

Dizel Motorda Yakıt Katkı Maddesi Olarak Nanopartiküllerin Kullanımının Araştırılması

Erdal Çilgin^{*1}, Halis Deviren²

*^{1,2} Dicle Üniversitesi Diyarbakır Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, DİYARBAKIR

(Alınış / Received: 27.02.2024, Kabul / Accepted: 30.03.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 30.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Dizel Motor,
Katkı Madde,
Nano Partikül
Yanma,
Emisyon

Öz: Bu çalışma, %80 dizel yakıtı (DY) ve %20 terebentin yağından elde edilen biyodizelin karışımı olan B20 yakıtına magnezyum oksit (MgO) nanopartikülleri (NP) eklenerek oluşturulan B20-NP yakıtının yanma ve emisyon performansının, standart B20 ve DY'ye kıyasla detaylı analizini sunmaktadır. Araştırma, öncelikle terebentin yağından (TY) esterifikasyon ve transesterifikasyon yöntemleri ile biyodizel üretimini içermekte, ardından bu biyodizel ile DY karışımından test yakıtlarının hazırlanmasını takip etmektedir. Elde edilen yakıtlar, dizel motorunda yapılan testlerle değerlendirilmiştir. Test sonuçları, B20-NP yakıtının, standart B20'ye göre karbon monoksit (CO) emisyonlarında %1,26 azalma, hidrokarbon (HC) emisyonlarında %6,98 düşüş ve azot oksit (NO_x) emisyonlarında %4,65 artış sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, B20-NP yakıtının yanma performansının incelenmesi, silindir içi basınçta (SB) %1,85, net ısı salınım hızında (NISH) %3,03 ve ortalama gaz sıcaklıklarında (OGS) %6,62 oranında iyileşme sağladığını göstermiştir. Bu bulgular, MgO nanopartikülleri ile iyileştirilmiş biyodizel yakıt karışımlarının, dizel motorların yanma ve emisyon karakteristiklerini iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Investigating the Use of Nanoparticles as Fuel Additive in Diesel Engine

Keywords

Diesel Engine,
Additive,
Nano Particles,
Combustion,
Emission

Abstract: This study presents a detailed analysis of the combustion and emission performance of B20-NP fuel, which is created by adding magnesium oxide (MgO) nanoparticles (NPs) to B20 fuel—a mixture of 80% diesel fuel (DF) and 20% biodiesel obtained from turpentine oil (TO) —compared to standard B20 and DF. The research primarily involves the production of biodiesel from TO through esterification and transesterification methods, followed by the preparation of test fuels from a mixture of this biodiesel and DF. The obtained fuels were evaluated through tests conducted on a diesel engine. The test results revealed that the B20-NP fuel led to a 1.26% reduction in carbon monoxide (CO) emissions, a 6.98% decrease in hydrocarbon (HC) emissions, and a 4.65% increase in nitrogen oxide (NO_x) emissions compared to the standard B20. Furthermore, the examination of the combustion performance of the B20-NP fuel has demonstrated improvements of 1.85% in cylinder inside pressure (CP), 3.03% in net heat release rate (NHRR), and 6.62% in mean gas temperatures (MGT). These findings highlight the potential of biodiesel fuel mixtures enhanced with MgO NPs to improve the combustion and emission characteristics of diesel engines.

*İlgili Yazar, email: erdal.cilgin@dicle.edu.tr

1. Giriş

Küresel düzeyde karşılaşılan en ciddi meselelerden biri, azalan enerji kaynaklarının varlığıdır. Enerji, üretim faaliyetlerinde önemli bir maliyet faktörü olarak öne çıkmakta ve ek olarak çevresel kirliliğin artmasına neden olmaktadır [1]. Yukarıda belirtilen nedenler, enerji sektöründe sürdürülebilir ve ekolojik açıdan zararsız çözümlere olan talebi artırmıştır. Bu bağlamda, sürdürülebilirlik ve çevresel etkileri göz önünde bulundurarak, alternatif enerji kaynaklarına yönelik artan bir ilgi ve yoğun araştırma çabası gözlemlenmektedir [2]. Ayrıca, geleneksel enerji kaynaklarının piyasadaki rekabeti, yakıt fiyatlarındaki dalgalanmalar ve hızla tükenen rezervler gibi olumsuzluklar, alternatif yakıt kaynaklarına olan arayışı hızlandırmaktadır [3]. Alkol, bitkisel yağlar ve biyodizel gibi yenilenebilir enerji kaynakları, enerji ihtiyaçlarını karşılama ve emisyon değerlerini düşürme açısından uygun bir alternatif olarak değerlendirilmektedir [4]. Biyoyakıtlar, biyolojik olarak parçalanabilme, düşük aromatik ve kükürt içeriği gibi özelliklerle sürdürülebilirlik avantajları sunmaktadır. Bu yakıtlar, özellikle düşük karbon ayak izi ve sürdürülebilir özellikleri sayesinde önem kazanmaktadır. İçten yanmalı motorlarda, dizel yakıtına bir alternatif olarak kabul edilen biyodizel, bu tür yakıtlar arasında dikkat çekici bir konuma sahiptir [2]. Dizel yakıtlarla benzer özelliklere sahip olmaları, sıvı formda bulunmaları ve mevcut yakıtlarla karıştırılarak kullanılabilir olmaları, bu yakıtlara önemli avantajlar kazandırmaktadır [5]. Yaklaşık %10 oksijen içermesi yanma sürecini iyileştirmekte ve HC, partikül madde (PM), karbondioksit (CO₂) ve CO gibi egzoz gazı emisyonlarının azaltmada önemli bir rol oynamaktadır. Buna karşın, düşük enerji değeri ve setan indeksi, petrol bazlı dizel yakıtı kıyasla %8-10 daha az maksimum motor torku üretme gibi biyodizelin bazı sınırlılıkları arasında yer almaktadır [5,6]. Biyodizel yakıtlarının yanma verimliliğinin artırılması amacıyla çeşitli yöntemler mevcut olmakla birlikte, son zamanlarda NP'lerin katkı maddesi olarak dizel motorlarında kullanılması öne çıkan bir yaklaşım haline gelmiştir. NP'ler, hacimlerine kıyasla geniş yüzey alanları ve yüksek kimyasal tepkime kapasiteleri ile dikkat çekmektedir [6,7]. NP'ler, sıvı yakıtlar içerisinde atomizasyon sürecini geliştirerek, optimal hava-yakıt karışım oranlarının oluşumuna katkıda bulunurlar [8,9].

Sonuç olarak, bu çalışma, nanopartiküllerin (NP'ler) dizel ve biyodizel karışımli yakıtlara katkısıyla motor performansının, emisyon azaltımının ve yanma verimliliğinin iyileştirilmesi potansiyelini detaylı bir şekilde incelemektedir. İtalya, Yunanistan, Suriye, Türkiye, Tunus gibi birçok Akdeniz ülkesinde yaygın olarak bulunan yabani bir tür bitki olan [10,11] Menengiç (Pistacia terebinthus) ağacı meyvelerinden elde edilen yağın esterifikasyon ve transesterifikasyon işlemleri sonucu üretilen biyodizele, litre başına 150 mg nano boyutlu MgO eklenmesi ve bu karışımın dizel test motorunda değerlendirilmesi, literatürdeki mevcut çalışmalara yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. Bu araştırmanın, dizel motor teknolojisinde NP'lerin kullanımının önemini vurgulaması ve alternatif yakıt kaynaklarının geliştirilmesine yönelik potansiyel katkıları literatürdeki boşluğu doldurarak, sürdürülebilir enerji çözümlerine önemli bir katkı sağlaması beklenmektedir. Elde edilen bulgular, 1500 rpm sabit motor devri ve çeşitli motor yüklerinde yapılan testler sonucunda, referans yakıt değerleri ve mevcut literatürle karşılaştırılmış, böylece çalışmanın yeniliği ve literatürdeki önemi daha vurgulu bir şekilde ifade edilmiştir. Bu çerçevede, NP katkılı yakıt karışımlarının motor performansına, emisyon azaltımına ve yanma verimliliğine etkileri üzerine yapılan bu araştırma, hem teorik hem de pratik açıdan önemli katkılar sunmaktadır.

2. Materyal ve Metot

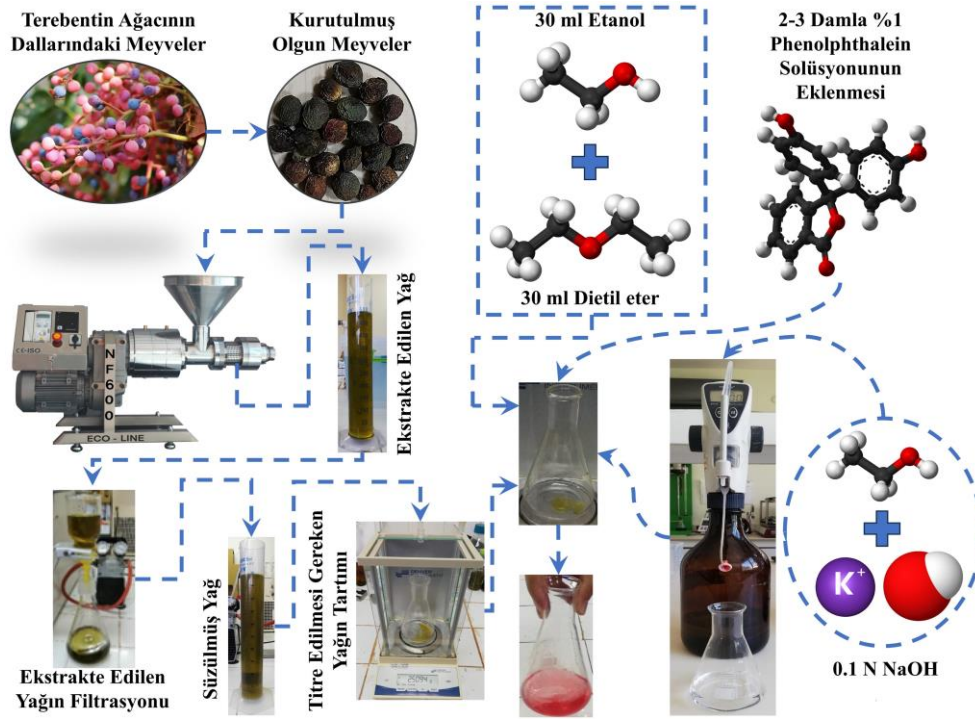
Bu çalışmada biyodizel üretimi amacıyla kullanılan TY, Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde, 41° 57' doğu boylamı ve 37° 55' kuzey enlemi koordinatlarında konumlanan Siirt ilinde bulunan, ticari olarak faaliyet gösteren bir işletmeden temin edilmiştir. İlgili işletme, piyasaya sunduğu yağları, soğuk pres yöntemiyle üretmektedir. Araştırmada kullanılan kimyasal maddeler; %1 Phenolphtalein Çözeltisi, Diethyl Eter (C₂H₅)₂O, Etanol (C₂H₅OH), Metil Alkol (CH₃OH), Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sülfürik Asit (H₂SO₄), Merck markası altında sağlanarak kullanılmıştır.

