Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1055-1064

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions

Elif Sürer[1], Hamit Solmaz[2]*, Emre Yılmaz[3], Alper Calam[4], Duygu İpci[2]

[1]Department of Automotive Technology, Gelişim Vocational High School, İstanbul Gelişim University, Avcılar, İstanbul, Türkiye
[2]Automotive Engineering Department, Faculty of Technology, Gazi University, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye
[3]Department of Automotive Technology, Arifiye Vocational High School, Sakarya University of Applied Science, Arifiye, Sakarya, Türkiye
[4]Department of Machinery and Metal Technologies, Technical Sciences Vocational High School, Gazi University, Ostim, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Biodiesel combustion characteristics
- Combustion improvement by using carbon nanotube
- Enhancement of thermal efficiency and exhaust emissions

Keywords:

- Biodiesel
- Carbon nanotube
- Combustion analysis
- Engine performance
- Exhaust emission

Article Info:

Research Article
Received: 22.05.2020
Accepted: 14.05.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.741177

Acknowledgement:

This study was carried out with the contributions of the project numbered 07/2019-14 supported by Gazi University Scientific Research Projects (BAP). We thank Gazi University for its financial support.

Correspondence:

Author: Hamit Solmaz
e-mail: hsolmaz@gazi.edu.tr
phone: +90 312 202 8723

Graphical/Tabular Abstract

Biodiesel, especially when produced from waste oils, has the potential to be a good alternative and renewable fuel for compression ignition engines. The use of biodiesel not only contributes to the recycling of waste products, but also makes it possible to reduce soot, HC and CO emissions thanks to its oxygen content. For this reason, biodiesel is used as an alternative fuel in diesel engines in many countries. However, compared to diesel fuel, the high viscosity of biodiesel and its worse atomization characteristics cause its usage area to be limited. In order to improve these properties of biodiesel, research has been carried out on the use of various additives. In this study, the effects of carbon nanotube additive on the performance and emission characteristics of a single-cylinder direct injection diesel engine running on biodiesel-diesel fuel were investigated. Overview and the plan of the paper is seen on Figure A. Thermal efficiency, engine power and torque, and exhaust emissions were investigated in the experiments carried out depending on the engine speed at full load.

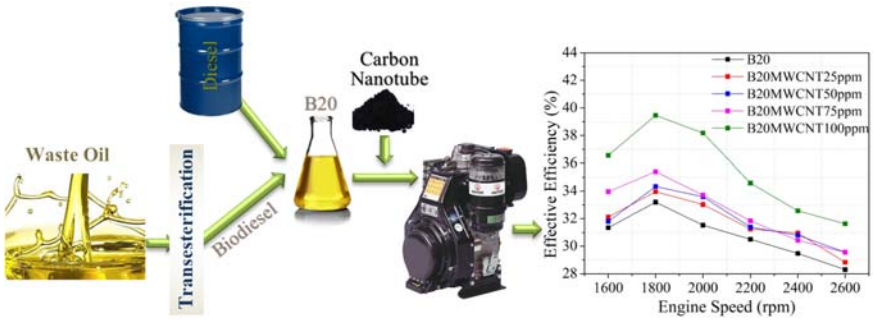


Figure A. Overview, plan and main result of the paper

Purpose: The high viscosity of biodiesel can deteriorate the spray characteristics and cause worsening of combustion. In this study, the effects of the addition of carbon nanotube, a metallic additive, to B20 fuel were investigated in order to improve fuel atomization and increase engine efficiency without changing the injection pressure.

Theory and Methods: Since there are studies in the literature that B20 fuel is the most optimal ratio for the use of biodiesel, in this study, the carbon nanotube ratio was changed by keeping the B20, which is a biodiesel-diesel mixture, proportionally constant. Multi-walled carbon nanotubes with an outer diameter of 4-16 nm, an inner diameter of 2-6 nm, a length of 15-35 µm and a specific surface area of 240 m2/g were used as additives at rates of 25, 50, 75 and 100 ppm. The experiments were carried out in a single-cylinder water-cooled direct injection diesel engine.

Results: Maximum thermal efficiency was achieved as 39.3% when 100 ppm carbon nanotube additive was used. It was also found that the carbon nanotube additive reduced CO, HC and soot emissions, but increased NOx emissions due to improved engine performance. It was determined that 100 ppm carbon nanotube additive increased NOx emissions by approximately 11%, whereas CO, HC and soot emissions decreased by 20%, 26% and 7.9%.

Conclusion: It has been observed that carbon nanotube improves engine performance when B20 fuel is used, and in this regard, its use as an additive may be appropriate. However, the long-term effect of this metallic additive on the fuel system elements and the potential to reduce high NOx, which is a result of increased engine performance when carbon nanotubes are used, should be investigated with after treatment systems.

Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38:2 (2023) 1055-1064

Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi
Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Dizel-biyodizel karışımına karbon nanotüp katkısının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi

Elif Sürer[1], Hamit Solmaz[2]*, Emre Yılmaz[3], Alper Calam[4], Duygu İpci[2]

[1]İstanbul Gelişim Üniversitesi, Gelişim Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Teknolojisi Bölümü, Avcılar, İstanbul, Türkiye
[2]Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara, Türkiye
[3]Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Arifiye Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Arifiye, Sakarya, Türkiye
[4]Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ostim, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Biyodizel yanma özellikleri
- Karbon nanotüp kullanılarak yanmanın iyileştirilmesi
- Termal verimliliğin ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 22.05.2020
Kabul: 14.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.741177

Anahtar Kelimeler:
Biyodizel,
karbon nanotüp,
yanma analizi,
motor performansı,
egzoz emisyonları

ÖZ

Çevresel kirlenmenin yol açtığı endişelerin giderek artması, içten yanmalı motorlarda daha temiz ve yenilenebilir yakıtların kullanımını arttırmıştır. Biyodizel pek çok ülkede dizel motorlarda alternatif yakıt olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında biyodizelin yüksek viskozitesi ve buna bağlı olarak daha kötü atomizasyon karakteristiği kullanım alanının sınırlı kalmasına neden olmaktadır. Biyodizelin bu özelliklerinin iyileştirilebilmesi amacıyla çeşitli katkı maddeleri kullanımı üzerine araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, karbon nanotüp katkı maddesinin, biyodizel-dizel yakıtı ile çalışan tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda performans ve emisyon karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Tam yükte motor hızına bağlı olarak gerçekleştirilen deneylerde, termik verim, motor gücü ve torku ile egzoz emisyonları incelenmiştir. Maksimum tork devrinde silindir içi basınç ve ısı dağılım oranı da analiz edilmiştir. Karbon nanotüp katkı maddesinin yanma başlangıcını öne aldığı ve termik verimi iyileştirdiği belirlenmiştir. Maksimum termik verim 100 ppm karbon nanotüp katkısı kullanıldığında %39,3 olarak elde edilmiştir. Karbon nanotüp katkı maddesinin CO, HC ve is emisyonlarını azalttığı ancak motor performansının iyileşmesine bağlı olarak NO_x emisyonlarını arttırdığı belirlenmiştir. 100 ppm karbon nanotüp katkısının NO_x emisyonlarını yaklaşık %11 arttırdığı, buna karşın CO, HC ve is emisyonları %20, %26 ve %7,9 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Investigation of the effect of carbon nanotube addition to diesel-biodiesel blend on engine performance and exhaust emissions

HIGHLIGHTS

- Biodiesel combustion characteristics
- Combustion improvement by using carbon nanotube
- Enhancement of thermal efficiency and exhaust emissions

Article Info

Research Article
Received: 22.05.2020
Accepted: 14.05.2022

DOI:
10.17341/gazimmfd.741177

Keywords:
Biodiesel,
carbon nanotube,
combustion analysis,
engine performance,
exhaust emission

ABSTRACT

Increasing concerns caused by environmental pollution have promoted the use of cleaner and renewable fuels in internal combustion engines. Biodiesel is used as an alternative fuel in diesel engines in many countries. However, compared to diesel fuel, the high viscosity of the biodiesel and consequently the poorer atomization characteristic causes its use to be limited. In order to improve these properties of biodiesel, researches have been conducted on the use of various additives. In this study, the effects of carbon nanotube additive on performance and emission characteristics of a single cylinder direct injection diesel engine powered by biodiesel-diesel fuel were investigated. In experiments carried out at full load depending on engine speed, thermal efficiency, engine power and torque and exhaust emissions were examined. The in-cylinder pressure and heat release rate were also analysed at the maximum torque speed. It was determined that the carbon nanotube additive advanced the start of combustion and improved thermal efficiency. Maximum thermal efficiency was achieved as 39.3% when 100 ppm carbon nanotube additive was used. It was also found that the carbon nanotube additive reduced CO, HC and soot emissions, but increased NO_x emissions due to improved engine performance. It was determined that 100 ppm carbon nanotube additive increased NO_x emissions by approximately 11%, whereas CO, HC and soot emissions decreased by 20%, 26% and 7.9%.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : esurer@gelisim.edu.tr , *hsolmaz@gazi.edu.tr , emreylmz@subu.edu.tr , acalam@gazi.edu.tr , duyguipci@gazi.edu.tr / Tel: +90 312 202 8723

