodiesel. *Renewable Energy*, 63: 9-17.
- [5] Damanik N., Ong H.C., Chong W.T., Silitonga A.S. 2017. Biodiesel production from *Calophyllum inophyllum*_palm mixed oil. *Energy Source Part A*, 39: 1283-1289.
- [6] Ibrahim A. 2018. An experimental study on using diethyl ether in a diesel engine operated with diesel-biodiesel fuel blend. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21: 1024-1033.
- [7] Agarwal A.K, Shrivastava A., Prasad R.K. 2016. Evaluation of toxic potential of particulates emitted from *Jatropha* biodiesel fuelled engine. *Renewable Energy*, 99: 564-572.
- [8] Ozener O., Yuksek L., Ergenc A.T., Ozkan M. 2014. Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics. *Fuel*, 115: 875-883.
- [9] An H., Yang W.M., Maghbouli A., Li J., Chou S.K., Chua K.J. 2013. Performance, combustion and emission characteristics of biodiesel derived from waste cooking oils. *Applied, Energy*, 112: 493-499.
- [10] Chellam S., Kulkarni P., Fraser M.P. 2005. Emissions of organic compounds and trace metals in fine particulate matter from motor vehicles: a tunnel study in Houston, Texas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 55 (1): 60-72.
- [11] Zhang Y., Boehman A.L. 2007. Impact of biodiesel on NOx emissions in a common rail direct injection diesel engine. *Energy Fuels*, 21 (4): 2003.
- [12] Szybist J.P., Boehman A.L., Taylor J.D, McCormick R.L. 2005. Evaluation of formulation strategies to eliminate the biodiesel NOx effect. *Fuel Process Technology*, 86 (10): 1109-1126.
- [13] Ozturk E. 2015. Performance, emissions, combustion and injection characteristics of a diesel engine fuelled with canola oil-hazelnut soap stock biodiesel mixture. *Fuel Process Technology*, 129: 183-191.
- [14] InWong K., Wong P.K., Cheung C.S., Vong C.M. 2013. Modeling and optimization of biodiesel engine performance using advanced machine learning methods. *Energy*, 55: 519-528.
- [15] Chiatti G., Chiavola O., Palmieri F., Albertini S. 2014. Combustion and emissions characterization of biodiesel blends in a city-car engine. *Energy Fuels*, 28 (8): 5076-5085.
- [16] Wei L., Cheung C.S., Ning Z. 2017. Influence of waste cooking oil biodiesel on combustion, unregulated gaseous emissions and particulate emissions of a direct-injection diesel engine. *Energy*, 127: 175-185.
- [17] An H., Yang W.M., Maghbouli A., Li J., Chou S.K., Chua K.J., Wang J.X., Li L. 2014. Numerical investigation on the combustion and emission characteristics of a hydrogen assisted biodiesel combustion in a diesel engine. *Fuel*, 120: 186-194.
- [18] Şanlı H., Canakçı 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: 179-187.
- [19] Chauhana B.S., Kumara N., Chob H.K. 2012. A study on the performance and emission of a diesel engine fueled with *Jatropha* biodiesel oil and its blends. *Energy*, 37: 616-622.
- [20] Ghobadian B., Rahimi H., Nikbakht A.M., Najafi G., Yusaf T.F. 2009. Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable Energy*, 34: 976-982.
- [21] Cetinkaya M., Ulusoy Y., Tekin Y., Karaosmanouğlu F. 2005. Engine and winter road test performances of used cooking oil originated biodiesel. *Energy Conversion and Management*, 46: 1279-1291.
- [22] Petranović Z., Bešenić T., Vujanović M., Duić N. 2017. Modelling pollutant emissions in diesel engines, influence of biofuel on pollutant formation. *Journal of Environmental Management*, 203: 1038-1046.
- [23] Attia A.M., Hassaneen A.E. 2016. Influence of diesel fuel blended with biodiesel produced from waste cooking oil on diesel engine performance. *Fuel*, 167: 316-328.
- [24] Qi D. H., Geng L. M, Chen H., Bian Y. Z., Liu J., Ren X.C. 2009. Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil. *Renewable Energy*, 34 (12): 2706-2713.

- [25] Karahan Ş. 2011. Biodiesel ile çalışan diesel motorunda ECFM-3Z (Extended Coherent Flame Model-3 Zones) modelinin performans ve emisyon simülasyonuna yaklaşım. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Alisarei A.T., Ghobadian B., Hashjin T.T., Mohtasebe S.S. 2012. Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends. *Fuel*, 102: 414-422.
- [27] Lee Y., Huh K.Y. 2013. Numerical study on spray and combustion characteristics of diesel and soy-based biodiesel in a CI engine. *Fuel*, 113: 537-545.
- [28] Saad I., Bari S, Hossain S. N. 2013. In-cylinder air flow characteristics generated by guide vane swirl and tumble device to improve air-fuel mixing in diesel engine using biodiesel. *Procedia Engineering*, 56: 363-368.
- [29] Hassan N.M.S, Rasul M.G., Harch C.A. 2015. Modelling and experimental investigation of engine performance and emissions fuelled with biodiesel produced from Australian Beauty Leaf Tree. *Fuel*, 150: 625-635.
- [30] Li H., Yang W., Zhou D., Yu W. 2018. Numerical study of the effects of biodiesel unsaturation on combustion and emission characteristics in diesel engine. *Applied Thermal Engineering*, 137: 310-318.
- [31] Lešnik L., Vajda B., Žunič Z., Škerget L., Kegl B. 2013. The influence of biodiesel fuel on injection characteristics, diesel engine performance, and emission formation. *Applied Energy*, 111: 558-570.
- [32] Paul G., Datta A., Mandal B.K. 2014. An Experimental and Numerical Investigation of the Performance, Combustion and Emission Characteristics of a Diesel Engine Fueled with Jatropa Biodiesel. *Energy Procedia*, 54: 455-467.
- [33] Boz N., Kara M., Sunal O., Alptekin E., Değirmenbaşı N. 2009. Investigation of the fuel properties of biodiesel produced over an alumina-based solid catalyst. *Turkish Journal of Chemistry*, 33: 433-442.
- [34] Elkelawya M., Bastawissia H.A., Esmaeila K.K., Radwana A.M., Panchalb H., Sadasivunic K.K, Ponnammac D., Walvekard R. 2019. Experimental studies on the biodiesel production parameters optimization of sunflower and soybean oil mixture and DI engine combustion, performance, and emission analysis fueled with diesel/biodiesel blends. *Fuel*: 255: 115791.