2.1. Terebentin yağının serbest yağ asiti (SYA) tayini

TY'nin biyodizele dönüştürülmesi sürecinde, yağdaki SYA yüzdesi, ölçümü için 2,5 gram yağa 2-3 damla %1 Phenolphtalein Çözeltisi eklenerek 0.1N NaOH solüsyonu ile titrasyon yapılması sonucunda tespit edilmiştir. Şekil 1'de belirtildiği üzere, çözeltilinin rensiz durumdan pembe renge dönüşmesiyle titrasyon işlemi tamamlanmış ve serbest %SYA Denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\%SYA = \frac{V \times 0.028 \times 100}{m} \quad (1)$$

Burada, SYA, Serbest Yağ Asitleri yüzdesini (%), V, 0.1 N NaOH'un hacmini (ml) ve m ise terebentin yağı kütlesini (g) ifade etmektedir.



Şekil 1. Terebentin ağacı meyvelerinden yağ ekstraksiyonu ve titrasyon işlemi

Biyodizel üretim prosedüründe SYA seviyelerinin ölçülmesi, üretim kalitesi, işlem verimliliği ve ekonomik etkinlik açısından hayati bir denetim mekanizması olarak ön plana çıkmaktadır. Bu tespitler, işlem parametrelerinin optimize edilmesine, uygun ekipman seçimine ve katalizör seçimlerine yönelik kararların alınmasına önemli katkılar sağlayarak, biyodizel üretiminin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır. Yükselen SYA seviyeleri, alkali katalizörlerle yürütülen tek aşamalı transesterifikasyon sürecinin zorlaşmasına neden olabilir ve metil esterlerin formasyonunu negatif yönde etkileyebilir. Esterifikasyon işlemi sonrası SYA düzeylerinin düşürülmesi, transesterifikasyon sürecinin daha etkin bir biçimde gerçekleşmesine imkân sağlar. Van Gerpen'in [12] yürüttüğü çalışmada, SYA düzeyinin %5 veya daha yüksek olduğu durumlarda, biyodizel sentezinden önce esterifikasyon işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada, TY örneğinin SYA düzeyi, titrasyon metodolojisi kullanılarak ve Denklem (1) yardımıyla %5,8 olarak belirlenmiştir.

2.2. Terebentin yağının gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) analizi

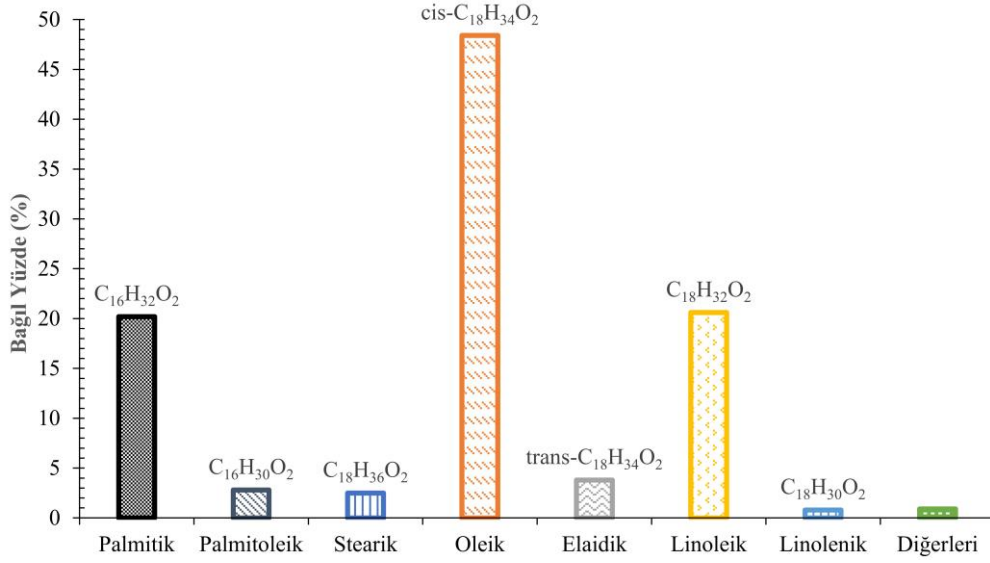
Araştırmamızda, biyodizel sentezi için kullanılan Terebentin meyvesinden elde edilen ham yağın bileşenlerinin nispi oranlarını saptamak üzere GC-MS analizi uygulanmıştır. %10 (h/h) hekzan içinde hazırlanan örneğin 40:1 bölütlenme oranında 1 µL'si cihaza enjekte edilmiş ve analiz işlemi bu parametreler altında gerçekleştirilmiştir.

Biyoyakıt üretiminde kullanılan bitkisel veya hayvansal kökenli yağların yağ asidi kompozisyonları, üretilen yakıtın kinematik viskozite, oksidasyon stabilitesi, setan indeksi gibi kritik özelliklerini belirlemede önemli bir role sahiptir. Bu özellikler, biyodizel üretiminde elde edilen yağ asidi metil esterlerinin (YAME) profili ile doğrudan ilişkilidir. Stearik asit (C18:0), oleik asit (C18:1), linoleik asit (C18:2), linolenik asit (C18:3), palmitik asit (C16:0) ve palmitoleik asit (C16:1) içeren YAME profilleri, standart biyodizel üretimi için tercih edilen yağ asidi bileşimlerini temsil etmektedir. Bu bileşimler, biyodizelin temel standartlarını karşılayacak şekilde uygunluk sağlamaktadır.

TY'nin GC-MS analiz sonuçları Şekil 2'de gösterildiği üzere grafiksel olarak sunulmuştur. Analiz sonuçlarına göre, doymuş yağ asitleri (DYA) arasında yer alan palmitik (C16:0) ve stearik (C18:0) asitlerinin toplamda bağlı yüzde olarak %22,7'lik bir orana sahip olduğu belirlenmiştir. Tekli doymamış yağ asitleri (TDYA) kategorisinde; palmitoleik (C16:1), oleik (cis-C18:1) ve elaidik (trans-C18:1) asitlerin toplam bağlı yüzdesi %55 olarak tespit edilmiştir. Çoklu doymamış yağ asitleri (ÇDYA) içerisinde linoleik (C18:2) ve linolenik (C18:3) asitlerin toplamı ise bağlı yüzde olarak %21,4'e karşılık gelmektedir. Bu veriler, analiz edilen TY örneğinin yağ asidi kompozisyonunun detaylı bir profilini sunmaktadır.

Bu çalışmada incelenen TY numunesinde, TDYA içerisinde oleik asit en yüksek orana sahip olup, tüm yağ asitleri içerisinde %48,4'lük bir paya ulaşmıştır. Bu bulgu, incelenen TY'nin ağırlıklı olarak doymamış yağ asitlerinden (%76,4 toplam bağlı yüzde) oluştuğunu göstermektedir. Elde edilen bu veriler, TY'nin yağ asidi bileşiminin,

biyodizel üretimi için tercih edilen yağ asitleri profiliyle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, söz konusu TY, biyodizel sentezi bağlamında değerlendirildiğinde, potansiyel bir ham madde olarak önem taşımaktadır.



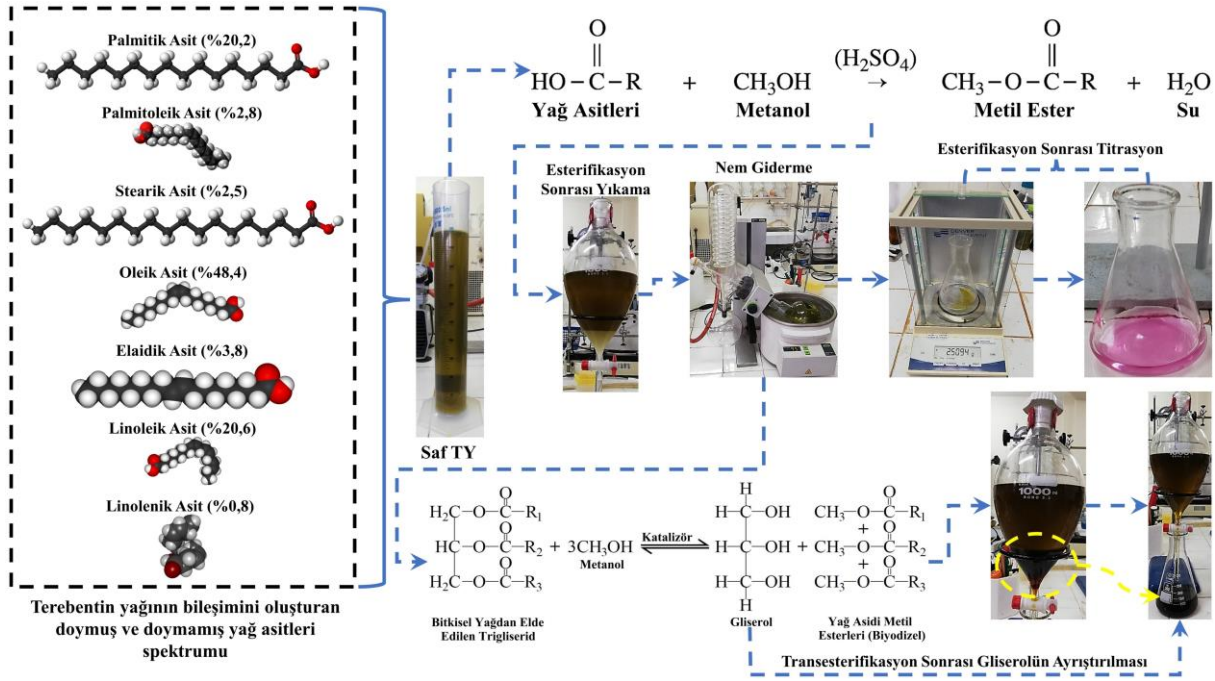
Şekil 2. TY numunesinin yağ asitleri bileşimi

2.3. Terebentin yağının biyodizel sentezlenmesi

Terebentin yağının SYA değerinin %5'in üzerinde olması, bitkisel yağın biyodizel dönüşürülmesi için iki basamaklı bir reaksiyon süreci (Esterifikasyon ve Transesterifikasyon) gerektiğini işaret etmektedir, bu durum Şekil 3'te açıkça gösterilmiştir.

Esterifikasyon aşamasında, 0,1 g H_2SO_4 ve 20 ml CH_3OH karışımıyla, toplam yağ hacminin %20'sine denk gelecek şekilde 100 ml yağ için bir çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan bu çözelti yağa eklenmiş ve karışım, 95 °C sıcaklıkta 3 saat süreyle reaksiyona tutulmuştur. Esterifikasyon süreci sonrasında gerçekleştirilen titrasyon analiziyle, SYA seviyesinin %2,24'e düşürüldüğü ve bu durumun transesterifikasyon süreci için uygun bir aralığa ulaştığı tespit edilmiştir.

Transesterifikasyon aşamasında, yağın metil esterlere dönüştürülmesi işlemi, CH_3OH ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörü kullanılarak, yağ hacmine göre 6:1 oranında gerçekleştirilmiştir. Bu işlem, literatürde önerilen koşullar ve Şekil 3'te özetlenen parametreler çerçevesinde, yağ kütlesinin %1'ine eşdeğer KOH katalizörü ve ham yağ hacminin %20'si kadar CH_3OH eklenerek 60°C'de ve 600 rpm karıştırma hızında 50-60 dakika boyunca yürütülmüştür [13,14]. Süreç sonucunda, üst katmanda biyodizel ve alt katmanda gliserol olmak üzere iki fazın oluştuğu gözlemlenmiştir. Gliserin ve biyodizelin ayrıştırılması için çeşitli ayırma ve yıkama işlemleri uygulanmıştır [15]. Biyodizel üretiminin genel prosesi Şekil 3'te şematik bir biçimde sunulmuştur.