1. Giriş (Introduction)

Isı enerjisini mekanik enerjiye çeviren içten yanmalı motorlar günümüz kara taşıtlarında kullanılan en yaygın güç kaynağıdır [1]. Sıkıştırma ile ateşlemeli (SA) ve buji ile ateşlemeli (BA) motorlar içten yanmalı motorların en çok tercih edilenleridir. Motor yapısının basit olması ve dayanıklı olmasının yanı sıra aynı özelliklerdeki BA motoruna göre daha yüksek ısıl verime sahip olmasından dolayı SA motorlar ulaşım, enerji üretimi ve tarım sektöründe ana güç kaynağı olarak daha çok tercih edilmektedir [2-5]. Bununla birlikte, dizel yakıtının SA motorlarda yanması ile çok yüksek miktarlarda azot oksit (NO_x) ve partikül madde (PM) gibi tehlikeli kirleticiler atmosfere yayılmaktadır. Araç egzoz emisyonlarını kontrol etmek için yapılan ve yapılacak mevzuatlar, NO_x ve PM emisyonlarının çok düşük seviyelerde tutulmasını gerektirmektedir. Ayrıca fosil yakıtların rezervleri hızlı bir şekilde tükenmektedir [6, 7]. Bu, birçok araştırmacıyı alternatif yakıt kullanma olanaklarını keşfetmeye teşvik etmektedir. Bilim insanları tarafından geleneksel olmayan enerji kaynaklarının araştırılması; sınırlı rezerve sahip petrol ürününün kullanımına artan talep, petrol fiyatlarının yükselmesi, küresel iklim değişiklikleri ve çevre kirliliği nedenleriyle sürekli genişlemektedir [8-10]. Biyodizel, SA motorlar için iyi bilinen bir alternatiftir. Biyolojik olarak parçalanabilir olması, daha az toksik yapısı, kendiliğinden yağlayıcılık özelliği ve daha iyi emisyon özellikleri nedeniyle ileriye dönük diğer alternatiflere göre daha avantajlı olduğu düşünülmektedir [11-13]. Ancak, bitkisel yağ maliyeti nedeniyle biyodizelin üretim maliyeti yüksektir. Biyodizel üretim maliyetinin %78'i üretim için kullanılacak bitki miktarına (stokuna) bağlıdır [12]. Biyodizel üretimi için yemeklik olmayan yağın kullanımı da sınırlıdır çünkü biyodizel üretimi için tarım arazilerinin kullanılması dolaylı olarak gıda üretimini etkilemektedir. Bu nedenle atık kızartma yağının yeniden kullanımı sadece biyodizelin üretim maliyetini önemli ölçüde düşürmekle kalmaz, aynı zamanda atıkların kamuya yönelik kanalizasyon bakımına ve yağlı atık su arıtımına da yardımcı olmaktadır [14]. Bu çalışmada Gazi Üniversitesi yemekhanesinin atık yağlarından elde edilen biyodizel kullanılmıştır. Birçok bilim insanı alkali katalizörlü transesterifikasyon metodu ile atık yağlardan biyodizel üretmişlerdir [12,14-16]. Katalizör olarak çoğunlukla potasyum hidroksit (KOH) ve sodyum hidroksit (NaOH) en yaygın kullanılan alkali katalizörlerdir, bununla birlikte KOH ile daha yüksek verim [17-20] elde edildiğinde bu çalışmada tercih edilmiştir. Transesterifikasyon esnasında esterleştirme işleminde ise metanol ve etanol en yaygın kullanılan alkollerdir. Bu çalışmada ve başka birçok çalışmada metanol, etanole göre hem düşük maliyetli oluşu hem de yüksek reaktivitesi [21, 22] nedeniyle tercih edilmektedir.

Gerek atık bitkisel ve hayvansal yağlardan gerekse hammadde kullanılarak üretilen biyodizel yakıtlar, dizelle benzer özelliklere sahiptir. İçeriğinde oksijen bulunması yanmayı iyileştirdiğinden ve ayrıca biyolojik olarak parçalanabilir, içeriğinde kükürt bulunmaması, toksik özelliklere sahip olmaması ve iyi bir yağlayıcı olması dizel yakıtına göre üstün yanları olarak gösterilmektedir [23-26]. Bunun yanı sıra konvansiyonel yakıtlara göre biyodizel daha yüksek parlama noktasına sahip olduğundan piyasadaki en güvenli yakıtlardan biri olarak görülmektedir [27, 28]. Bunlarla birlikte biyodizelin enerji içeriği dizel yakıtına göre düşük olması, soğukta ilk hareket problemi bulunması ve daha yüksek azotoksit (NO_x) emisyonlarına sahip olması dezavantajları olarak gösterilmektedir [29-31]. Bu sebeple biyodizel yakıt özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Son yıllarda biyodizel ile ilgili zorlukları aşmak için yakıt kalitesini, yanma verimini arttıran ve emisyonları azaltan nano yakıt katkı maddeleri katalizör olarak kullanılmaktadır [32]. Yanmayı iyileştirmek ve hidrokarbon yakıtların tüketimini ve emisyonları azaltmak için kullanılan bu katalizörler karışım yakıtlarındaki kararsızlığı ortadan kaldırmakta ve motor performansını artırmaktadırlar [33-35]. Ayrıca kullanılan bu nano katkı maddeleri, gerek gelişmiş yüzey alanı/hacim oranı, hızlı buharlaşma ve daha kısa tutuşma gecikmesi süresi [36, 37] özellikleri gerekse kullanıldığı yakıtların parlama noktası, kinematik viskozite vs. özelliklerini iyileştirmektedir [38, 39]. Yetter vd. [40] ve Dreizin [41] nano boyuttaki metalik tozların yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğunu ve yüksek reaktiviteye yol açabileceğini metal katkılı nanoparçacık yanması ile ilgili yaptıkları çalışmalarda belirtmişlerdir. Ayrıca hidrokarbon yakıtlara nano katkı maddeleri eklenmesinin tutuşma gecikmesini kısaltacağı ve is emisyonlarını azaltacağını ortaya koymuşlardır. Sabourin vd. [42], Roos vd. [43] ve Roger [44] yakıta nano boyutta katkı maddesinin eklenmesinin bir sıvı yakıt katalizörü görevi göreceğini ve böylece motorun ateşleme ve yanma özelliklerini geliştireceğini bildirmişlerdir. Dhahad vd. [45] nanopartiküllerin motor performansına ve emisyonlarına etkilerini tahmin etmek amacıyla bir model geliştirmişlerdir. Dört silindirli bir dizel motor kullandıkları çalışmada çinko oksit, alüminyum oksit ve titanyum oksit nanopartiküllerini 1500 rpm motor hızında ve 400 bar enjeksiyon basıncında test emişlerdir. Test sonuçlarını kullanarak geliştirdikleri modelin motor performansı ve emisyonlarını belirleme konusunda başarılı olduğunu ifade etmişlerdir. Ağbulut [46] titanyum dioksit nanopartikülü ile gerçekleştirdiği çalışmada partikül boyutunun içten yanmalı motordaki etkilerini incelemiştir. 28, 45 ve 200 nm boyutlarındaki titanyum dioksit nanopartiküllerini kanola metil esteri ve dizel yakıtı karışımına 100 ppm olarak ilave ederek tek silindirli hava ile soğutmalı bir dizel motorunda 1800 rpm motor hızında test etmiştir. Tek başına biyodizel kullanımının özgül yakıt tüketimini arttırdığını ancaktitanyum dioksit nanopartikülü ilavesiyle özgül yakıt tüketiminin azaldığını ifade etmiştir. 28 nm boyutundaki nanopartikül kullanıldığında özgül yakıt tüketiminin yaklaşık %17 azaldığı tespit edilmiştir. Basha ve Anand. [47-50], CNT ve Alümina nanoparçacıklarını; dizel, biyodizel, su-dizel emülsiyon yakıtlarına ekleyerek tek silindirli bir dizel motorda test etmişlerdir. Saf dizel ve biyodizele göre CNT katkılı yakıtlar kullanıldığında termik verimde kayda değer bir artış ve egzoz emisyonlarında azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Çalışmalarında Jatropha biyodizelini tercih etmişlerdir. Senthur vd. [51] kobalt krom nanopartikülünü sitronella yağı ile çalışan homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli bir motorda 30 ppm seviyesinde katkı olarak kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Kobalt krom katkısının motor termik veriminin ve ısı dağılımının arttırdığı belirlenmiştir. Buna karşın özgül yakıt tüketimi, hidrokarbon, karbon monoksit ve azor oksit emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı ifade edilmiştir. Kobalt krom ilavesinin içerdiği oksijenden dolayı ikincil bir oksidasyon katkısı sunarak HC emisyonlarını azalttığı belirtilmiştir. Bununla birlikte büyük yüzey hacim oranı ve yüksek katalitik etkisi sayesinde de CO emisyonlarının önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir. Böylece HCCI motorların en önemli sorunlarından olan yüksek HC ve CO emisyonlarına çözüm sunulduğu ifade edilmiştir. Ghafoori vd. [52], %20 atık kızartma yağı biyodizeli %80 dizel yakıt karışımına (B20) 2,5'dan 30 ppm'e kadar çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ilavesinin motor performansına etkilerini incelemişlerdir. Elde etikleri bulguları dizel yakıtı ile kıyasladıklarında; B20 yakıtı kullanımında tork ve gücün azaldığını, özgül yakıt tüketiminin ise arttığını belirtmişlerdir. Fakat B20 yakıtına MWCNT ilavesi ile motor performansını arttığını gözlemlemişlerdir. B20 yakıtına 30 ppm MWCNT ilave edilmesi ile dizel yakıtına göre güç ve torkun sırasıyla %17 ve %18 oranında arttığını bildirmişlerdir. Özgül yakıt tüketimindeki en yüksek iyileşmeyi ise %55 olarak B20 yakıtına 20 ppm MWCNT katkılı yakıt ile elde etiklerini belirtmişlerdir. Karışımdaki MWCNT oranına bağlı olarak CO ve HC emisyonlarının azaldığını da açıklamışlardır. Mirzajanzadeh vd. [53] ise, atık kızartma yağından elde ettikleri B5 ve B20 yakıtlarına MWCNT ve CeO_2 nanopartikül içeren katkı maddelerini eklemişler ve SA motorda performans ve egzoz emisyonlarına etkisini incelemişlerdir. B5 ve B20 yakıtına 30, 60 ve

