



Nano yakıtlı CRDI bir motorda püskürtme avansının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi

The effect of injection advance on engine performance and exhaust emissions in a nano fuel CRDI engine

Güven Demirtaş¹, 

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Akdağmadeni Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri, 66300, Yozgat, Türkiye

Öz

Dizel motorlar, dayanıklı olması ve termik verimliliğinin yüksek olması sayesinde farklı sektörde hala kullanılmaya devam etmektedir. Petrol türevli yakıtların sınırlı rezervleri, yakıt fiyatlarındaki istikrarsızlıklar ve çevreye saldıkları kirletici gazların olumsuz etkileri nedeniyle çevreye daha az zararlı olan alternatif yakıtlara ilgi artmaya devam etmektedir. Biyodizel karışım halinde dizel motorlarda kullanılabilen alternatif ve sürdürülebilir bir dizel yakıttır. Bu çalışmada, hacimsel olarak %95 biyodizel, %5 n-oktanol (B95O5) referans yakıtı ile 100 ppm dozda B₂O₃ nanopartikül katkısı ilave edilerek B95O5B₂O₃100 test yakıtı hazırlanmıştır. B₂O₃ nano parçacıkların yakıt içerisindeki homojen dağılımlarını sağlamak için ultrasonik karıştırıcı kullanılmıştır. Deneysel çalışma için CRDI sistemine sahip bir dizel motor kullanılmıştır. Test çalışmasına başlamadan önce ölçüm cihazları ve motor ayarları kontrol edilmiştir. Deneysel çalışmada ilk olarak B95O5 referans yakıtı test edilmiştir. Öncelikle standart avansta (Sta) ardından geç enjeksiyon (Sta-2 KMA), daha sonra erken eken enjeksiyon (Sta+2KMA) ve (Sta+4KMA)'da deneyin ilk aşaması tamamlanmıştır. B95O5B₂O₃100 yakıtı da aynı şartlarda test edilmiştir. Motor performans parametreleri ve egzoz emisyonlarındaki % değişimler referans yakıtı (B95O5 Sta) kıyasla şöyledir; Motor momenti B₂O₃ katkılı yakıt ile +4 KMA'da %11.26 artmıştır. Fren özgül enerji tüketimi ve fren termik verimi B95O5 ile +4 KMA'da sırasıyla %20.85 ve %23.72 iyileştirilmiştir. Egzoz gaz sıcaklığındaki (EGT) maksimum artış, B95O5B₂O₃100 ile standart avansta %7.15'tir. HC emisyonlarındaki maksimum azalma, B95O5B₂O₃100 ile +4 KMA'da yaklaşık olarak %15.28'dir. En yüksek CO₂ emisyonu B95O5B₂O₃100 ile +2 KMA'da %5.74 yüksek iken, en yüksek CO₂ emisyonu B95O5 ile -2 KMA'da %3.85 düşüktür. NO emisyonundaki maksimum azalma B95O5 ile +4 KMA'da %27.99'dur. NO emisyonu nanopartikül katkılı B95O5B₂O₃100 ile +4 KMA'da %19.63 azalmıştır.