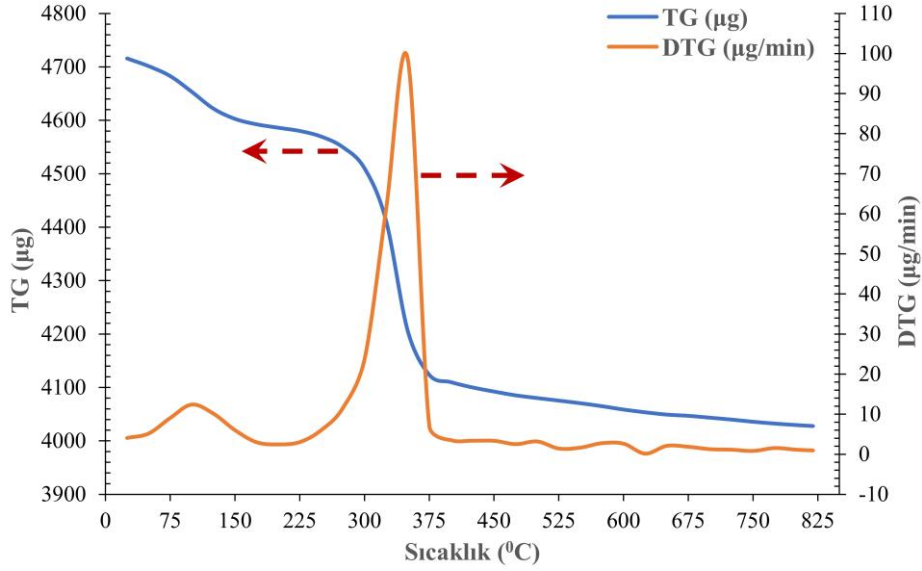
Şekil 3. Terebentin yağının biyodizele sentezlenmesi

2.4. Metal nano MgO'nun mikroskopik, elemental/spektral ve termal analizi

Metal nano MgO, geniş yüzey alanına sahip nanopartiküller ile tanımlanır ve bu özelliği, endüstriyel ve akademik uygulamalarda yüksek performansının altını çizer. Bu materyalin yüksek reaktivitesi, özellikle katalizörler ve kimyasal tepkimelerde kullanılmasını tercih edilen bir özellik haline getirir, bu da onu çeşitli disiplinlerde uygulanabilir kılar. Metal nano MgO'nun karakteristik özellikleri, Tablo 1'de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

| Tablo 1. Metal nano MgO özellikleri | |
|---------------------------------------|-----------|
| Özellikler | Değer |
| Safılık (%) | ≥99,5 |
| Renk | Beyaz |
| Ortalama parça boyutu (nm) | 20-50 |
| Özgül yüzey alanı (m ² /g) | >65 |
| Morfoloji | Çok yüzlü |
| Kütle yoğunluğu (g/cm ³) | 0,2 |
| Gerçek yoğunluk (g/cm ³) | 3,6 |

Termogravimetrik analiz (TGA), yakıt katkı maddesi olarak kullanılan metal nano MgO'nun termal kararlılığının incelenmesinde kritik bir yöntem olarak uygulanmıştır. Şekil 4, MgO'nun TGA analiz sonuçlarını içeren grafikleri detaylandırmaktadır. Bu analizde, MgO örneklerinin Termogravimetrik (TG) ve Diferansiyel Termogravimetrik (DTG) grafikleri elde edilmiş olup, söz konusu malzemelerin termal özellikleri ve bozunma paternleri hakkında derinlemesine bilgi sağlamaktadır. TG grafiği, örneğin sıcaklık arttıkça maruz kaldığı kütle kaybını ortaya koyarken, bu da MgO'nun termal bozunma sıcaklığını ve bu sıcaklıkta gerçekleşen kütle kaybının miktarını tespit etmede esas alınmaktadır. DTG grafiği ise, örneğin sıcaklık değişikliğine bağlı kütle kaybı hızını sergileyerek, MgO'nun maksimum bozunma hızına ulaştığı sıcaklığı ve bu sıcaklıkta bozunmanın potansiyel mekanizmalarını belirlemede kullanılmaktadır.

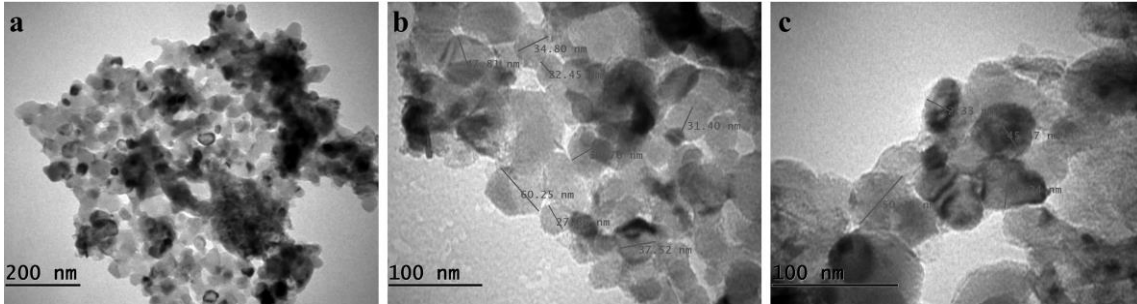


Şekil 4. Metal nano MgO'nun termogravimetrik analizi

Grafiklerde açıkça görüldüğü üzere, 25 °C'de MgO'nun oldukça stabil olduğu ve minimal düzeyde ağırlık kaybına maruz kaldığı belirlenmiştir. 100°C'de, suyun buharlaşması veya diğer volatil bileşenlerin elimine olması sonucunda hafif ağırlık kaybı müşahade edilmektedir. 300°C'de, malzemenin termal bozunmasını gösteren daha net bir ağırlık kaybı gözlenirken, 325-350 °C aralığında ağırlık kaybının miktarı ve hızı en üst düzeye ulaşmaktadır. 375 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise ağırlık kaybının miktarı ve hızı neredeyse sabit bir hal almaktadır. Bu gözlemler ışığında, malzemenin termal kararlılığının, kusur oranları ve belirli bir dereceye kadar saflık seviyeleri dikkate alındığında, 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda muhafaza edilebileceği sonucuna varılabilir.

Bu çalışmada kullanılan metal nano MgO'lerin morfolojisini karakterize etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve transmisyon elektron mikroskobu (TEM) mikrografları elde edildi. SEM ve TEM görüntülerinde gösterildiği gibi, MgO mikroküreleri, kısmi aglomerasyonla birleştirilmiş gözenekli organizasyona sahip düzensiz fakat küresel parçacık benzeri şekiller sergiledi ve metal nano MgO'lerin çapı kabaca ortalama 40 nm olarak belirlendi.

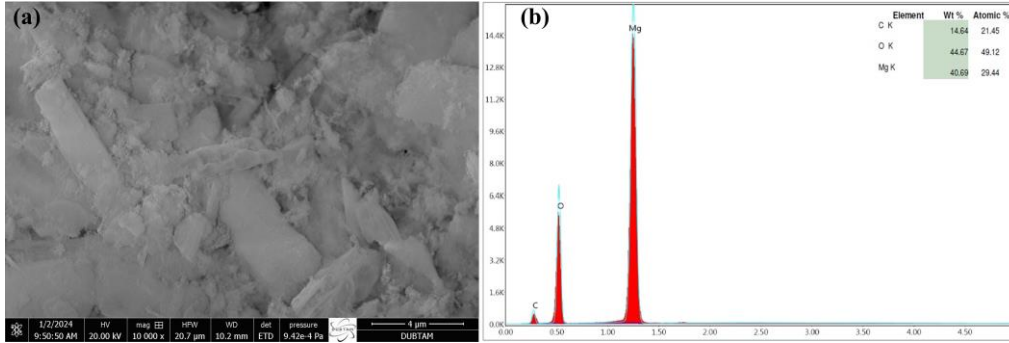
Şekil 5, MgO nanopartiküllerinin 120K, 300K ve 400K büyütme oranlarında TEM analizi sonuçlarını, 200 ve 100 nm'lik ölçek çubukları eşliğinde sunar. Bu analiz, partiküllerin boyut ve şekilleri gibi morfolojik özelliklerini ortaya koyar. Görüntüler, MgO'nun genellikle düzensiz, çokyüzlü yapıları ve yüzeylerinde dikkat çekici düzlemler ile keskin kenarlar sergilediğini belirtir, kristal yapının çeşitliliğine işaret eder. Şekil 5(a)'daki yoğun aglomerasyona karşın, Şekil 5(b) ve (c)'de daha az ve belirgin nanopartiküller, düşük aglomerasyon düzeylerini gösterir. Nanopartiküllerin ortalama boyutu yaklaşık 38 nm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5. Farklı büyütme oranları için MgO'lerin TEM görüntüsü: (a) 120 K, (b) 300 K ve (c) 400 K

Şekil 6, MgO örneğinin SEM-EDX analizini içermekte olup, Şekil 6(a) yüksek çözünürlüklü SEM ile metalik nano MgO'nun yüzey morfolojisini, Şekil 6(b) ise EDX spektroskopisi ile Mg ve O elementlerinin bulunurluğunu teyit eden profildir. SEM-EDX yöntemi, MgO'nun morfolojik ve kimyasal karakterizasyonunda etkili bir araç olarak değerlendirilir. SEM analizi, prizmatik yapıda büyük ve geniş yüzey alanına sahip MgO nanopartiküllerini detaylı bir şekilde göstermektedir. Bu yapılar, malzemenin yüzeyinde keskin kenarlar ve düzlemler oluşturarak belirgin bir kristallik yapıyı işaret etmektedir. Nanopartiküllerin boyut ve formu, özellikle katalitik uygulamalarda aktif yüzey alanını artırarak reaksiyon verimliliğini potansiyel olarak iyileştirebilir. İlave olarak, nanopartiküller arasındaki düşük aglomerasyon düzeyi, uygun dispersiyon ve yüksek reaktif yüzeylerin korunmasına katkıda

bulunur, bu da katalitik aktiviteyi ve verimliliği artırır. EDX analizi ile Mg ve O elementlerinin sırasıyla %40,69 ve %44,67 ağırlık yüzdesi, %49,12 ve %29,44 atomik yüzdesi ile varlığı doğrulanmıştır. Ayrıca, spektrumda görülen karbon, nanopartiküllerin sentez sırasında kullanılan organik moleküllerin bir izi olarak yorumlanabilir. Bu organik bileşenler, nanopartiküllerin oluşumu sırasında indirgeyici ve stabilize edici roller üstlenmiştir.