90 ppm nanopartikül ilave etmişlerdir. Katkı maddesi miktarı arttıkça motor torkunun arttığını, özgül yakıt tüketiminin ise azaldığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde nanapartikül ilavesi ile NO_x, CO, UHC ve is emisyonlarının azaldığını bildirmişlerdir. Son olarak Tewari vd. [54], pongamia (honge) yağı biyodizeline 25 ve 50 ppm MWCNT ilavesini tek silindirli bir dizel motorunda test etmişlerdir. Biyodizele MWCNT eklenmesi ile motor termik veriminin arttığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte, MWCNT katkılı pongamia yağı biyodizeli yakıtlar da CO, UHC ve is emisyonlarının katkısız biyodizel yakıtlara göre azaldığını bildirmişlerdir. Literatürde çeşitli özelliklere sahip MWCNT katkısının farklı karışım yakıtlarına ilavesi ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. MWCNT nano katkısının iç ve dış çapı, uzunluğu ve özgül yüzey alanı, motor performansı ve emisyonları doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada dış çapı 4-16 nm, iç çapı 2-6 nm, uzunluğu 15-35 µm ve özgül yüzey alanı 240 m^2/g olan MWCNT kullanıldı. Ayrıca, atık yağların değerlendirilmesi için bu çalışmada kullanılan biyodizel yakıtı atık kızartma yağlarından üretildi. Hacimsel olarak %80 dizel yakıtı ile %20 biyodizel yakıtı karıştırıldı ve B20 deney yakıtı elde edildi. B20 yakıtına sırası ile 25, 50, 75 ve 100 ppm (B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75 ve B20MWCNT100) MWCNT ilave edildi. Hazırlanan test yakıtları tek silindirli, su soğutmalı bir SA deney motorunda tam yük şartlarında altı farklı motor devir sayısında (1600, 1800, 2000, 2200, 2400 ve 2600 d/d) test edildi ve motor performans ve emisyon değerleri referans B20 yakıtı ile karşılaştırmalı analizi yapıldı.

2. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Bu çalışmada tek silindirli, su soğutmalı ve doğrudan enjeksiyonlu Antor LD510 SA motor kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan test motorunun özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Deney düzeneği ise Şekil 1'de görülmektedir. Test motorunda yükleme işleminin yapılabilmesi için 10 kW (4000 d/d'da) güce kadar frenleme yapabilen Cussons P8160 markalı DC dinamometre kullanılmıştır. Silindir içi basıncın belirlenebilmesi için 0-150 bar aralığında ölçüm yapabilen ve 11,96 Pc/bar hassasiyetine sahip AVL 8QP500c basınç sensörü kullanılmıştır. Deneyler esnasında krank mili üzerine konumlandırılan 1000 pals'lik enkoder ile pistonun silindir içindeki pozisyonu anlık olarak belirlenmiştir. Cussons P4110 yanma analiz cihazı ile silindir içi ham basınç sinyalleri toplanmış ve yükseltilmiştir. Yükseltilen bu analog sinyaller National Instrument USB6259 veri toplama kartı ile dijital sinyallere dönüştürülmüştür. Dijital basınç sinyalleri ve enkoder verisi bilgisayara kaydedilmiştir. Her bir deney şartı için ardışık gerçekleşen 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Egzoz emisyonlarının ölçülmesinde Bosch BEA350 egzoz gaz analizörü kullanılmıştır. İs emisyonlarının ölçülmesinde ise AVL DiSmoke 400 cihazı kullanılmıştır. Egzoz gaz analizörü ve is opasimetresinin teknik özellikleri sırası ile Tablo 2 ve Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 1. Test motorunun teknik özellikleri
(The specifications of test engine)

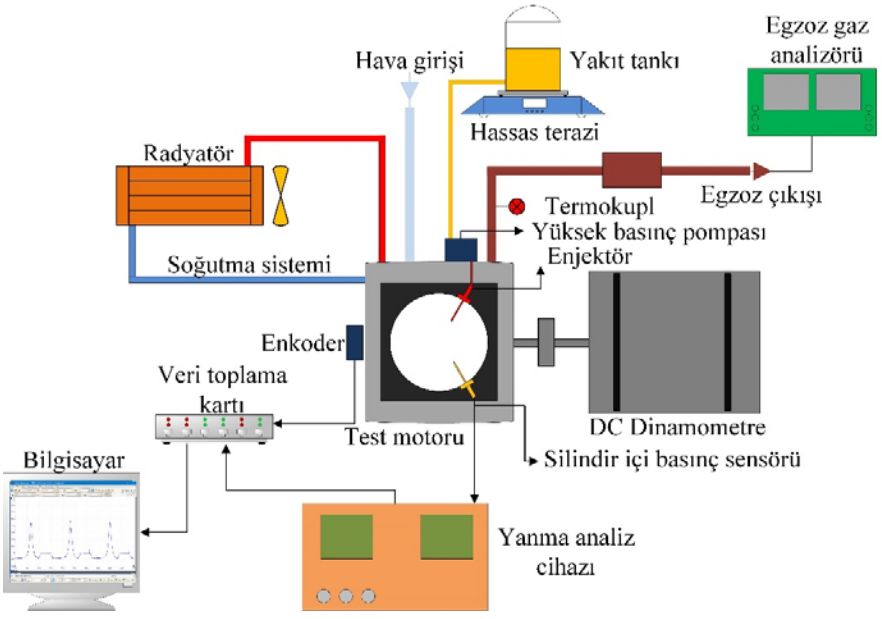
Motor Parametreleri	Özellik
Silindir sayısı	1
Silindir çapı, mm	85
Strok uzunluğu, mm	90
Silindir Hacmi, cm^3	510
Sıkıştırma oranı	17,5:1
Motorun nominal gücü (3000 d/d), kW	9
Maksimum tork (1800 d/d), Nm	32,8
Enjeksiyon tipi	Doğrudan
Nozul açılma basıncı, bar	190
Soğutma tipi	Su soğutmalı

Tablo 2. Egzoz gaz analizörünün teknik özellikleri
(The specifications of exhaust gas analyzer)

	Çalışma aralığı	Doğruluk
Lamda	0,5 - 9,999	±0,001
NO (ppm)	0 - 5000	±1
CO (% hacimsel)	0 - 10	±0,001
O_2 (% hacimsel)	0 - 22	±0,01
HC (ppm)	0 - 9999	±1

Tablo 3. İs opasimetresinin teknik özellikleri
(The specifications of smoke opacimeter)

Analizör	AVL DiSmoke 4000	
	Opasite	K faktör
Çalışma aralığı, %	0-100	0,1
Doğruluk, m^{-1}	0-99,99	0,01



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic diagram of experimental setup)

Biyodizel üretimi için yaygın olarak atık kızartma yağları tercih edilmektedir. Bu çalışmada Gazi Üniversitesi yemekhanesinden temin edilen atık kızartma yağları kullanılarak transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretilmiştir. Yemekhaneden alınan atık yağ biyodizel üretimine başlanmadan önce filtre edilmiştir ve içeriğindeki partiküller temizlenmiştir. Filtre edilen yağ 120°C sıcaklıkta 1 saat boyunca ısıtılarak içeriğindeki suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Transesterifikasyon işlemi esnasında %20 oranında ve %99,5 saflığa sahip metanol ve katalizör olarak %0,5 oranında sodyum hidroksit (NaOH) kullanılmıştır. Bu bileşenler 60°C sıcaklıkta transesterifikasyon yöntemiyle biyodizel üretimi için kullanılmıştır. Üretilen biyodizel, minimum 5 yıkama işlemine tabi tutularak gliserin uzaklaştırılmış ve saflaştırma işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen biyodizel ile dizel yakıtı, hacimsel olarak %20 biyodizel %80 dizel yakıtı olacak şekilde karıştırılarak referans B20 yakıtı elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan karbon nanotüp (MWCNT) katı toz halinde, koyu siyah renkli ve saflığı > %96'dır. Dış çapı 4-16 nm, iç çapı 2-6 nm ve uzunluğu 15-35 µm'dir. Özgül yüzey alanı ise 240 m^2/g'dır. MWCNT ve B20 yakıtının karışımını sağlamak için IsoLAB marka ultrasonik banyo (homojenizatör) kullanılmıştır. Maksimum 10 L kapasiteli homojenizatör içerisinde B20 yakıtı ile 25, 50, 75 ve 100 ppm MWCNT 30 dakika boyunca karıştırılmıştır. Karışım yakıtları 24 saat bekletilmiştir ve çökelme olmadığı gözlemlenmiştir. Deneyde kullanılan karışım yakıtlarının bileşimi ve bazı yakıtsal özellikleri sırası ile Tablo 4 ve Tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Deney yakıtlarının bileşimi (Composition of the fuel types)

Yakıt Tipi	Bileşimi
B20 (Hacimsel olarak %)	80% dizel + 20% biyodizel
B20MWCNT25	B20 + 25 ppm MWCNT
B20MWCNT50	B20 + 50 ppm MWCNT
B20MWCNT75	B20 + 75 ppm MWCNT
B20MWCNT100	B20 + 100 ppm MWCNT

Silindir içi basınç, ardışık 50 çevrim boyunca elde edilen verilerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bunun için MATLAB programlama kodu kullanılarak bir algoritma hazırlanmıştır. Yapılan termodinamik analiz ile silindir içi basınç, ısı dağılımı, yanma başlangıcı (CA10), yanma süresi (CA90-10), kümülatif ısı dağılımının %50'sinin gerçekleştiği krank açısı (CA50) ve indike termik verim hesaplanmıştır. Isı dağılımının belirlenebilmesi için termodinamiğin birinci yasasından faydalanılmıştır. Bu nedenle bir çevrim boyunca kütle ve gaz kaçakları ihmal edilmiştir. Silindirden silindir duvarına gerçekleşen ısı transferi, ısı yayılım oranını belirlemek için hesaplanmıştır. Krank açısına bağlı olarak ısı yayılım oranı Eş. 1 ile hesaplanmıştır.