Anahtar kelimeler: Biyodizel, Nanopartikül, Avans, Emisyon, Motor performansı

Abstract

Diesel engines continue to be utilized across various sectors owing to their durability and high thermal efficiency. However, the finite reserves of petroleum-based fuels, volatility in fuel prices, and adverse environmental effects of pollutant emissions have intensified interest in environmentally benign alternative fuels. Biodiesel, which can be used in diesel engines in blended form, represents a sustainable alternative. In this study, a reference fuel consisting of 95% biodiesel and 5% n-octanol by volume (B95O5) was prepared, along with a test fuel (B95O5B₂O₃100) incorporating 100 ppm of B₂O₃ nanoparticles. Ultrasonic mixing was employed to ensure homogeneous dispersion of nanoparticles within the fuel. Experiments were conducted on a common rail direct injection (CRDI) diesel engine under varying injection timings: standard timing (Std), retarded injection (Std-2°C), and advanced injection (Std+2°C and Std+4°C). Relative to the reference fuel at standard timing, the B₂O₃-doped fuel increased engine torque by 11.26% at +4°C. Brake specific energy consumption and brake thermal efficiency improved by 20.85% and 23.72%, respectively, with B95O5 at +4°C. Maximum exhaust gas temperature rise (7.15%) was observed with B95O5B₂O₃100 at standard timing. HC emissions decreased maximally by 15.28% with the nanoparticle-doped fuel at +4°C. CO₂ emissions were 5.74% higher with B95O5B₂O₃100 at +2°C, whereas B95O5 exhibited a 3.85% reduction at -2°C. NO emissions showed maximum reduction of 27.99% with B95O5 at +4°C, and 19.63% with the nanoparticle-doped fuel at the same timing.

Keywords: Biodiesel, Nanoparticles, Advance, Emissions, Engine performance

1 Giriş

Sanayi Devrimi'nden günümüze kadar içten yanmalı motorlar, dünyanın ulaştırma ve lojistik ağlarının omurgasını oluşturmuştur. Dizel motorlar, yüksek termik verimlilikleri, yakıt ekonomileri ve dayanıklılıkları sayesinde ağır vasıtalarda, deniz taşıtlarına, jeneratörlerde, iş makinelerinde ve tarım makineleri gibi geniş bir yelpazede vazgeçilmez bir güç konumundadır [1], [2], [3]. Ancak, geleneksel fosil kökenli dizel yakıtların sınırlı rezervleri ve yanma sonucu atmosfere saldıkları karbon dioksit (CO_2), hidrokarbon (HC), karbonmonoksit (CO), partikül maddeler (PM) azot oksitler (NO_x) ve kükürt oksit (SO_x) gibi zararlı egzoz gazları, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de enerji arz güvenliği açısından ciddi endişelere yol açmaktadır [1], [4], [5].

Bu sorunun üstesinden gelebilecek potansiyele sahip olan, yenilenebilir, biyobozunur ve karbon nötr olma özelliği yüksek bir alternatif olarak biyodizel öne çıkmaktadır. Bitkisel yağlar (kanola, soya, palmye gibi), hayvansal yağlar veya atık kızartma yağlarının transesterifikasyon adı verilen kimyasal bir süreçle işlenmesiyle elde edilen biyodizel [6], [7], [8], fiziksel ve kimyasal yapı bakımından geleneksel dizel yakıtına yakın olması nedeniyle çoğu dizel motorda herhangi bir modifikasyon gerektirmeden veya belirli oranlarda karıştırılarak doğrudan kullanılabilir. Bu sorunun üstesinden gelebilecek potansiyele sahip olan, yenilenebilir, biyobozunur ve karbon nötr olma özelliği yüksek bir alternatif olarak biyodizel öne çıkmaktadır.

Biyodizel kullanımı, fosil yakıtlara bağımlılığı azaltması, kırsal ekonomilere katkı sağlaması ve egzoz emisyonlarında iyileşmeler sağlaması açısından büyük umut vadetmektedir. Diğer taraftan, biyodizelin düşük sıcaklıkta akış özelliklerinin zayıflığı, yüksek viskozitesi, oksidatif kararlılığının petrodizele kıyasla daha düşük olması, belirli motor tiplerinde NO_x emisyonlarını artırma potansiyeli ve yakıt sistemi parçalarında uzun dönemli etkileri, henüz tam olarak çözümlenmemiş teknik zorluklar arasında yer almaktadır [9], [10]. Yakıtların yanma süreçleri, katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilebilmektedir. Alkoller, bu konuda araştırmalarda ilgi odağı olan katkı maddeleridir.