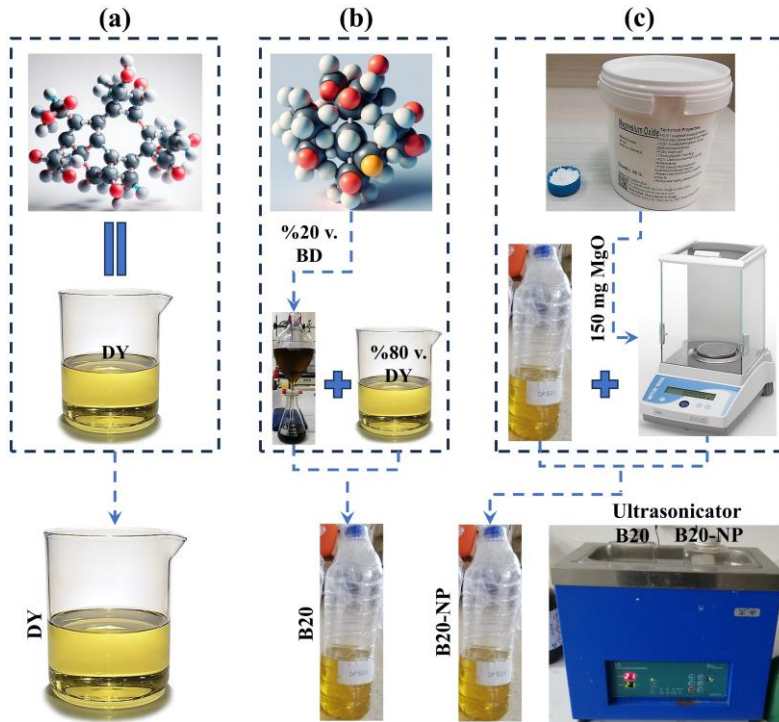


Şekil 6. (a) MgO'lerin SEM görüntüsü ve (b) MgO'lerin EDX Analizi

2.5. Test yakıtlarının hazırlanması

Bu çalışmada, DY referans yakıt olarak kullanılmış ve inorganik katkı maddesi olarak toksik olmayan ve kolaylıkla temin edilebilen MgO nanopartikülleri seçilmiştir. İlk olarak hazırlanan yakıt karışımı, %80 DY ve %20 biyodizelden oluşan B20 olarak adlandırılmıştır. İkinci karışım, B20-NP, aynı oranlarda DY ve biyodizel içermekte olup, ek olarak 150 mg/L MgO nanopartikül içerir.

Nano katkı maddelerinin biyodizel yakıtlar içerisinde etkin bir şekilde dağıtılabilmesi için ultrasonikasyon yönteminin kullanımı zorunludur. Metal nano MgO partikülleri, 150 mg/L konsantrasyonunda, dizel-biyodizel karışımına manyetik karıştırıcı yardımıyla ve ultrasonikasyon tekniği kullanılarak homojen bir şekilde entegre edilmiştir. Ultrasonikasyon prosesi, çeşitli parametreler altında gerçekleştirilmekte olup; bu parametreler arasında güç (120 W ile 220 W arasında değişmektedir), frekans (20 kHz'den 45 kHz'e kadar) ve süre (30 dakikadan 60 dakikaya kadar) bulunmaktadır [16–18]. İlgili çalışmada, nanopartiküllerin yakıt içerisinde homojen bir dağılımını sağlamak amacıyla, 160 W güç ve 40 kHz frekansta çalışan bir ultrasonik cihaz kullanılmış ve bu işlem 30 dakika süre ile uygulanmıştır. Bu prosedür, yakıt matrisi içerisinde nanopartiküllerin arzu edilen düzeyde homojen dağılımını elde etmek için gerçekleştirilmiştir. Yakıtın hazırlanma aşamaları Şekil 7'de, deney yakıtlarının özellikleri ise Tablo 2'de detaylandırılmıştır.



Şekil 7. Test yakıtlarının hazırlanması

Tablo 2. Test yakıtlarının özellikleri

| Özellikler | Birim | DF | B100 | B20 | B20-NP | ASTM/EN Standart Değeri |
|-----------------|--------------------|-------|--------|------|--------|--|
| Yoğunluk 15 °C | kg/m ³ | 836 | 870 | 841 | 831 | EN 590:820-845 / ASTM D6751: 860-900 |
| Viskozite 40 °C | mm ² /s | 3,71 | 5,72 | 3,82 | 3,19 | EN 590:2.0-4.5 / ASTM D6751: 1.9-6.0 |
| Kalorifik Değer | MJ/kg | 42,0 | 38,516 | 40,4 | 38,2 | EN 590:42.5-43.0 / ASTM D6751: Min. 37 |
| Setan Sayısı | - | 48-55 | 59,68 | - | - | EN 590: Min. 51 / ASTM D6751: Min. 47 |
| Parlama Noktası | °C | 59 | 106,5 | 83 | 74 | EN 590: Min. 55 / ASTM D6751: Min. 130 |

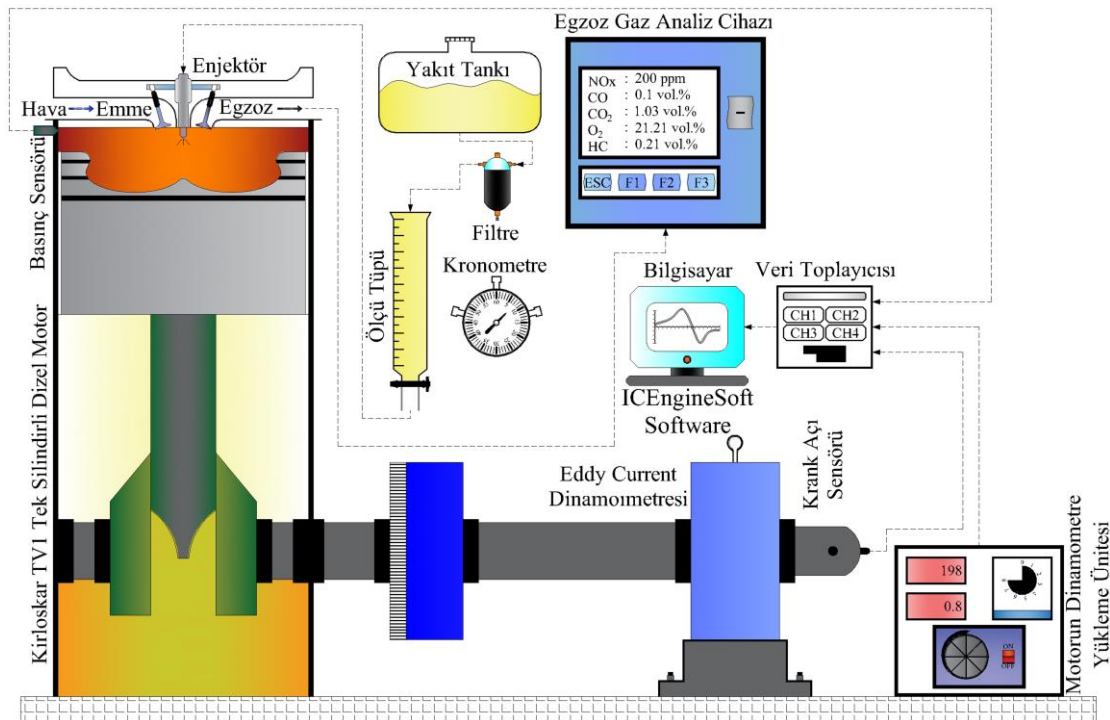
2.6. Egzoz gazı analizörü, deneysel kurulum ve hesaplanan parametreler

Deneysel çalışmada CO, HC ve NO_x gibi emisyonları, teknik özellikleri Tablo 3'te verilen Testo 350 yanma gazı analizörü kullanılarak ölçülmüştür.

Tablo 3. TESTO 350 gaz analizör cihazının teknik özellikleri

| Ölçülen parametre | Ölçüm aralığı |
|-------------------|---------------|
| CO | 0-50 %hacim |
| HC | 0-4000 ppm |
| NO _x | 0-3000 ppm |
| CO ₂ | 0-50 %hacim |
| O ₂ | 0-50 %hacim |

Bu çalışmada, 1500 rpm hızında çalışabilen ve maksimum 5.2 kW güç üretme kapasitesine sahip, 17.5 sıkıştırma oranına sahip atmosferik emişli, tek silindirli ve dört zamanlı Kirloskar TV1 dizel motoru, test yakıtlarının incelenmesi amacıyla tercih edilmiştir. Motor, sabit 1500 rpm hızında ve çeşitli yük koşulları altında değerlendirilmiştir. Yanma sürecinin analizi için piezoelektrik sensörlerden elde edilen veriler, sonrasında ICEngineSoft yazılımı ile değerlendirilmiştir. Motorun krank mili üzerindeki pistonun anlık konumu ve dönüş hızı, krank miline entegre edilmiş 360 eşit aralıklı relüktör ve bir krank açısı kodlayıcı aracılığıyla gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınmıştır. Bu relüktör, her dönüş için 360 impulsluk sinyaller üreterek döner kodlayıcıya bilgi sağlar. Silindir içi basınç verilerinin döngüsel bütünlüğünü korumak amacıyla, bu veriler 0.1 derece krank açısı (°CA) çözünürlük ile izlenmiş ve ortalama olarak 100 motor döngüsü üzerinden analiz edilmiştir. Motor testleri, farklı fren ortalama efektif basınçları (BMEP) altında - Yüksüz, 1.0 bar, 2.0 bar ve 3.0 bar - ve sabit 1500 rpm hızında yürütülmüştür. Deneyler, ilk olarak motor yüksüz iken ve standart dizel yakıtı kullanılarak başlatılmış; motor çalışma koşulları istikrara kavuştuktan sonra veri toplama işlemi gerçekleştirilmiş ve takiben test yakıtları ardışık olarak incelenmiştir. Araştırmada kullanılan test düzeneğinin detayları ise Şekil 8'de gösterilmiş olup, motorun teknik özellikleri Tablo 4'te sunulmuştur.



Şekil 8. Testlerin gerçekleştirildiği deneysel düzenek

Tablo 4. TESTO 350 gaz analizör cihazının teknik özellikleri

| Ölçülen parametre | Ölçüm aralığı |
|------------------------|--|
| Marka | Kirloskar TV1 |
| Tip | Dikey dizel motor, 4 zamanlı, su soğutmalı, tek silindir |
| Silindir hacmi | 661,45 cc |
| Çap & Strok | 87,5 mm & 110 mm |
| Sıkıştırma oranı | 17,5:1 |
| Yakıt | Dizel |
| Nominal fren gücü | 5.2 kW @ 1500 rpm |
| Ateşleme Sistemi | Sıkıştırma ile ateşleme |
| Enjeksiyon Zamanlaması | 23° bTDC (nominal) |
| Enjeksiyon Basıncı | 200 bar |
| Basınç Dönüştürücüsü | Piezoelektrik tip (Marka: KISTLER), Model-6056A31U20test plant pvt. Ltd) |
| Dinamometre | Eddy current tipi (Marka: SAJ test plant pvt. Ltd) |
| Krank Açısı Sensörü | Model 8.3700.1321.0360, Marka KUBLER |

Deneyel emisyon değerlendirmeleri, yanma dinamikleri ve türetilen motor performansı ölçütleri üzerine bir belirsizlik değerlendirilmesi yürütülmüştür. Bu değerlendirmenin temel amacı, enstrümantasyonun kalibrasyonu, gözlemlerin doğruluğu ve spesifik çevresel koşullar altında uygulanan deneysel yöntemlerden kaynaklanabilecek olası hataları tanımlamak ve bu hataların büyüklüğünü ölçmektedir [19,20]. Bu analiz, deneysel bulguların bilimsel temellere dayanarak tekrarlanabilirliğini değerlendirme amacıyla gerçekleştirilmiştir. Anderson'un önerdiği hata dağılım yöntemine dayanarak, aletlerle ilişkili belirsizlikler üzerine kapsamlı bir inceleme yapılmıştır [21]. Bu metodoloji, belirsizliklerin matematiksel olarak hesaplanmasını sağlayan Denklem (2) ile desteklenmektedir.