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

Burada dQ, P, V, $d\theta$, k ve $\frac{dQ_{ISI}}{d\theta}$ sırasıyla net ısı çıkışı, silindir basıncı ve silindir hacmi, krank açısının değişimi, özgül ısıların oranını ve silindir duvarına ısı transferini ifade etmektedir. Termik verim Eş. 2 ile hesaplanmıştır.

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{\dot{m}_{biyodizel} \times Q_{AID\,biyodizel} + \dot{m}_{dizel} \times Q_{AID\,dizel}} \quad (2)$$

Burada W_{net}, $\dot{m}_{biyodizel}$, $\dot{m}_{dizel}$, $Q_{AID\,biyodizel}$ ve $Q_{AID\,dizel}$ sırasıyla net işi, çevrim başına biyodizel ve dizelin yakıt tüketimini, biyodizel ve dizelin alt ısıl değerlerini ifade etmektedir. W_{net}'in hesaplanması için Eş. 3 kullanılmıştır.

$$W_{net} = \int P dV \quad (3)$$

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results And Discussion)

Bu bölümde B20, B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75 ve B20MWCNT100 yakıtlarının tam yükte altı farklı motor devir sayılarında (1600, 1800, 2000, 2200, 2400 ve 2600 d/d) yapılan deneyler sonucunda elde edilen motor performans ve emisyon eğrileri yorumlanmıştır.

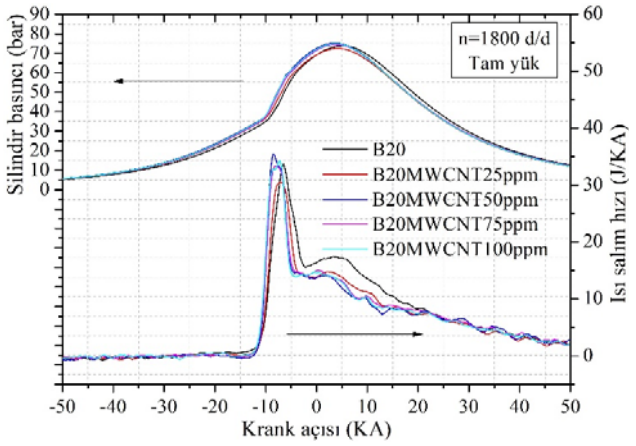
Şekil 2 maksimum motor momentinin elde edildiği devir hızı olan 1800 d/d'da B20 ve katkılı test yakıtlarının kullanımında silindir basıncı ve ısı salım hızı eğrilerini göstermektedir. Motorun statik püskürtme avansı ÜÖN'dan önce 18° krank açısıdır. Şekil 2'de görülen ısı dağılımı eğrileri incelendiğinde ÜÖN'dan önce 18° den başlamak üzere eğrilerin negatif bölgeye indiği görülmektedir. Bunun nedeni silindir içerisine yakıtın püskürtülmesi ve püskürtülen yakıtın buharlaşması sırasında silindirden ısı çekmesidir. Yakıtın püskürtülmeye başlamasından tutuşma başlangıcına kadar geçen süre tutuşma gecikmesi olarak isimlendirilmektedir. Şekil 2'de görüldüğü üzere, buharlaşan yakıt tutuştuğu anda silindirde biriken yakıtın tamamının yanmaya iştirak etmesiyle ısı açığa çıkış hızı artmakta ve ısı salım hızı eğrisi hızla yükselmektedir. Ancak B20 yakıtı kullanıldığında meydana gelen ısı salım hızındaki artış MWCNT katkılı yakıtlara göre daha yavaştır. MWCNT katkısı yakıtın yüzey gerilmelerini azaltarak püskürtme sırasında daha iyi bir atomizasyon gerçekleşmesini sağlamaktadır. Buna bağlı olarak tutuşma gecikmesi sürecinde yakıt daha kolay buharlaşabilmektedir. Sonuç olarak yanma başladığında havanın içerisine daha homojen bir şekilde karışan yakıtın büyük bir kısmı yanmaya iştirak ederek yanma hızının B20 yakıtına göre daha yüksek olmasını sağlamaktadır [36]. Aynı zamanda MWCNT kullanımının yanma başlangıcını avansa aldığı, diğer bir ifadeyle tutuşma gecikmesi süresini de azalttığı görülebilmektedir. Bununla birlikte maksimum silindir basıncı değerlerinin çok fazla değişmediği görülmektedir. Difüzyon yanma fazı incelendiğinde ise MWCNT katkısı kullanıldığında daha düşük ısı salım hızı ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum is emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunabilir.

Motor devir sayısına bağlı olarak maksimum silindir içi basınç ve ısı salınım hızı değerleri sırası ile Tablo 6 ve Tablo 7'de görülmektedir. İçten yanmalı motorlar optimum motor devir sayısında silindir içerisine maksimum taze karışımı aldığı için bu şartlar altında en yüksek moment ve en düşük özgül yakıt tüketimi değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikle bu şartlar altında yanma verimi artar,

Tablo5. Deney yakıtlarının özellikleri (Properties of test fuels)

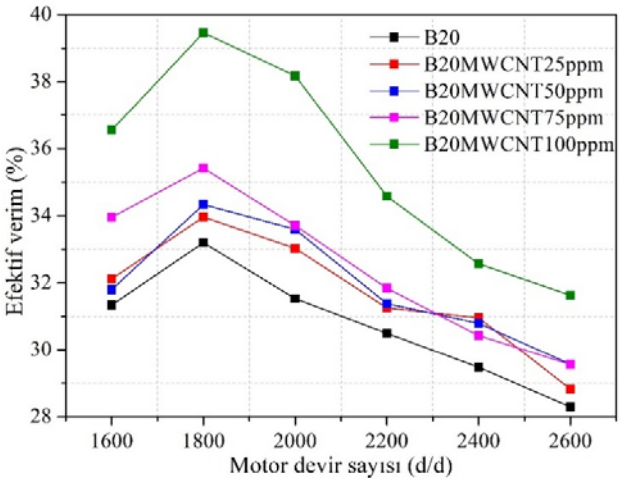
	Alt ısıl değer [kJ/kg]	Yoğunluk [15°C'de kg/m^3]	Parlama noktası [°C]	Kinematik viskozite [40°C'de cst]	Cetane number
B20	43325	843,2	76	3,19	52,5
B20MWCNT25	43369	843,9	74	3,15	52,9
B20MWCNT50	43401	845,2	71	3,09	53,4
B20MWCNT75	43448	846,9	69	2,97	54,1
B20MWCNT100	43616	848,1	67	2,95	55,3

pik silindir basınç değerleri elde edilir ve açığa çıkan ısı enerjisi de artış gösterir. Maksimum motor momentinin elde edildiği motor devir sayısından daha düşük çalışma şartlarında manifold vakumu yeterince yüksek olmadığı için silindir içine alına taze dolgu miktarı da azalır. Bu durum, motor performansının daha düşük elde edilmesine neden olur. Maksimum motor momentinin elde edildiği motor momentinden daha yüksek çalışma şartlarında ise manifold vakumu yeterince yüksektir ancak emme supabının birim zamanda daha kısa süre açık kalması silindir içerisine alınan taze dolgunun azalmasına yol açar. Bu durum motor performansını olumsuz yönde etkiler [38]. Bu çalışmada maksimum motor momenti 1800 d/d'da elde edildi. Tablo 6 ve Tablo 7 incelendiğinde maksimum silindir basınç değerlerinin ve ısı salınım miktarlarının tüm test yakıtları için bu şartlarda elde edildiği görülmektedir. B20 yakıtına MWCNT ilave edilmesi karışım yakıtlarının alt ısıl değerini artırdı. Bu durum silindir içine sürülen enerji miktarını da artırdığından maksimum silindir basıncı ve ısı salınım miktarı da artış gösterdi. En yüksek silindir basıncı ve ısı salınım değerleri tüm motor devir sayılarında B20MWCNT100 ile elde edildi. El-Seesy vd. [33], MWCNT katkısının silindir içi pik basıncı artırdığını doğruladı.