N-oktanol, uzun zincirli bir alkol olarak dizel ve biyodizel gibi yakıtlara katkı maddesi olarak eklendiğinde, hem motor performansı hem de emisyon karakteristikleri açısından önemli avantajlar sağlayabilen bir potansiyele sahiptir [11]. Metanol veya etanole kıyasla daha yüksek enerji yoğunluğuna ve daha yüksek setan sayısına sahip olması, n-oktanolün motorlarda tutuşma gecikmesini azaltarak daha düzgün bir yanma süreci sağlamasına yardımcı olmaktadır [12], [13]. Ayrıca, yüksek oksijen içeriği sayesinde silindir içindeki yakıt-hava karışımının daha eksiksiz yanmasını teşvik ederek egzoz emisyonlarında azalma sağlanabilmektedir [14]. N-oktanolün aynı zamanda düşük buhar basıncı ve yüksek alevlenme sıcaklığı, yakıtın depolanması ve taşınması sırasında güvenlik avantajı sağlarken, geleneksel alkollere göre daha iyi yağlayıcılık özellikleri göstermesi enjeksiyon sistemleri ve yakıt pompaları üzerindeki aşınmayı azaltıcı etki yapmaktadır [15]. Bunlara ek olarak, n-oktanolün geleneksel dizel ve biyodizel yakıtlar ile faz ayrışması olmadan iyi karışabilirliği bir diğer avantajıdır [13]. Li ve ark. n-oktanol-biyodizel

karışımının dizel motor performansına yönelik bir modelleme çalışması gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre motor güç çıkışında iyileşme kaydetmişlerdir. Ayrıca NO_x ve kurum emisyonlarını azalttığı ifade edilmiştir [11]. Mehra ve Goel ise dizel yakıtı üzerinde farklı oranlarda n-oktanolün etkisini incelemişlerdir. Karışım içerisindeki n-oktanol yüzdesindeki artış ile NO_x , duman, CO ve HC emisyonlarında kayda değer iyileşme sağladılar [16]. Kumar ve ark. biyodizel, dizel ve n-oktanol üçlü karışımlarının dizel motor göstergeleri üzerindeki etkisini ortaya koymak için bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. BSFC ve BTE'de iyileşme olduğunu vurgulamışlardır. HC ve CO emisyonlarında da azalma kaydedilirken, NO_x emisyonlarının arttığını belirttiler [17].