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial U}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (2)$$

Bu bağlamda, U, bağımsız değişkenlerle ilişkili olan bağımlı değişkeni ifade etmektedir. x_1, x_2, \dots, x_n , bağımsız değişkenler olarak kabul edilirken, $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ ise her bir bağımsız değişkenle bağlantılı belirsizlikleri temsil etmektedir. Kümülatif belirsizlik ΔU ile gösterilmektedir. Bu çalışmada belirlenen özgül belirsizlik değerleri Tablo 5'te ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Tablo 5. Kullanılan ölçüm ekipmanlarının belirsizlik yüzdesi [22] ve gaz analiz cihazı ile ölçülen parametreler

| Motor Enstrümantasyonu ve Emisyon Parametresi | Enstrümantasyon Detayları | Örneklemedeki Belirsizlik Yüzdesi |
|---|--|-----------------------------------|
| Dinamometre (dahili hız ölçümü ile) | Eddy Current Tipi, Model: AG10, Saj Test Plant Pvt. Ltd. | ±1,0 |
| Yük Sensörü | Marka: Sensotronics Sanmar Ltd., Model: 60001 | ±0,2 |
| Yük göstergesi | Marka: Selectron, Model: PIC152eB2 | ±0,1 |
| Yakıt ölçüm cihazı (FMD) | Marka: Apex, Model: FF0.012 | ±1,5 |
| Yakıt akış vericisi (FLT) | Diferansiyel Basınç Vericisi; Marka: Yokogawa, Model: EJA110-EMS-5A-92NN | ±0,065 |
| Silindir basınç sensörü | Piezo Sensör; Marka: PCB Piezotronics Inc, Model: HSM111A22 | ±0,1 |
| Yakıt enjektörü basınç sensörü | Piezo Sensör; Marka: PCB Piezotronics Inc, Model: M108A02 | ±0,15 |
| Krank açısı sensörü | Marka: Kubler-Almanya, Model: 8.3700.1321.0360 | ±0,2 |
| Sıcaklık sensörü | Marka: Radix; Tip: RTD, PT100 ve Termokupl Tip K | ±0,4 |
| Sıcaklık vericisi | Marka: Wika, Model: T19.10.3K0e4NK-Z | ±0,2 |
| Hava akışı vericisi | Marka: Wika; Model: SL1 | ±0,5 |
| CO | Emisyon Analizörü | ±0,3 |
| HC | Emisyon Analizörü | ±0,1 |
| NOx | Emisyon Analizörü | ±0,5 |
| CO ₂ | Emisyon Analizörü | ±0,3 |
| O ₂ | Emisyon Analizörü | ±0,3 |

Deneyin toplam belirsizlik düzeyi, Tablo 5'te yer alan verilere dayanarak, Denklem (3) kullanılarak elde edilmiştir.

$$\Delta U_O = \sqrt{(\Delta U_{BP})^2 + (\Delta U_{CO})^2 + (\Delta U_{NOx})^2 + (\Delta U_{HC})^2 + (\Delta U_{O_2})^2} \quad (3)$$

Tablo 6. Hesaplanan parametrelerin toplam yüzde belirsizliği

| Parametrenin hesaplanması | Ölçülen Değişkenler ve Parametreler | Ölçüm Aletlerinin % Belirsizliği | Hesaplama | Hesaplanan Parametrelerin Toplam % Belirsizliği |
|---------------------------|---|--|--|---|
| BP (fren gücü) [22] | Hız ölçüm birimi, yük sensörü ve yük göstergesi | $\pm 0,2, \pm 0,1$ ve $\pm 1,0$ | $\sqrt{(0.2)^2 + (0.1)^2 + (1)^2}$ | 1,025 |
| Emisyonlar | CO, HC, NOx ve O ₂ | $\pm 0,3, \pm 0,1, \pm 0,5$ ve $\pm 0,3$ | $\sqrt{(0.3)^2 + (0.1)^2 + (0.5)^2 + (0.3)^2}$ | 0,663 |

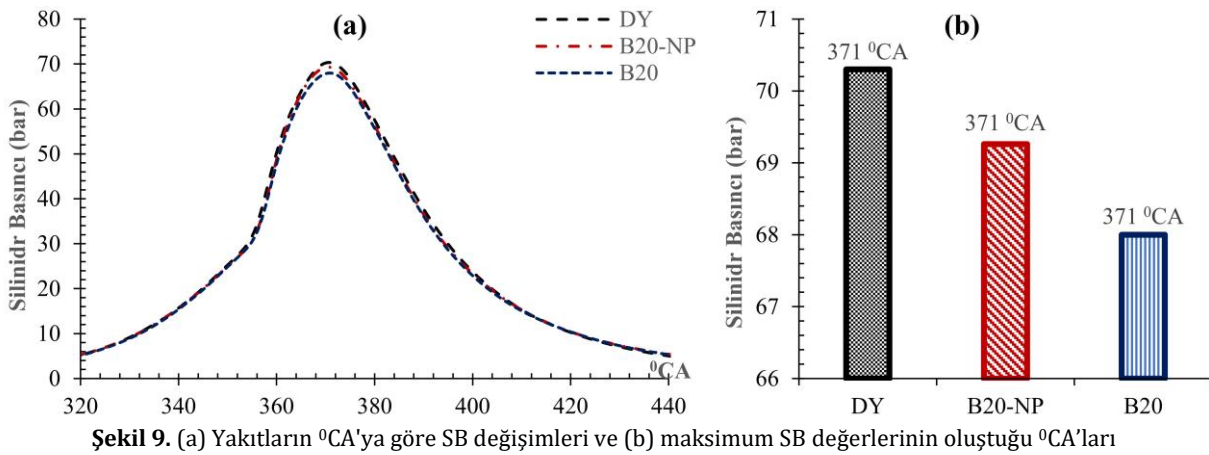
Tablo 6’da ifade edildiği üzere, hesaplanan toplam belirsizlik oranı %1,688 olarak tespit edilmiştir. Bu oran, mühendislik disiplinlerinde genel olarak kabul gören maksimum %5’lik belirsizlik sınırının altında yer almaktadır [23,24].

3. Bulgular

3.1. Yanma parametreleri

3.1.1. Silindir basıncı (SB) değişimleri

Deney yakıtlarının krank açısına (^oCA) bağlı SB değişimleri Şekil 9(a)’da, maksimum SB değerleri ve bu değerlerin elde edildiği ^oCA noktaları ise Şekil 9(b)’de sergilenmiştir. Şekil 9(a) ve Şekil 9(b)’nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum SB değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumun, biyodizel karışımının düşük enerji içeriği ve yüksek viskozitesi ile ilişkili olduğu anlaşılmaktadır [25]. Enerji içeriğinin düşük olması ve viskozitenin yüksek olması, atomizasyonun zayıflamasına ve yakıtın yanışının optimal olmamasına yol açmaktadır. Gad ve Jayaraj [26] tarafından yapılan çalışmada, saf dizel yakıtına eklenen biyodizel oranının artışıyla benzer bir eğilim gözlemlenmiştir. B20-NP yakıtının SB profilleri ve değerleri, B20’ye kıyasla daha yüksek bulunmuştur. B20-NP ile elde edilen artış, yanmayı kolaylaştıran ve yüksek yüzey alanına/hacim oranına sahip metal nanopartiküllerin eklenmesi sonucudur. Nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı [27], yanma sırasında oksijen ile daha yoğun etkileşime girerek atomizasyon ve buharlaşmayı hızlandırır, böylece yanma sürecini iyileştirir ve SB’yi artırır. Khan ve arkadaşları [28], nanopartikül ilavesinin katalitik etkisinin yanmanın erken başlamasını ve hızlı genişlemesini tetikleyerek SB’nin artmasına olanak tanıdığını bildirmiştir. Öte yandan, Khatri ve Goyal [29], silisyum dioksit (SiO₂) nanomalzemelerin yakıtı ilavesiyle yanma ve ateşleme performansında gözle görülür iyileşmeler kaydedildiğini, SiO₂ nanomalzemelerinin önceden karıştırılmış yanma hızını artırarak SB’yi yükselttiğini rapor etmişlerdir.

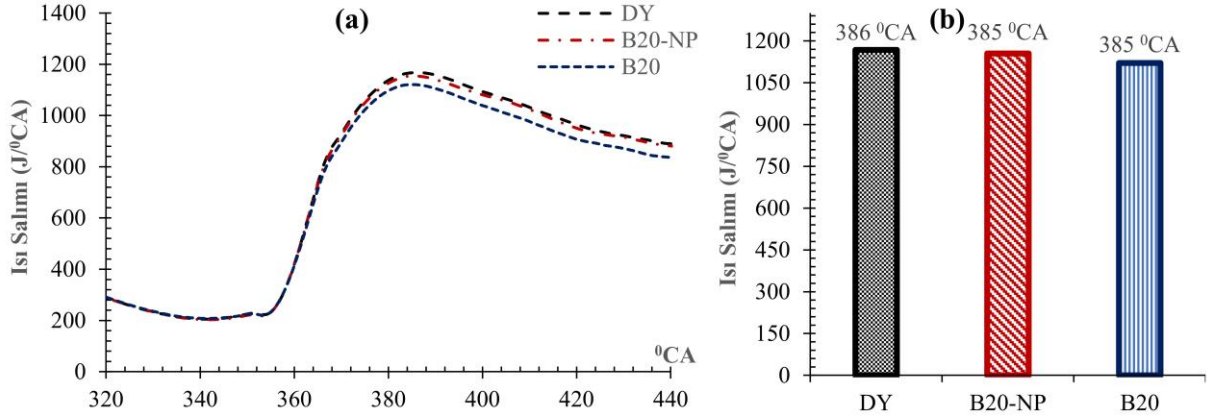


Şekil 9. (a) Yakıtların ^oCA’ya göre SB değişimleri ve (b) maksimum SB değerlerinin oluştuğu ^oCA’ları

3.1.2. Isı salımı oranı (ISO) eğrileri

Deney yakıtlarının ^oCA’ya bağlı ISO değişimleri Şekil 10(a)’da, maksimum ISO değerleri ve bu değerlerin elde edildiği ^oCA noktaları ise Şekil 10(b)’de sergilenmiştir. Şekil 10(a) ve Şekil 10(b)’nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum ISO değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Biyodizelin fizikokimyasal özellikleri, atomizasyon ve buharlaşma süreçlerinde zorluklar meydana getirir ve bu durum yanma reaksiyonlarında ısı salımını negatif yönde etkiler. B20-NP yakıtına nanopartikül ilavesinin, standart B20 yakıtına