Şekil 2. Silindir basıncı ve ısı salım hızının krank mili açısına göre değişimleri
(The variation of cylinder pressure and heat release rate versus crank angle)

Şekil 3 tam yükte motor devrine bağlı termik verimin değişimini göstermektedir. En yüksek efektif verim 1800 d/d motor devir sayısında % 39,3 olarak B20MWCNT100 yakıtı ile elde edildi. Motorun maksimum tork devri olan 1800 d/d'da silindir içerisinde maksimum miktarda dolgu alınabilmekte ve buna bağlı olarak tüm test yakıtları ile en yüksek termik verim bu devirde kaydedilmiştir. MWCNT kullanımına bağlı olarak efektif verimin B20 yakıtına göre arttığı görülmektedir. MWCNT katkısı karışım yakıtlarının atomizasyonunu iyileştirmektedir. Böylece yakıt daha homojen bir karışım teşkil edebilmekte ve bunun sonucunda yanma reaksiyonları da iyileşmektedir. Ayrıca MWCNT'nin yüksek yüzey/hacim oranı nedeniyle silindir içi sıcaklıkları da artmaktadır. Silindir içindeki hava-artık gaz karışımının sıcaklığının artması da silindire püskürtülen yakıtın daha kolay ve hızlı bir şekilde buharlaşmasına imkân sağlamaktadır. Ghafoori vd. [52], MWCNT konsantrasyonunun yakıt özelliklerini iyileştirdiğini ve termik verimi artırdığını doğruladı.



Şekil 3. Motor devrine bağlı efektif verim değişimi
(The variaton of effective efficiency versus engine speed)

Şekil 4, test yakıtlarının deney motorunda kullanılması sonucu farklı hızlarda motorun güç değişimlerini göstermektedir. 1600'den 2600 d/d'ya kadar, güç keskin bir şekilde arttığı görülmektedir. Motorlarda güç çıkışının iki önemli faktör olan devir sayısı ve motor torkunun etkisinde kaldığı bilinmektedir. Genel olarak, B20 yakıtına ilave edilen MWCNTlerin miktarını arttırarak motor gücünde de artışa, bu da yakıtın faydalı işinin daha iyi yanmaya ve efektif enerji dönüşümüne sebep olmaktadır. Bu artışın nedeni, nanopartiküllerin yüzey/hacim oranını yükseltilmesiyle birlikte iyileşen ısı transfer katsayısına, yakıtın karbon ile zenginleştirilmesine ve biyodizelden kaynaklanan oksijen içeriğiyle yanmanın iyileşmesine bağlanabilir [55]. B20 yakıtı ile B20MWCNT25, B20MWCNT50,

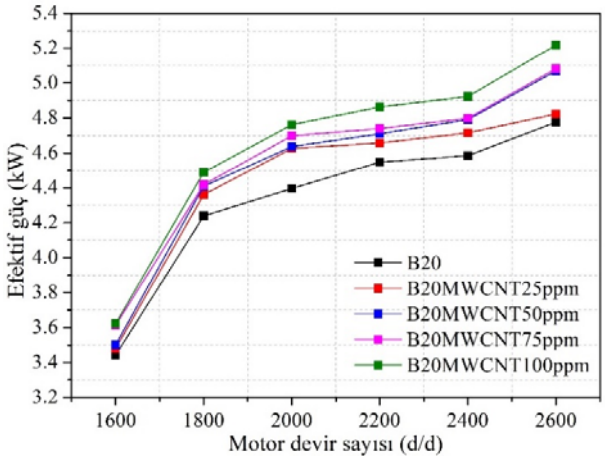
Tablo 6. Farklı motor hızlarında maksimum silindir basıncı değerleri (Maximum cylinder pressure values at different engine speeds)

	B20	B20MWCNT25	B20MWCNT50	B20MWCNT75	B20MWCNT100
1600 d/d	72,66 bar	72,89 bar	73,21 bar	74,67 bar	75,01 bar
1800 d/d	73,85 bar	73,95 bar	74,46 bar	75,27 bar	75,30 bar
2000 d/d	73,11 bar	73,54 bar	73,55 bar	74,82 bar	74,89 bar
2200 d/d	71,5 bar	71,62 bar	72,08 bar	73,69 bar	73,91 bar
2400 d/d	69,42 bar	70,48 bar	71,13 bar	72,57 bar	72,87 bar
2600 d/d	67,38 bar	68,05 bar	69,32 bar	70,09 bar	71,08 bar

Tablo 7. Farklı motor hızlarında maksimum ısı salınım hızı değerleri (Maximum heat release rate values at different engine speeds)

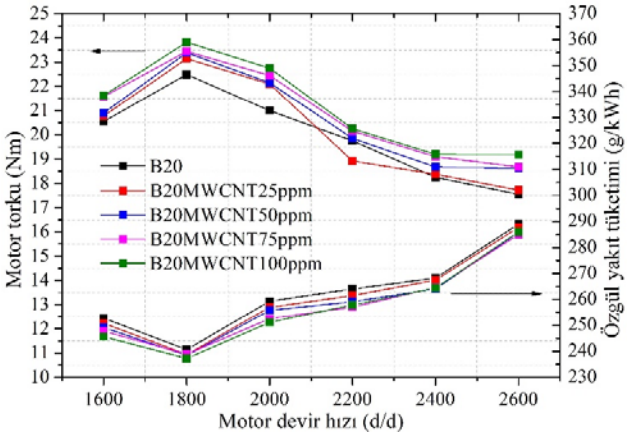
	B20	B20MWCNT25	B20MWCNT50	B20MWCNT75	B20MWCNT100
1600 d/d	31,64 J/KA	32,16 J/KA	34,01 J/KA	34,64 J/KA	36,4 J/KA
1800 d/d	33,79 J/KA	33,82 J/KA	35,41 J/KA	35,82 J/KA	37,13 J/KA
2000 d/d	32,04 J/KA	33,08 J/KA	33,98 J/KA	34,3 J/KA	35,59 J/KA
2200 d/d	30,85 J/KA	31,14 J/KA	32,15 J/KA	33,24 J/KA	34,4 J/KA
2400 d/d	29,78 J/KA	30,58 J/KA	31,26 J/KA	32,1 J/KA	33,62 J/KA
2600 d/d	27,06 J/KA	29,44 J/KA	30,22 J/KA	30,79 J/KA	31,83 J/KA

B20MWCNT75, B20MWCNT100 test yakıtları karşılaştırıldığında, karbon nanotüp katkısı kullanılan yakıtlarda yaklaşık olarak sırasıyla %2,61, %4,35, %5,26 ve %7,28 oranında motor gücünde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Motor efektif gücünün devir sayısına göre değişimi
(The variation of power versus engine speed)

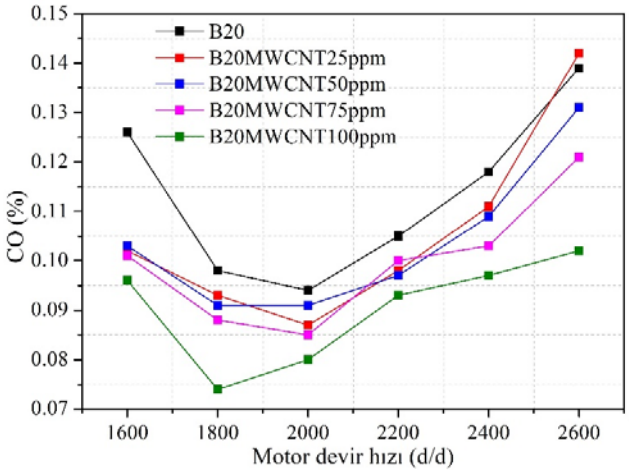
Şekil 5, B20 yakıtı ve B20 yakıtına 25, 50, 75 ve 100 ppm değerlerinde MWCNT eklenmesiyle elde edilen 4 farklı test yakıtının motor torku üzerindeki etkisini göstermektedir. Tüm yakıtlar için maksimum torkun 1800 d/d'da meydana geldiği ve daha yüksek motor hızlarında torkun azaldığı görülmektedir. Motor devrini 1800'den 2000'e, 2200'e, 2400'e ve ardından 2600 d/d'ye yükselterek, B20 yakıtı kullanımı ile elde edilen tork değerlerine kıyasla B20MWCNT25 yakıtı kullanımı ile tork sırasıyla ortalama % 2,89, % 5,24, -% 4,18, % 0,68, % 1 artış göstermektedir. B20MWCNT50 yakıtı kullanımı ile ise tork sırasıyla ortalama % 4, % 5,19, % 0,5, % 2,33, % 6,13 artış, B20MWCNT75 yakıtı kullanımı ile % 4,22, % 6,90, % 2,03, % 4,66, % 6,41 ve son olarak B20MWCNT100 yakıtı kullanımı ile % 5,89, % 8,33, % 7,59, % 5,21, % 9,26 artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, emme stroku sırasında supapların tamamen açık olmasına rağmen, daha yüksek hızlardan dolayı silindirin eksik doldurulmasından kaynaklanmaktadır. Başka bir deyişle hacimsel verimin azalmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü, hava girişi ve silindir basıncını yükseltmek için yeterli zaman yoktur, bu da yanma basıncının düşmesine neden olmaktadır. Sonuç olarak, hareketli parçaların ataleti artmakta ve motor torku beklenen değerden düşük olmaktadır [56,57]. Yakıt karışımlarındaki nanotüplerin konsantrasyonu arttırıldığında çıkış torku artmakta, bu da silindir içindeki yanmanın ürettiği enerjinin daha eksiksiz olduğunu ve yanma kalitesinin arttığını göstermektedir. Sonuç olarak, ortalama basınç daha büyüktür, bu da piston kuvvetinde ve torkunda bir artışa yol açmaktadır. MWCNT katkısı karışım yakıtlarının setan sayısını artırmaktadır. Bu durum yakıtın hızlı buharlaşmasını sağlamakta ve yanma verimi artmaktadır. Ayrıca test edilen tüm yakıtlar için motor devir sayısına karşı özgül yakıt tüketimindeki (ÖYT) varyasyonları da Şekil 5'de gösterilmektedir. Tüm hızlarda B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75 ve B20MWCNT100 yakıtları daha düşük ÖYT'ye sahipken, B20yakıtı daha yüksek ÖYT'ye sahiptir. Genel olarak, B20 karışımına MWCNT eklenmesi Şekil 4'te görüldüğü gibi gücü artırmakta, yanmayı iyileştirmekte ve ÖYT'yi azaltmaktadır. Motorun maksimum tork devir sayısında minimum ÖYT değerleri elde edildikten sonraki devir sayısı artışlarına paralel olarak tüm yakıtlar için ÖYT'leri de artış göstermektedir. B20 yakıtına 25, 50, 75 ve 100 ppm karbon nanotüplerin eklenmesiyle, ortalama ÖYT'nin tüm yakıt karışımları için B20 yakıtına kıyasla sırasıyla %0,74, %1,44, %1,84 ve %2,08 azaldığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni, MWCNTler'le birlikte oksijen moleküllerinin varlığı nedeniyle bu yakıtların daha yüksek efektif verimleridir (veya daha düşük ÖYT). Bu yakıtlar arasında, B20MWCNT100'ün düşük ÖYT'sinin önemli bir nedeni, viskozitedeki düşüşün daha yüksek yoğunluk ve setan indeksi değerleridir [58]. Bu durum, MWCNT kullanımı ile daha iyi yakıt kalitesi elde edildiğinin bir göstergesidir. Ghafoori vd. [52], biyodizel yakıtına MWCNT ilave edilmesiyle yanmanın hızlandığını ifade etti. Daha kısa sürede gerçekleşen oksidasyon reaksiyonları yanma verimini artırdı ve böylece referans B20 yakıtına göre motor momenti artarken özgül yakıt tüketimi de azaldı.