Yakıt özelliklerinin iyileştirilmesinde bir diğer yenilikçi yaklaşım ise nano partikül katkı maddelerinin kullanımıdır. Metal oksit (Al_2O_3 , CeO_2 , TiO_2 , SiO_2 gibi), grafen ve karbon nanotüp gibi karbon bazlı veya metal bazlı (Fe, Cu, Al) nanopartiküller, biyodizel-alkol karışımlarına belirli oranlarda ilave edildiğinde, yakıtın termofiziksel özelliklerinde önemli iyileşmeler sağlayabilmektedir [9], [18]. Nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde, silindir içerisinde katalitik etki göstererek tutuşma sıcaklığını düşürdüğü, yanma verimini artırdığı ve eksik yanma ürünlerinin azalmasına katkıda bulunduğu bilinmektedir [19], [20]. Bununla birlikte, nanopartikül katkısı ısı transferini iyileştirerek silindir içi sıcaklık dağılımını düzenlemekte, böylece yanma odasında daha homojen bir yanma gerçekleşmesine olanak tanımaktadır [20]. Yapılan çalışmalar, nanopartikül katkılı biyodizel karışımlarının, motor performansında iyileşmeler, özgül yakıt tüketiminde azalma ve egzoz emisyonlarında önemli düşüşler sağladığını; buna karşın NO_x emisyonlarında kısmi artışlar gözlemlendiğini ortaya koymaktadır [21], [22]. Sharma ve ark. biyodizele katkı maddesi olarak grafen ve grafit nanopartiküllerinin kullanımını araştırmışlardır. Az katmanlı grafen ve grafit nanopartikülleri ile NO_x emisyonlarında azalma, fren termik veriminde ise %8 ile %10 aralığında iyileşme kaydetmişlerdir [22]. Pullagura ve ark. dizel-biyodizel ve alkol karışım yakıtına TiO_2 nanopartikül katkısının etkilerini incelemişlerdir. Fren özgül yakıt tüketimi (BSFC), CO, HC ve NO_x emisyonlarında azalma, BTE'de artış gözlemlenmişlerdir [23]. Ahmed Ali ve Makrahy tarafından yapılan çalışmada, Al_2O_3 nano malzemelerin dizel yakıt katkısı olarak kullanımının etkileri araştırılmıştır. Araştırma neticesinde CO, HC ve CO_2 emisyonlarında azalma, NO_x emisyonunda yükselme olduğunu ve yakıt tüketiminde bir değişiklik olmadığını bildirmişlerdir [24]. Bir diğer nanopartikül çalışması, Solmaz ve ark. tarafından gerçekleştirilmiştir. Biyodizel karışımına MWCNT ilavesi BTE'de artış, HC, CO ve kurum emisyonlarında ise azalma sağlarken, NO_x emisyonlarını yükseltmiştir [25]. Sekar ve ark. biyodizel/n-oktanol yakıt karışımının dizel motor performansı ve emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. N-oktanol oranının artırılmasıyla yakıt tüketimi azaltılmıştır. Aynı zamanda CO, HC, NO ve duman emisyonlarındaki azalmayı n-oktanolün oksijen içeriğine atfetmişlerdir [26].

Tüm bu potansiyel avantajlara rağmen, biyodizel-alkol karışımlarının motor performansı ve emisyon çıktıları üzerindeki nihai etkileri, yalnızca yakıt özelliklerine değil, aynı zamanda motor çalışma parametrelerine de güçlü bir şekilde bağlıdır. Bu parametreler arasında özellikle püskürtme zamanlaması, silindir içi basınç, ısı dağılımı, indike güç ve egzoz emisyon oluşumu üzerinde doğrudan ve birincil bir etkiye sahiptir [27], [28]. Püskürtme zamanlamasının optimizasyonu, yakıt-hava karışımının oluşumu, tutuşma gecikmesi ve yanma sürecinin fazının ayarlanmasında kritik rol oynamaktadır [29]. Püskürtme zamanlaması ile ilgili olarak Li ve ark. bir çalışma yapmışlardır. Dizel-etanol ve n-bütanol karışımı ile çalıştırılan bir dizel motorun püskürtme zamanlamasının artırılması ile CO ve kurum emisyonlarında azalma, NO_x emisyonlarında ise yükselme olduğunu bildirmiştir [30]. Rajendran ve ark. biyodizel yakıtlı bir dizel motorun üç farklı püskürtme zamanlamasında performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimi araştırdılar. Standart olarak üst ölü noktasından (ÜÖN) 23 derece püskürtme zamanlamasına sahip dizel motorda, 19 derecelik püskürtme zamanlamasında NO_x emisyonlarında %28, CO emisyonları %25 ve duman opaklığında %5 azalma sağlamışlardır. 27 derece enjeksiyon zamanlamasında ise NO_x emisyonu %4 artmış ve duman opaklığı %3 azaltılmıştır. Araştırmacılar enjeksiyon zamanlamasının yüksek viskoziteli yakıtlarda optimize edilmesinin kritik bir öneme sahip olduğunu vurgulamışlardır [31]. Kumar ve ark. ise pilot enjeksiyon zamanlamasının etkisini araştırmışlardır. Hidrojen-biyodizel çift yakıtlı bu sistemde yaptıkları deneysel çalışmada, 1500 bar enjeksiyon basıncı ve 17 derece pilot enjeksiyon zamanlaması ile dizel yakıtına kıyasla BTE'de artış sağladılar. Aynı püskürtme basıncında ve 11 derece pilot enjeksiyon zamanlamasında ise HC ve kurum emisyonlarında önemli ölçüde azalma gözlemlenildi. Ancak, aynı basınçta, 17 derece püskürtme zamanlamasında ve 9 litre/dakikalık bir hidrojen sevinde NO_x emisyonunun yükseldiğini bildirdiler [32]. Rani ve ark. nano katkılı biyodizel karışımları ile çalışan dizel motorun farklı