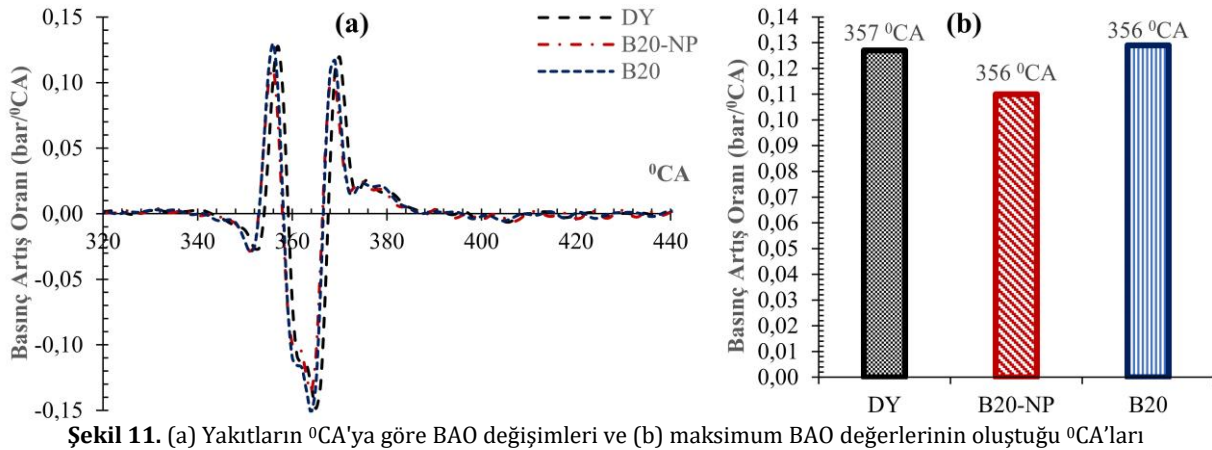
kıyasla ISO artırdığı gözlemlenmiştir. Mevcut literatür, nanopartikül eklemenin ISO üzerindeki pozitif etkisini belgeleyen çok sayıda çalışmayı içermektedir [30,31]. Nanopartiküllerin katkısıyla elde edilen yüksek ISO, geliştirilmiş termal özellikler, artırılmış yüzey alanı/hacim oranı ve ısı transferi sayesinde gerçekleşmektedir. Nanopartiküllerin sağladığı avantajlar, kısa ateşleme gecikmesi, iyileştirilmiş atomizasyon ve artırılmış buharlaşma hızı gibi, ısı salınımindaki artışa katkıda bulunur. Nanopartiküllerin kullanımının atomizasyon ve oksidasyon sürecini iyileştirdiğini ve bu yolla yanma sürecinde ISO'da artışa neden olduğu düşünülmektedir. Ek olarak, Kumar ve arkadaşları [32], nanomalzemelerin dizel motorlarındaki termodinamik özellikleri, ısı transfer hızını, katalitik reaktiviteyi ve yakıt karışımı stabilitesini iyileştirerek yanma parametrelerinde önemli gelişmeler sağladığını rapor etmiştir.



Şekil 10. (a) Yakıtların °CA'ya göre ISO değişimleri ve (b) maksimum ISO değerlerinin oluştuğu °CA'ları

3.1.3. Basınç artış oranı (BAO) eğrileri

Deney yakıtlarının °CA'ya bağlı BAO değişimleri Şekil 11(a)'da, maksimum BAO değerleri ve bu değerlerin elde edildiği °CA noktaları ise Şekil 11(b)'de sergilenmiştir. Şekil 11(a) ve Şekil 11(b)'nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum BAO değerinin diğer yakıtlara kıyasla en yüksek olduğunu ortaya koymaktadır. B20 yakıtının kullanımıyla sağlanan bu artış, yakıtın viskozitesi ve atomizasyonun zayıf olması nedeniyle ön yanma sürecinin uzaması ve buna bağlı olarak dolgu hacminin artışına dayanabilir [33]. Nanopartiküller katalitik etkileri sayesinde yakıtın daha etkin yanmasını sağlamaktadırlar. Deney yakıtları arasında, partikül katkısı içeren B20NP yakıtının, B20 yakıtına göre daha az basınç artışı sunduğu gözlemlenmektedir. Nanopartiküllerin kullanımı, tutuşma gecikme süresini kısaltmaktadır. Bu kısa tutuşma gecikme süreci, premiks yanmada daha az dolgu yanması sağlayarak basınç artış hızını azaltmıştır. Bu avantajlar özellikle, yakıtın hızlandırılmış yanmasını destekleyen nanopartiküllerin katalitik etkilerine atfedilmektedir [32].

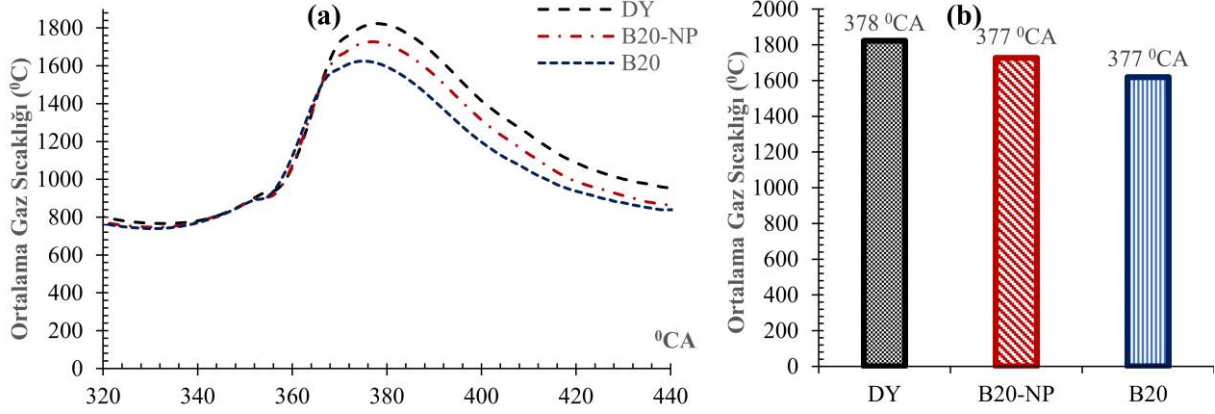


Şekil 11. (a) Yakıtların °CA'ya göre BAO değişimleri ve (b) maksimum BAO değerlerinin oluştuğu °CA'ları

3.1.4. Ortalama gaz sıcaklık (OGS) eğrileri

Deney yakıtlarının °CA'ya bağlı OGS değişimleri Şekil 12(a)'da, maksimum OGS değerleri ve bu değerlerin elde edildiği °CA noktaları ise Şekil 12(b)'de sergilenmiştir. Şekil 12(a) ve Şekil 12(b)'nin analizi, B20 biyoyakıt karışımının maksimum OGS değerinin diğer yakıtlara kıyasla en düşük olduğunu ortaya koymaktadır. Motorlardaki OGS, motorun işletim koşulları, yük durumu, yanma verimliliği ve tercih edilen yakıt türü gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak farklılık gösterir. OGS, motorun yanma odasındaki yanma işlemleri sonucu meydana gelen sıcaklık değişikliklerini yansıtır ve böylece motorun performansına etki eder. Nanopartikül ilaveli B20-NP yakıtı,

B20 yakıtına göre %3,12 daha yüksek bir OGS sağlamıştır. Nanopartiküllerin yakıt içerisindeki homojen dağılımı, ateşleme kalitesini ve yanma hızını iyileştirir, bu da OGS'nin artmasına neden olur. Bunun yanı sıra, nanopartiküllerin kullanılması, yanma sürecindeki ısı salım hızını da etkileyebilir. Daha hızlı yanma işlemi, genellikle daha yüksek sıcaklıklara sebep olur ve bu da motorun OGS'sini doğrudan etkiler.

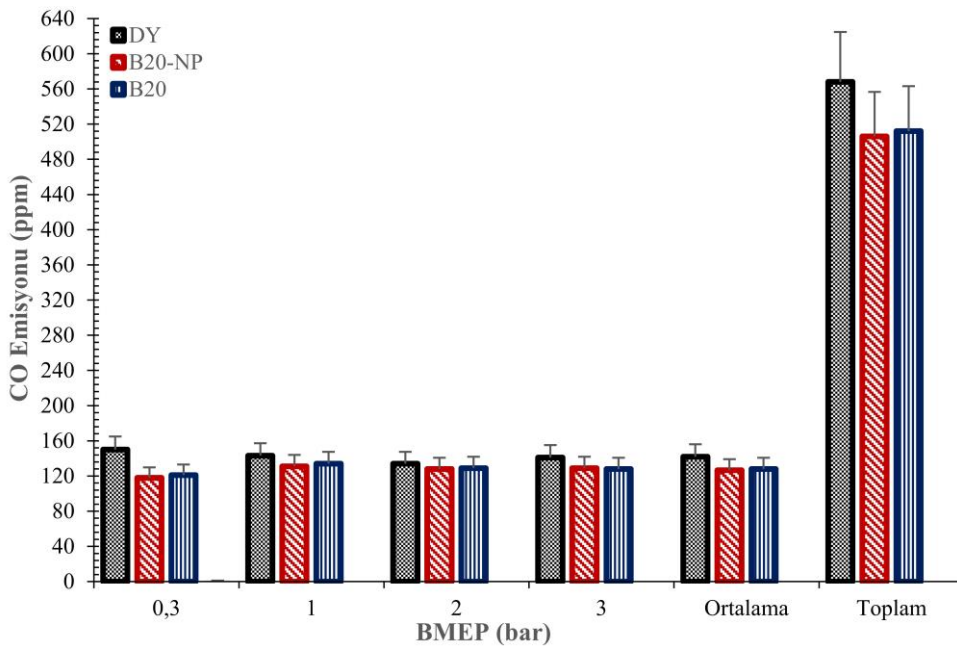


Şekil 12. (a) Yakıtların °CA'ya göre OGS değişimleri ve (b) maksimum OGS değerlerinin olduğu °CA'ları

3.2. Emisyon parametreleri

3.2.1. CO emisyon değişimleri

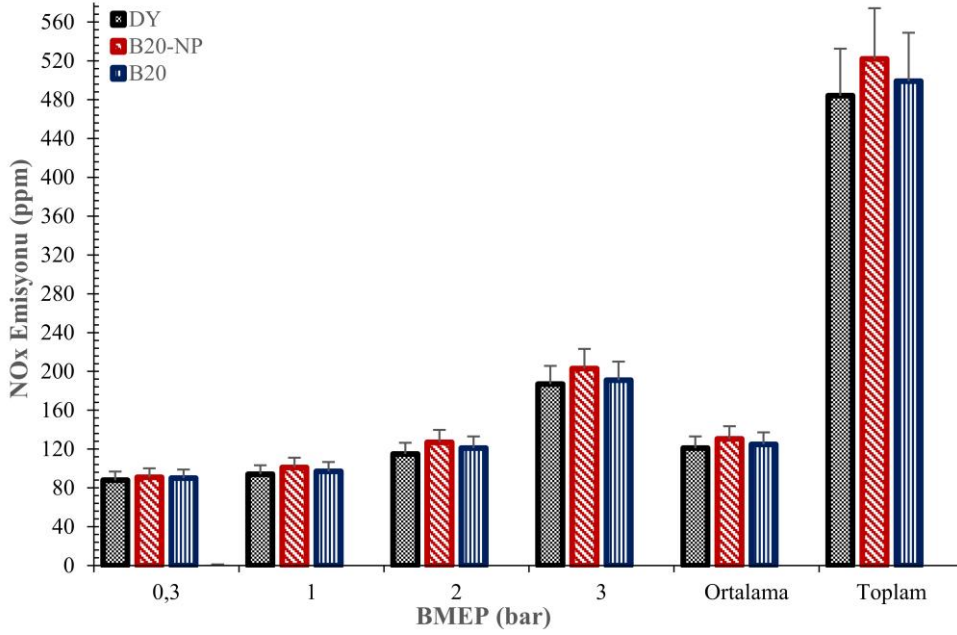
Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili CO emisyon seviyeleri Şekil 13'te gösterilmiştir. CO, yanma sürecinde karbon atomlarının tam yanmaması ve kısmen oksitlenmesi sonucu oluşan bir ara üründür [33]. Dizel motorlar yüksek hava fazlalığı katsayısı ile çalıştıkları için genellikle düşük CO emisyon değerlerine sahiptir [34]. Bununla birlikte, dizel motorlarda yük miktarı, egzoz gazlarının bileşimi ve sıcaklığı üzerinde önemli etkilere sahiptir [35]. Motor yükü arttıkça, CO miktarında bir artış görülmektedir [36]. Bu, yük artışıyla karışımın zenginleşmesi ve bu zengin karışımın oksidasyonu için gerekli zamanın yetersiz kalmasından kaynaklanmaktadır [37]. Oksijen konsantrasyonu ve oksidasyon hızı, CO salınımının ana belirleyicileridir [38], zira CO, eksik yanmanın bir sonucudur. Test edilen yakıtlar arasında, B20 yakıtının CO emisyon seviyesinin, dizel yakıtı kıyasla %10,93 daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu, biyodizelin yüksek oksijen içeriği sayesinde hava-yakıt karışımını ve yanma verimliliğini iyileştirmesinden ötürüdür. Nanopartikül katkılı B20-NP yakıtının CO emisyon değeri, dizel yakıtı göre %12,25, B20 yakıtına göre ise %1,18 ppm daha düşük bulunmuştur. Nanopartikül ilavesi, geniş yüzey alanı, artırılmış kimyasal reaktivite ve iyileştirilmiş ateşleme özellikleri ile CO azalmasına katkı sağlar. Deviren ve Çılğın [39], nanopartikül katkısının yanma sürecinde oksidasyonu destekleyerek CO emisyonlarını azalttığını bildirmişlerdir.