Şekil 5. Motor torkunun ve özgül yakıt tüketiminin motor devir sayısına göre değişimi
(The variation of engine torque and specific fuel consumption versus engine speed)

Şekil 6'da motor devir sayısına bağlı olarak tüm test yakıtlarının denenmesi sonucunda açığa çıkan CO emisyonları gösterilmektedir. CO emisyonu, oksijen eksikliğinden dolayı yanmanın tam olarak gerçekleşmemesinden kaynaklanan insan sağlığı için oldukça zararlı bir egzoz emisyonu bileşenidir. Silindir içerisinde yeterli miktarda oksijen bulunmaması, bölgesel aşırı zengin karışım şartları, silindir duvarlarına yakın bölgelerde ısı kayıplarına bağlı olarak alevin sönmesi ya da yanmanın hiç gerçekleşmemesi nedeniyle CO emisyonları artış gösterir [33]. B20 yakıtına MWCNT ilave edilmesi, karışım yakıtlarının termal iletkenlik özelliklerinin iyileşmesi sağlar [35]. Sıkıştırma zamanı sonunda MWCNT nano katkısı oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırır ve yanma verimini iyileştirir. Bu durum CO emisyonlarının azalmasına neden olur [8]. Şekil 6 incelendiğinde en düşük CO emisyon değerleri tüm motor hızlarında B20MWCNT100 yakıtı ile elde edildi. Motor hız karakteristiği incelendiğinde tüm yakıtlar için düşük motor hızlarında CO emisyonları yüksek, optimum motor hızında (1800 d/d) minimum seviyede ve yüksek motor hızlarında tekrar artış göstermektedir. Bunun temel nedeni düşük motor devir sayılarında hacimsel verimin düşük olmasına bağlı olarak oksidasyon reaksiyonları oldukça yavaştır. Bu durum CO emisyonlarının tüm test yakıtlarında yüksek olmasına neden olur. Maksimum motor momentinin elde edildiği 1800 d/d motor devir sayısında, hacimsel verim artmakta ve buna bağlı olarak yanma iyileşmektedir. En yüksek efektif verim yine bu motor hızı şartlarında kaydedildi (Şekil 3). Daha yüksek motor devir sayılarında ise hacimsel verim azalmakta ve aynı zamanda yanma için yeterli sürenin bulunmaması nedeniyle CO emisyonları tüm test yakıtları için tekrar artış göstermektedir. Referans B20 yakıtı ile B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75, B20MWCNT100 test yakıtları karşılaştırıldığında CO emisyonları sırası ile ortalama %6,77, %4,42, %11,93 ve %20,18 oranında azalma göstermiştir. Selvan vd. [56], MWCNT ve Cerium oksit katkılarının

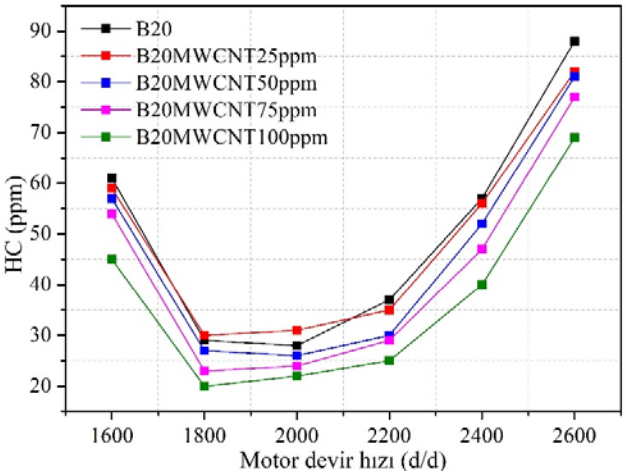
eş zamanlı olarak biyodizel yakıtlarında yanma iyileştirici katkı maddeleri olarak kullanılabileceğini ortaya koydu. Metalik özellikli bu katkılar CO emisyonlarını azaltmada önemli rol oynamaktadır.



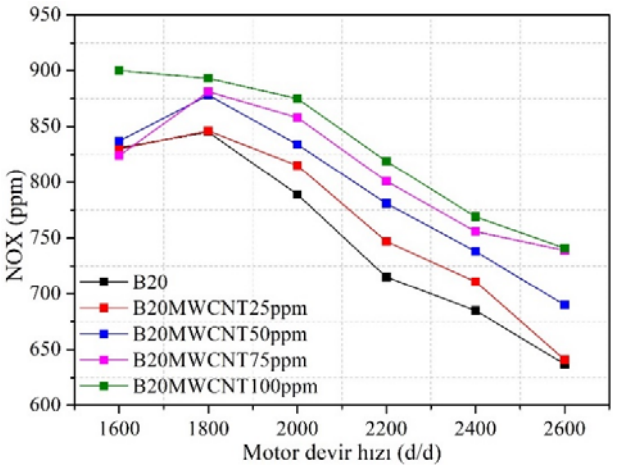
Şekil 6. CO emisyonunun motor devir sayısına göre değişimi
(The variation of CO emissions versus engine speed)

Şekil 7'de B20 ve MWCNT katkılı yakıtlarının kullanılmasıyla HC emisyonlarının tam yükte motor devir sayısına bağlı değişimi görülmektedir. HC emisyonları yakıtın tam olarak yakılamaması sonucunda egzoz gazları içerisinde yer almaktadır. HC emisyonlarının oluşmasının ana nedenleri yetersiz oksijen ve düşük yanma sıcaklığı sonucunda silindir içerisinde yanmanın tamamlanamamasıdır [59]. Tüm motor devir sayılarında B20 yakıtının kullanılmasıyla elde edilen HC emisyonu değerleri diğer test yakıtlarıyla ölçülen değerlere göre daha yüksek olduğu Şekil 7'de görülmektedir. Test yakıtlarında MWCNT miktarı arttıkça HC emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. Bunun nedeni yakıta MWCNT ilavesi ile setan sayısı artmakta, yakıt daha iyi atomize olmakta ve karışım yanma odasına çok daha iyi yayılmaktadır [36,58]. Bu sayede yanma verimi artmakta ve ayrıca karışımın yanma odasına daha iyi yayılması ile yanmamış HC oyuk (crevice) bölgelerde oluşması pek mümkün olmamakta ve karışımdaki karbon MWCNT miktarı arttıkça HC emisyonları azalmaktadır. B20 yakıtı ile B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75, B20MWCNT100 test yakıtları karşılaştırıldığında, MWCNT katkısı kullanılan yakıtlarda yaklaşık olarak sırasıyla ortalama %2,33, %9, %15,33 ve %26,33 oranlarında CO emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir. B20 yakıtına göre ortalama %26,33 oranında HC emisyonlarında en yüksek azalma B20MWCNT100 yakıtı ile elde edilmiştir. HC emisyonlarındaki değişim Hosseini vd. [58]'ne ait çalışma ile eşleşmektedir. Biyodizel yakıtına MWCNT ilavesi, yanma özelliklerinin iyileşmesine bağlı olarak HC emisyonlarını azaltır.

NO_x emisyonunun oluşumu, enjeksiyon zamanlaması, yanma zamanlaması, maksimum ısı salınım hızı ve maksimum sıcaklığın baskın etkilerinden kaynaklanmaktadır. B20 yakıtı kullanımı ile motor devir sayısı arttıkça NO_x emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir (Şekil 8). Bununla birlikte MWCNT miktarı arttıkça NO_x emisyonlarında da artış olduğu görülmektedir. B20 yakıt karışımlarına MWCNT eklenmesi setan sayısını artırmakta ve bu durum daha iyi atomizasyon ve yanma odasında daha iyi karışım dağılımı sayesinde yanmayı iyileştirir ve bu sayede silindir basıncı ve buna karşılık gelen sıcaklıkta bir artış meydana gelmektedir. Zeldovich mekanizması gereği azot oksit emisyonunda artış meydana gelmektedir [60]. Şekil 2 incelendiğinde silindir basıncı değerlerinin test yakıtlarındaki MWCNT miktarı arttıkça arttığı görülmektedir. B20 yakıtı ile karşılaştırıldığında B20MWCNT25 yakıtı kullanımı ile NO_x emisyonunda ortalama %1,95 artış meydana gelirken B20MWCNT50 yakıtı kullanımı ile yaklaşık %5,69 artış gözlemlenmiştir. Aynı şekilde B20MWCNT75 yakıtı kullanımı ile ortalama %7,93, B20MWCNT100 yakıtı kullanımı ile ise ortalama %11 artış ile en yüksek artış gözlemlenmiştir. Hosseini vd. [58], B5 ve B10 MWCNT ilavesinin etkisini incelediğinde benzer sonuçlar elde etti. Biyodizel yakıtına MWCNT katkısı, yanmayı iyileştirirken oksidasyon reaksiyonları sonucu açığa çıkan pik sıcaklığın da artmasına neden olur. Bu durum NOX emisyonlarını artırır.



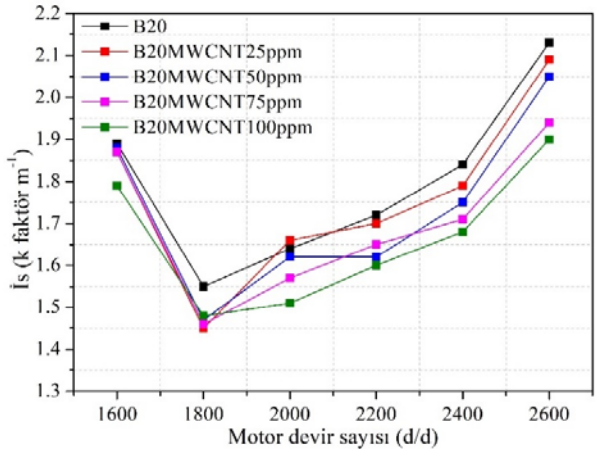
Şekil 7. HC emisyonlarının motor devir sayısına göre değişimi
(The variation of HC emissions versus engine speed)



Şekil 8. NO_x emisyonunun motor devir sayısına göre değişimi
(The variation of NO_x emissions versus engine speed)

Karbon parçacıkları veya kurum içeren partikül madde (PM) emisyonları, dizel emisyonlarının en karmaşık olanıdır. İs emisyonları Şekil 9'da görüldüğü üzere maksimum tork devri olan 1800 d/d'de bütün test yakıtları için en düşük değere sahiptir. Motor devri arttıkça tüm yakıtlar için is emisyonları artış göstermiştir. MWCNT miktarı arttıkça test yakıtlarının yanması sonucu açığa çıkan is emisyonları azalmaktadır. Bunun iki temel nedeni vardır. Birincisi nanotüp eklendiğinde yakıtın viskozitesi azalmaktadır [58]. İkinci etken ise is emisyonu oluşması için yanma odasında yeteri kadar oksijen olmamasından dolayı karışımın birden kavrulmasıdır. MWCNT ilavesi ile yanma verimi artmakta ve B20 yakıtına göre is emisyonu azalmaktadır. B20 yakıtı ile B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75, B20MWCNT100 test yakıtları karşılaştırıldığında yaklaşık olarak sırasıyla %1,95, %3,53, %5,29 ve %7,52 oranında

karbon nanotüp katkısı kullanılan yakıtlarda is emisyonlarında azalma gözlemlenmiştir.



Şekil 9. İs emisyonunun motor devir sayısına göre değişimi
(The variation of smoke emissions versus engine speed)

4. Sonuçlar (Conclusions)

MWCNT karışımlı yakıt harmanlarının, performansı artırma ve dizel motordan kaynaklanan emisyonları azaltma konusunda potansiyel avantajlara sahiptir. Bu çalışmada, standart dizel yakıtına %20 oranında atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizel ilavesi ile edilen B20 yakıtına dört farklı oranda (25, 50, 75 ve 100 ppm) çift duvarlı karbon nanotüp katkısı eklenmesiyle oluşturulan yakıt harmanları (B20MWCNT25, B20MWCNT50, B20MWCNT75 ve B20MWCNT100) tek silindirli, su soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu Antor LD510 marka SA motorda test edilmiştir. Performansı, egzoz emisyonları ve silindir basıncını değerlendirmek üzere kıyaslanmıştır. Çalışmaya dayanarak aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Harman yakıtlardaki katkı maddesi miktarı arttıkça özgül yakıt tüketimi azalmıştır.
- Motorun efektif verimi yakıtın içerisindeki katkı maddesindeki artışla artmaktadır.
- Nanopartiküllerin daha yüksek yüzey alanı / hacim oranıyla geliştirilen yanma özellikleri, daha fazla yakıtın hava ile reaksiyona girmesini sağlamaktadır.
- CO, HC ve duman emisyonları, B20'ye kıyasla MWCNT nanoparçacıklarının eklenmesiyle önemli ölçüde azalırken, NO_x emisyonu, MWCNT nanoparçacıkları harmanlanmış biyodizel kullanımı ile daha yükselmektedir. Azot oksit emisyonlarında, silindir basıncındaki ve silindir içi sıcaklıktaki artıştan dolayı katkı maddesi arttıkça artış görülmektedir.
- Çevreyi korumak için dizel motorun egzozundan atılabilecek yanmamış MWCNT'lerin çevreye etkilerini araştırmak için çalışmalar yapılabilir.
- Nanopartiküllerin silindir içerisinde daha yüksek difüzyon hızına ve daha yüksek radyasyonlu ısı emilimine (gelişmiş ısı transferi)'ne neden olmaktadır.
- Farklı ana maddelerden üretilen biyodizel yakıtı çeşitleri dizel yakıtı ile harmanlanarak, farklı yoğunluklarda MWCNT'ler kullanımı ile yeni çalışmalar yapılabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) tarafından desteklenen 07/2019-14 numaralı projenin katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesine sağladığı mali destek için teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Yılmaz E., Polat S., Solmaz H., Aksoy F., Çınar C., Thermodynamic comparison of crank-drive and rhombic-drive mechanisms for a single cylinder spark ignition engine, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 595-606, 2019.
2. Zhu M., Ma Y., Zhang D., Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine, Applied Energy, 91, 166–172, 2012.
3. Solmaz H., Yamık H., Uyumaz A., Polat S., Yılmaz E., Direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda dizel ve jet-A1 yakıt karışımlarının yanma, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkileri üzerine deneysel bir çalışma, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 36 (2), 51-60, 2016.
4. Çelik M., Solmaz H., Yücesu H.S., Yılmaz E., Kanola Metil Esterine N-Heptan Katkısının Motor Performansı ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi, Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi, 36 (1), 9-16, 2016
5. Halis S., Nacak Ç., Solmaz H., Yılmaz E., Yücesu H.S., HCCI bir motorda oktan sayısının yanma karakteristikleri ve motor performansı üzerine etkilerinin incelenmesi, Isi Bilimi ve Teknigi Dergisi/Journal of Thermal Science & Technology, 38 (2), 2018.
6. Solmaz H., Ardebili S.M.S., Aksoy F., Calam A., Yılmaz E., Arslan M., Optimization of the operating conditions of a beta-type rhombic drive stirling engine by using response surface method, Energy, 198, 117377, 2020.
7. Calam T.T., Investigation of the electrochemical behavior of phenol using 1H-1, 2, 4-triazole-3-thiol modified gold electrode and its voltammetric determination, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 835-844, 2020.
8. Ardebili S.M.S., Taghipoor A., Solmaz H., Mostafaei M., The effect of nano-biochar on the performance and emissions of a diesel engine fueled with fuel oil-diesel fuel, Fuel, 268, 117356, 2020.
9. Mahla S. K., Ardebili S.M.S., Sharma H., Dhir A., Goga G., Solmaz H., Determination and utilization of optimal diesel/n-butanol/biogas derivation for small utility dual fuel diesel engine, Fuel, 289, 119913, 2021
10. Solmaz H., Ardebili S.M.S., Aksoy F., Calam A., Yılmaz,E., Arslan M., Optimization of the operating conditions of a beta-type rhombic drive stirling engine by using response surface method, Energy, 198, 117377, 2020
11. Solmaz H., Ardebili S.M.S., Calam A., Yılmaz E., İpci D., Prediction of performance and exhaust emissions of a CI engine fueled with multi-wall carbon nanotube doped biodiesel-diesel blends using response surface method, Energy, 227, 120518, 2021
12. Yilmaz E., Solmaz H., Polat S., Altin M., Effect of the three-phase diesel emulsion fuels on engine performance and exhaust emissions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28(1), 127-134,2013
13. Khedri B., Mostafaei M., Ardebili S.M.S., Flow-mode synthesis of biodiesel under simultaneous microwave–magnetic irradiation, Chinese Journal of Chemical Engineering, 27 (10), 2551-2559, 2019.
14. Kannan G.R., Karvembu R., Anand R., Effect of metal based additive on performance emission and combustion characteristics of diesel engine fuelled with biodiesel, Applied Energy, 88, 3694-3703, 2011.
15. Leung D.Y.C., Guo Y., Transesterification of neat and used frying oil: optimization for biodiesel production, Fuel Processing Technology, 87, 883–890, 2006.
16. Dorado M.P., Ballesteros E., Mittelbach M., Lopez F.J., Kinetic parameters affecting the alkali-catalyzed transesterification process of used olive oil, Energy Fuels, 18 (5), 1457–1462, 2004.
17. Cvengros Z.C., Used frying oils and fats and their utilization in the production of methyl esters of higher fatty acids, Biomass Bioenergy, 27, 173–181, 2004.
18. Issariyakul T., Kulkarni M.G., Dalai A.K., Bakhsh N.N., Production of biodiesel from waste fryer grease using mixed methanol/ethanol system, Fuel Processing Technology, 88, 429–436, 2007.
19. Sinha S., Agarwal A.K., Garg S., Biodiesel development from rice bran oil: transesterification process optimization and fuel characterization, Energy Conversion Management, 49, 1248–1257, 2009.