Şekil 13. Test yakıtlarının BMEP'e göre CO emisyon değişimleri

3.2.2. NO_x emisyon değişimleri

NO_x terimi, nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) moleküllerinin toplam yoğunluğunu temsil etmektedir. Yanma süreçlerinden kaynaklanan NO_x emisyonlarının çoğunluğu, NO şeklindedir. Zeldovich reaksiyon mekanizmalarına göre, 1300 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, hava içindeki mevcut oksijenin maksimum limitine kadar ulaşana kadar yaklaşık 200.000 ppm (parça başına milyon) düzeyinde NO üretimi meydana gelir [40,41]. Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili NO_x emisyon seviyeleri Şekil 14'te gösterilmiştir. Dizel motorlarında NO_x emisyonlarının oluşumu, oksijen konsantrasyonu, yanma sıcaklığı ve bu sıcaklıkta kalınan süre gibi çeşitli faktörlere dayanmaktadır [42]. NO_x emisyonlarındaki varyasyonlar incelendiğinde, motor yükü ile orantılı bir şekilde artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artışlar, yük altındaki artan yakıt tüketimi sonucu meydana gelen yüksek sıcaklıklarla ilişkilendirilebilir [43].

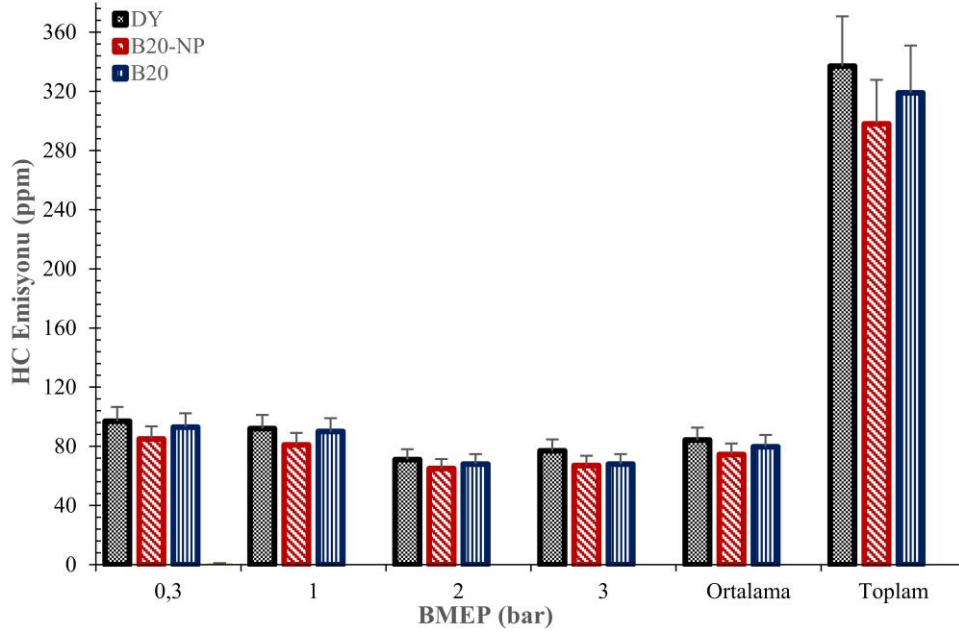


Şekil 14. Test yakıtlarının BMEP'e göre NO_x emisyon değişimleri

Şekil 14'te belirtildiği üzere, B20 yakıtının NO_x emisyon seviyesi, dizel yakıtına kıyasla %3,09 oranında daha yüksektir. Bu artışın ana sebebi, biyodizelin dizel yakıtından daha fazla oksijen içermesidir. Biyodizel içerisindeki fazladan oksijen, yanma esnasında yerel sıcaklıkların yükselmesine ve dolayısıyla NO_x oluşumuna katkı sağlamaktadır [43]. Tschakert ve ark. [44], biyodizel yakıtlarında gözlemlenen NO_x artışının temel nedeninin yüksek doymamış molekül içeriği olduğunu ifade etmiştir. NP ilaveli B20-NP yakıtının, standart dizel yakıtına göre %7,85 ppm, B20 yakıtına kıyasla ise %4,60 ppm daha fazla NO_x emisyonu ürettiği ve denenen yakıtlar arasında en yüksek NO_x değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. B20-NP yakıtındaki nanoparçacıkların, yanma sürecini iyileştirerek sıcaklık değerlerinde önemli bir artışa sebep olduğu bilinmektedir [45]. Bu durum, metal nanoparçacıkların yanma sürecindeki etkili rolüne dikkat çekmektedir.

3.2.3. HC emisyon değişimleri

Test yakıtlarının BMEP ile ilişkili HC emisyon seviyeleri Şekil 15'te gösterilmiştir. Literatür taraması sonuçlarına göre, HC emisyonlarının ana kaynağı tamamlanmamış yanma süreçleridir. Şekil 15'te sunulan veriler ışığında, B20 yakıtının, dizel yakıtına kıyasla HC emisyonlarını %5,64 ppm oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bu düşüş, biyodizelin sahip olduğu yüksek oksijen içeriği ve artırılmış setan sayısı sayesinde gerçekleşmektedir. Yüksek oksijen içeriği ve setan sayısı, tutuşma gecikmesini azaltarak yanmanın daha verimli gerçekleşmesini sağlar [28]. Ayrıca, Şekil 5'te belirtilen başka bir önemli bulgu, NP eklenmiş B20-NP yakıtının, dizel yakıtına göre %13,08 ve B20 yakıtına göre %7,04 ppm daha düşük HC emisyon değerleri elde etmesidir. Bu azalma eğilimi, biyodizel ve NP katkısının sağladığı ekstra oksijen içeriği ile NP'lerin yüksek yüzey alanı/hacim oranına bağlıdır. NP katkısı, yanma sürecini katalitik olarak geliştirerek HC emisyonlarında azalmaya yol açar. Bu etkileşim, nanoparçacık katkısının yanma mekanizmalarını optimize ederek ve yanma sırasında reaktanların daha etkin bir şekilde etkileşimini sağlayarak HC emisyonları üzerinde pozitif bir etki oluşturduğunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 15. Test yakıtlarının BMEP'e göre HC emisyon değişimleri

4. Tartışma ve Sonuç

Bu araştırmada, TY'nin biyodizelle dönüştürülmesi ve metal nano MgO eklenmesinin yanmaya ve emisyonlara etkileri ele alınmıştır. Analitik metodlar ve deney düzenekleri kullanılarak elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Trebentin meyvelerinden yağ elde etmek amacıyla, belirlenen sıcaklık koşulları altında işlemler uygulanmış ve yağ soğuk pres yöntemi ile çıkarılmıştır. Esterifikasyon süreci sonucunda, yağın %SYA değeri %3'ün altına indirilerek biyodizel üretimi için uygun bir düzeye getirilmiştir. Yağ asidi profili, GC-MS analizi ile incelenmiş ve oleik asidin dominant komponent olduğu tespit edilmiştir, ki bu durum biyodizelin kalitesi açısından avantaj sağlamaktadır.

Transmisyon elektron mikroskobu (TEM) ve taramalı elektron mikroskobu-enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (SEM-EDX) analizleri, metal nano magnezyum oksit (MgO) partiküllerinin morfolojik ve kimyasal özelliklerini detaylı bir şekilde incelenmiştir. TEM analizi, bu nano partiküllerin düzensiz polihedral yapılar sergilediğini ve geniş yüzey alanlarına sahip olduklarını belirgin bir şekilde göstermiştir. Bu yapısal özellikler, partiküllerin yüksek reaktif yüzey alanına işaret eder, bu da onların katalitik ve reaksiyon özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Ek olarak, SEM-EDX analizi, MgO nano partiküllerinin yüzey kompozisyonu ve elementel dağılımını aydınlatmıştır. EDX spektrumları, magnezyum ve oksijen elementlerinin varlığını doğrulayarak, nano partiküllerin kimyasal bileşimini ve saflığını ortaya koymuştur. Bu iki analiz yöntemi kombinasyonu, nano MgO partiküllerinin detaylı bir karakterizasyonunu sağlayarak, ileriki uygulamalar ve araştırmalar için temel bir referans oluşturmuştur.

Deney yakıtlarının CO emisyonları üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde, B20-NP formülasyonunun CO emisyonlarını belirgin şekilde azalttığı gözlemlenmiştir, bu durum nanopartiküllerin katalitik özelliklerine atfedilmektedir.

NOx emisyonları açısından, B20-NP formülasyonunun diğer deney yakıtlarına göre daha yüksek NOx değerleri ürettiği belirlenmiştir. Bu, nanopartiküllerin yanma sürecini hızlandırıcı etkisinin bir sonucu olarak NOx emisyonlarını artırabileceğini göstermektedir.

HC emisyonlarında ise, B20-NP formülasyonunun diğer yakıtlara kıyasla daha düşük HC emisyonları sağladığı tespit edilmiştir. Bu, biyodizel ve nanopartikül eklenmesinin yanma sürecini optimize ederek HC emisyonlarını azalttığına işaret etmektedir.

Ortalama gaz sıcaklığına ilişkin veriler, B20-NP formülasyonunun diğer yakıtlara göre daha yüksek ortalama gaz sıcaklığına ulaştığını göstermiştir, bu da nanopartiküllerin yanma sürecine olan iyileştirici etkisini yansıtmaktadır.

Silindir içi basınç değerleri, B20-NP formülasyonunun, B-20 standart yakıtına göre daha yüksek basınç değerleri sağladığını ortaya koymuştur. Bu, nanopartiküllerin yanma sürecine katalitik bir etki yaparak basınç artışına katkıda bulunduğunu göstermektedir. Diğer yanma parametreleri olan basınç artış hızı ve ısı salınım oranları

üzerinde yapılan değerlendirmeler, B20-NP formülasyonunun B-20 yakıtına kıyasla daha iyi performans sergilediğini belgelemiştir.

Araştırma sonuçlarımız, nanopartikül katkısının motor performansı ve emisyon karakteristikleri üzerinde birden fazla yönde etkiler sağladığını açıkça göstermektedir. Bu katkının, CO ve HC emisyonlarını belirgin şekilde azaltırken, aynı zamanda silindir içi basıncı ve ortalama gaz sıcaklığını artırdığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, nanopartikül katkısının yanma verimliliğini iyileştirebileceğine ve motor performansını olumlu yönde etkileyebileceğine işaret etmektedir. Bununla birlikte, NO_x emisyonlarında gözlenen artış, nanopartikül katkısının yanma sürecine etkilerinin daha geniş ve karmaşık bir spektruma sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, nanopartikül katkısının yanma dinamikleri üzerinde olumlu etkilerin yanı sıra, dikkatli bir şekilde yönetilmesi gereken zorlukları da beraberinde getirebileceğini gösterir.

İleriki çalışmalarda, farklı nanopartikül konsantrasyonlarının, çeşitli yağ türleri ve işleme koşulları ile birlikte etkilerinin incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca, motor performansı ve emisyon etkilerinin yanı sıra, nanopartiküllerin ekonomik ve çevresel yönleri de ele alınmalıdır.

Kaynakça

- [1] Ulukardeşler A. 3. Nesil Biyoyakıt Teknolojisi Olan Alglerin Türkiye’de Üretilebilirlik Potansiyeli. Onuncu Ulus Kim Mühendisliği Kongresi, Koç Üniversitesi, İstanbul 2012:3-6.
- [2] Çılğın E. 3. Nesil Biyoyakıt Teknolojisi Alglerin bir Dizel Motorunda Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin Araştırılması. Iğdır Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg 2015;5:33-41.
- [3] Gülüm M, Bilgin A, Çakmak A. Sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) kullanılarak üretilen misir yağı biyodizellerinin optimum reaksiyon parametrelerinin karşılaştırılması. J Fac Eng Archit Gazi Univ 2015;30:503-11.
- [4] Imdadul HK, Masjuki HH, Kalam MA, Zulkifli NWM, Alabdulkarem A, Rashed MM, et al. Influences of ignition improver additive on ternary (diesel-biodiesel-higher alcohol) blends thermal stability and diesel engine performance. Energy Convers Manag 2016;123:252-64. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.040>.
- [5] ÇILGIN E, İLKILIÇ C. Mikroalg metil esterinin bir dizel motorunda, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması. Erciyes Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Fen Bilim Derg 2015;31:68-72.
- [6] Ozsezen AN, Canakci M, Turkcan A, Sayin C. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. Fuel 2009;88:629-36. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.09.023>.
- [7] Mohd Noor CW, Noor MM, Mamat R. Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. Renew Sustain Energy Rev 2018;94:127-42. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>.
- [8] Luo Y, Xu X, Zou JJ, Zhang X. Combustion of JP-10-based slurry with Nanosized aluminum additives. J Propuls Power 2016;32:1167-77. <https://doi.org/10.2514/1.B35969>.
- [9] Norhafana M, Noor MM, Hairuddin AA, Harikrishnan S, Kadirgama K, Ramasamy D. The effects of nano-additives on exhaust emissions and toxicity on mankind. Mater Today Proc 2020;22:1181-5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.110>.
- [10] Gercheva P, Zhivondov A, Nacheva L, Avanzato D. Transsexual forms of pistachio (*pistacia terebinthus* l.) from bulgaria - Biotechnological approaches for preservation, multiplication and inclusion in selection programs. Bulg J Agric Sci 2008;14:449-53.
- [11] Townsend CC, Davis PH. Flora of Turkey and the East Aegean Islands. vol. 28. Edinburgh University Press; 1973. <https://doi.org/10.2307/4119794>.
- [12] Van Gerpen J. Biodiesel processing and production. Fuel Process Technol 2005;86:1097-107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>.
- [13] Deviren H, Çılğın E, Aydın S. Study on using nano magnesium oxide (MNMgO) nanoparticles as fuel additives in terebinth oil biodiesel blends in a research diesel engine. Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff 2023;45:12181-200. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2270559>.
- [14] Deviren H, Aydın H. Production and physicochemical properties of safflower seed oil extracted using different methods and its conversion to biodiesel. Fuel 2023;343:128001. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128001>.
- [15] Maheshwari P, Haider MB, Yusuf M, Klemeš JJ, Bokhari A, Beg M, et al. A review on latest trends in cleaner biodiesel production: Role of feedstock, production methods, and catalysts. J Clean Prod 2022;355:131588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131588>.
- [16] Devarajan Y, Munuswamy DB, Mahalingam A. Influence of nano-additive on performance and emission characteristics of a diesel engine running on neat neem oil biodiesel. Environ Sci Pollut Res 2018;25:26167-72. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2618-6>.

- [17] Karthikeyan S, Prathima A. Environmental effect of CI engine using microalgae methyl ester with doped nano additives. *Transp Res Part D Transp Environ* 2017;50:385–96. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.028>.
- [18] Singh Rajpoot A, Choudhary T, Chelladurai H, Kumar Patel N. Effect of graphene nanoparticles on the behavior of a CI engine fueled with *Jatropha* biodiesel. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.785>.
- [19] Mani M, Nagarajan G. Influence of injection timing on performance, emission and combustion characteristics of a DI diesel engine running on waste plastic oil. *Energy* 2009;34:1617–23. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.010>.
- [20] Devan PK, Mahalakshmi N V. Performance, emission and combustion characteristics of poon oil and its diesel blends in a DI diesel engine. *Fuel* 2009;88:861–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.005>.
- [21] Daş M, Aliç E, Kavak Akpınar E. Numerical and experimental analysis of heat and mass transfer in the drying process of the solar drying system. *Eng Sci Technol an Int J* 2021;24:236–46. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.10.003>.
- [22] Deb M, Paul A, Debroy D, Sastry GRK, Panua RS, Bose PK. An experimental investigation of performance-emission trade off characteristics of a CI engine using hydrogen as dual fuel. *Energy* 2015;85:569–85. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.108>.
- [23] Khan H, Soudagar MEM, Kumar RH, Safaei MR, Farooq M, Khidmatgar A, et al. Effect of nano-graphene oxide and n-butanol fuel additives blended with diesel-Nigella sativa biodiesel fuel emulsion on diesel engine characteristics. *Symmetry (Basel)* 2020;12. <https://doi.org/10.3390/SYM12060961>.
- [24] Duan X, Li Y, Liu J, Guo G, Fu J, Zhang Q, et al. Experimental study the effects of various compression ratios and spark timing on performance and emission of a lean-burn heavy-duty spark ignition engine fueled with methane gas and hydrogen blends. *Energy* 2019;169:558–71. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.029>.
- [25] İlkiliç C, Çilgin E, Aydın H. Terebinth oil for biodiesel production and its diesel engine application. *J Energy Inst* 2015;88:292–303. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2014.09.001>.
- [26] Gad MS, Jayaraj S. A comparative study on the effect of nano-additives on the performance and emissions of a diesel engine run on *Jatropha* biodiesel. *Fuel* 2020;267:117168. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117168>.
- [27] Haiter Lenin A, Azhagesan N, Berlin Selva Rex CR, Thyagarajan K. Performance of diesel engine operating with pongamia methyl esters as biodiesel. *Asian J Sci Res* 2012;5:153–61. <https://doi.org/10.3923/ajsr.2012.153.161>.
- [28] Khan TMY. Direct transesterification for biodiesel production and testing the engine for performance and emissions run on biodiesel-diesel-nano blends. *Nanomaterials* 2021;11:1–20. <https://doi.org/10.3390/nano11020417>.
- [29] Khatri D, Goyal R. Effects of silicon dioxide nanoparticles on the performance and emission features at different injection timings using water diesel emulsified fuel. *Energy Convers Manag* 2020;205:112379. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112379>.
- [30] Attai YA, Abu-Elyazeed OS, ElBeshbeshy MR, Ramadan MA, Gad MS. Diesel engine performance, emissions and combustion characteristics of castor oil blends using pyrolysis. *Adv Mech Eng* 2020;12:1687814020975527. <https://doi.org/10.1177/1687814020975527>.
- [31] Hojati A, Shirneshan A. Effect of compression ratio variation and waste cooking oil methyl ester on the combustion and emission characteristics of an engine. *Energy Environ* 2020;31:1257–80. <https://doi.org/10.1177/0958305X19893045>.
- [32] Kumar S, Dinesha P, Rosen MA. Effect of injection pressure on the combustion, performance and emission characteristics of a biodiesel engine with cerium oxide nanoparticle additive. *Energy* 2019;185:1163–73. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.124>.
- [33] İLKİLİÇ C, ÇILGIN E. The Effect of Terebinth oil Methyl Ester on Engine Performance and Exhaust Emissions in a Diesel Engine. *İğdir Üniversitesi Fen Bilim Enstitüsü Derg* 2014;4:75–85.
- [34] Prabhu A, Venkata Ramanan M, Jayaprabakar J, Harish V. Experimental investigation of emission characteristics on ricebran biodiesel-alcohol blends in a diesel engine. *Int J Ambient Energy* 2021;42:1123–8. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1586768>.
- [35] Çilgin E. Analysis of the plant's biofuel ability obtained by natural hybridization. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2021;43:1486–99. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1854392>.
- [36] HAZAR H, Uyar M, Aydın H, Şap E. The effects of apricots seed oil biodiesel with some additives on performance and emissions of a diesel engine. *Int J Automot Eng Technol* 2016;5:102–14. <https://doi.org/10.18245/ijaet.287176>.
- [37] Rakopoulos CD, Hountalas DT, Zannis TC, Leventis YA. Operational and environmental evaluation of diesel engines burning oxygen-enriched intake air or oxygen-enriched fuels: A review. *SAE Tech Pap* 2004;113:1723–43. <https://doi.org/10.4271/2004-01-2924>.
- [38] Yoon SH, Suh HK, Lee CS. Effect of spray and EGR rate on the combustion and emission characteristics of

- biodiesel fuel in a compression ignition engine. *Energy and Fuels* 2009;23:1486–93. <https://doi.org/10.1021/ef800949a>.
- [39] Deviren H, Çilgin E. Spectroscopic verification of biodiesel synthesis from turpentine tree oil through two-step chemical reactions: investigation of the use of synthesized biodiesel and acetone as fuel additives in diesel engines. *Energy Sources, Part A Recover Util Environ Eff* 2024;46:35–53. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2277363>.
- [40] Canakci M. Combustion characteristics of a turbocharged DI compression ignition engine fueled with petroleum diesel fuels and biodiesel. *Bioresour Technol* 2007;98:1167–75. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.024>.
- [41] Uyar M, Aydın H. Production of low sulfur diesel-like fuel from crude oil wastes by pyrolytic distillation and its usage in a diesel engine. *Energy* 2022;244:122683. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122683>.
- [42] Vijayakumar S, Mahadevan S, Arulmozhi P, Sriram S, Praseetha PK. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using *Atalantia monophylla* leaf extracts: Characterization and antimicrobial analysis. *Mater Sci Semicond Process* 2018;82:39–45. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.03.017>.
- [43] ÇILGIN E. Investigation of the pure use of microalg oil in diesel engines. *Int J Automot Eng Technol* 2022;11:1–8. <https://doi.org/10.18245/ijaet.874696>.
- [44] Tschakert P, Huber-Sannwald E, Ojima DS, Raupach MR, Schienke E. Holistic, adaptive management of the terrestrial carbon cycle at local and regional scales. *Glob Environ Chang* 2008;18:128–41. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2007.07.001>.
- [45] Arul Mozhi Selvan V, Anand RB, 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* 2014;130:160–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.034>.