20. Vicente G., Martinez M., Aracil J., Integrated biodiesel production: a comparison of different homogenous catalysts systems, Bioresource Technology, 92, 297–305, 2004.

21. Demirbas A., Biodiesel production from vegetable oils via catalytic and non-catalytic super critical methanol transesterification methods. Progress in Energy and Combustion Science, 31, 466–487, 2005.

22. Sharma Y.C., Singh B., Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13, 1646–1651, 2009.

23. Jiaqiang E., Pham M., Zhao D., Deng Y., Le D., Zuo W., Zhang Z., Effect of different technologies on combustion and emissions of the diesel engine fueled with biodiesel: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 80, 620-647, 2017.

24. Shahir S.A., Masjuki H.H., Kalam M.A., Imran A., Ashraful A.M., Performance and emission assessment of diesel–biodiesel–ethanol/bioethanol blend as a fuel in diesel engines: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 62-78, 2015.

25. Valente O.S., Pasa V.M.D., Belchior C.R.P., Sodré J.R., Physical–chemical properties of waste cooking oil biodiesel and castor oil biodiesel blends, Fuel, 90 (4), 1700-1702, 2011.

26. Moser B.R., Vaughn S.F., Evaluation of alkyl esters from Camelina sativa oil as biodiesel and as blend components in ultra-low-sulfur diesel fuel, Bioresource Technology, 101 (2), 646-653, 2010.

27. Ramadhas A.S., Jayaraj S., Muraleedharan C., Biodiesel production from high FFA rubber seed oil, Fuel, 84 (4), 335-340, 2005.

28. Gülüm M., Bilgin A., Density, flash point and heating value variations of corn oil biodiesel–diesel fuel blends, Fuel Processing Technology, 134, 456-464, 2015.

29. Thangaraja J., Anand K., Mehta P.S., Biodiesel NOx penalty and control measures-a review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 61, 1-24, 2016.

30. Giakoumis E.G., Sarakatsanis C.K., Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition, Fuel, 222, 574-585, 2018.

31. Jiaqiang E., Liu G., Zhang Z., Han D., Chen J., Wei K., Yin Z., Effect analysis on cold starting performance enhancement of a diesel engine fueled with biodiesel fuel based on an improved thermodynamic model, Applied Energy, 243, 321-335, 2019.

32. Muthusamy S., Nallathambi S.S., kumar Ramasamy R., Mohamed S.T., Effects of nanoparticles blended biodiesel on single cylinder CI engine, Materials Today: Proceedings, 5 (2), 6831-6838, 2018.

33. El-Seesy A.I., Abdel-Rahman A.K., Bady M., Ookawara S.J.E.C., Performance, combustion, and emission characteristics of a diesel engine fueled by biodiesel-diesel mixtures with multi-walled carbon nanotubes additives, Energy Conversion and Management, 135, 373-393, 2017.

34. Pirouzfar V., Zarringhalam Moghaddam A., Mirza B., Physicochemical properties and combustion performance of gas oil–fuel additives, Journal of energy resources technology, 134 (4), 041101, 2012.

35. Saxena V., Kumar N., Saxena V.K., A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and biodiesel fuelled CI engine, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 563-588, 2017.

36. Basha J.S., Anand R.B., Performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine using Carbon Nanotubes blended Jatropha Methyl Ester Emulsions, Alexandria engineering journal, 53, 259-273, 2014.

37. Tyagi H., Phelan P.E., Prasher R., Peck R., Lee T., Pacheco J.R., Arentzen P., Increased hot-plate ignition probability for nanoparticle-laden diesel fuel, Nano letters, 8 (5), 1410-1416, 2008.

38. Seffati K., Honarvar B., Esmaeili H., Esfandiari N., Enhanced biodiesel production from chicken fat using CaO/CuFe2O4 nanocatalyst and its combination with diesel to improve fuel properties, Fuel, 235, 1238-1244, 2019.

39. Wen L., Wang Y., Lu D., Hu S., Han H., Preparation of KF/CaO nanocatalyst and its application in biodiesel production from Chinese tallow seed oil, Fuel, 89 (9), 2267-2271, 2010.

40. Yetter R.A., Risha G.A., Son S.F., Metal particle combustion and nanotechnology, Proceedings of the Combustion Institute, 32 (2), 1819-1838, 2009.

41. Dreizin E.L., Phase changes in metal combustion. Progress in Energy and Combustion Science, 26 (1), 57-78, 2000.

42. Sabourin J.L., Dabbs D.M., Yetter R.A., Dryer F.L., Aksay I.A., Functionalized graphene sheet colloids for enhanced fuel/propellant combustion, ACS nano, 3 (12), 3945-3954, 2009.

43. Roos J.W., Richardson D., Claydon D.J., U.S. Patent Application No. 11/533,200, 2008.

44. Scattergood R., U.S. Patent Application No. 10/542,770, 2006.

45. Dhahad H.A., Hasan A. M., Chaichan M. T., Kazem H.A., Prognostic of diesel engine emissions and performance based on an intelligent technique for nanoparticle additives, Energy, 238, 121855, 2022.

46. Ağbulut Ü., Understanding the role of nanoparticle size on energy, exergy, thermoeconomic, exergoeconomic, and sustainability analyses of an IC engine: A thermodynamic approach, Fuel Processing Technology, 225, 107060, 2022.

47. Basha J.S., Anand R.B., An experimental investigation in a diesel engine using carbon nanotubes blended water–diesel emulsion fuel, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 225 (3), 279-288, 2011.

48. Basha J.S., Anand R.B., An experimental study in a CI engine using nanoadditive blended water–diesel emulsion fuel, International journal of green energy, 8 (3), 332-348, 2011.

49. Basha J.S., Anand R.B., Role of nanoadditive blended biodiesel emulsion fuel on the working characteristics of a diesel engine, Journal of Renewable and Sustainable energy, 3 (2), 023106, 2011.

50. Basha J.S., Anand R.B., Effects of nanoparticle-blended water biodiesel emulsion fuel on working characteristics of a diesel engine, International Journal of Global Warming, 2 (4), 330-346, 2010.

51. Senthur N.S., Anand C., Ramesh Kumar M., Elumalai P.V., Shajahan M.I., Benim A.C., Parthasarathy M., Influence of cobalt chromium nanoparticles in homogeneous charge compression ignition engine operated with citronella oil, Energy Science & Engineering, 10 (4), 1251-1263, 2022.

52. Ghafoori M., Ghobadian B., Najafi G., Layeghi M., Rashidi A., Mamat R., Effect of nano-particles on the performance and emission of a diesel engine using biodiesel-diesel blend, International Journal of Automotive & Mechanical Engineering, 12, 3097-3108, 2015.

53. Mirzajanzadeh M., Tabatabaei M., Ardjmand M., Rashidi A., Ghobadian B., Barkhi M., Pazouki M., A novel soluble nano-catalysts in diesel–biodiesel fuel blends to improve diesel engines performance and reduce exhaust emissions, Fuel, 139, 374-382, 2015.

54. Tewari P., Doijode E., Banapurmath N.R., Yaliwal V.S., Experimental investigations on a diesel engine fuelled with multiwalled carbon nanotubes blended biodiesel fuels, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 3 (3), 72-76, 2013.

55. Ichinose N., Ozaki Y., Kashii S., Superfine Particle Technology, Science & Business Media, Springer, London Limited, London, 2012.

56. Selvan V.A.M., Anand R.B., Udayakumar M., Effect of Cerium Oxide Nanoparticles and Carbon Nanotubes as fuel-borne additives in Diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine, Fuel, 130, 160-167, 2014.

57. Hosseini S.H., Taghizadeh-Alisaraei A., Ghobadian B., Abbaszadeh-Mayvan A., Effect of added alumina as nano-catalyst to diesel-biodiesel blends on performance and emission characteristics of CI engine, Energy, 124, 543-552, 2017.

58. Hosseini S.H., Taghizadeh-Alisaraei A., Ghobadian B., Abbaszadeh-Mayvan A., Performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with carbon nanotubes and diesel-biodiesel blends, Renewable Energy, 111, 201-213, 2017.

59. Payri F., Bermudez V.R., Tormos B., Linares W.G., Hydrocarbon emissions speciation in diesel and biodiesel exhausts, Atmospheric Environment, 43, 1273-1279, 2009.

60. Heydari-maleney K., Taghizadeh-alisaraei A., Ghobadian B., Abbaszadeh-Mayvan A., Analyzing and evaluation of carbon nanotubes additives to diesohol-B2 fuels on performance and emission of diesel engines, Fuel, 196, 110-123, 2017.