püskürtme zamanlamasına bağlı performans ve egzoz emisyonlarındaki değişimi incelediler. Motor performans parametrelerinin püskürtme zamanlamasının 27 derece artırılması neticesinde iyileştiğini, HC, CO ve duman emisyonlarında ise azalma sağladıklarını bildirmişlerdir. Ancak, NO_x emisyonlarında hafif bir artış olduğunu gözlemlenildi [33].

Literatür incelendiğinde; n-oktanol karışımları, çeşitli nanopartikül katkıları ve püskürtme avansının motor parametreleri üzerindeki etkilerini ayrı ayrı inceleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak, yüksek oksijen içeriğine sahip nanopartikül katkılı biyodizel-yüksek alkol (uzun zincirli) karışımlarının kullanıldığı CRDI sistemine sahip modern dizel motorlarda, püskürtme zamanlaması değişikliklerinin (geç ve erken püskürtme) performans ve emisyonlar üzerindeki eş zamanlı etkisine dair literatürde önemli bir boşluk bulunmaktadır. Özellikle yüksek viskoziteli yakıtların püskürtme zamanlamasının optimizasyonu, yanma verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

B₂O₃ nanopartiküllerinin sahip olduğu yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde silindir içerisinde katalitik bir etki göstererek yanma sürecini iyileştirme potansiyeli bulunmaktadır. Ayrıca B₂O₃ nanopartikülleri, yakıtın termal iletkenliğini artırarak ısı transferini iyileştirmekte ve daha homojen bir yanma ortamı sağlamaktadır. Bu çalışma, söz konusu yenilikçi yakıt karışımının CRDI bir motorda farklı enjeksiyon stratejileri altındaki davranışını ilk kez bütüncül bir şekilde ortaya koyarak literatüre özgün bir katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

2 Materyal ve yöntem

Bu deneysel çalışmada, test yakıtları hacimsel olarak şöyle tanımlanmıştır: %95 biyodizel ve %5 n-oktanol içeren karışım, B95O5 olarak; %95 biyodizel ve %5 n-oktanol karışımına 100 ppm B₂O₃ katkı maddesi ilave edilerek elde edilen karışım ise B95O5B₂O₃100 olarak adlandırılmıştır. Biyodizel, Türkiye'deki DP Tarım Enerji Sanayi ve Ticaret A.Ş.'den ticari olarak satın alınmıştır.

Tablo 1. Yakıtların fiziksel ve kimyasal özellikleri

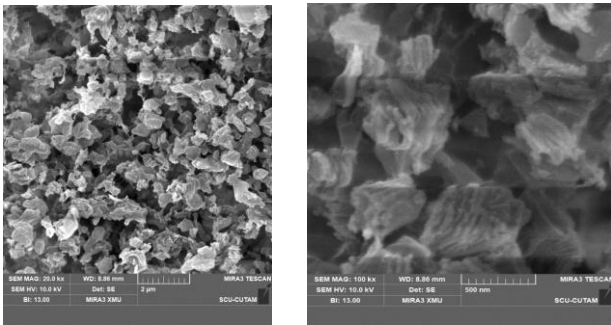
Parametreler	Yöntem	B100	n-Oktanol	B95O5
Yoğunluk (kg/m ³)	TS EN ISO 12185	883.70	830	881.02
Setan numarası	ASTM D613	51.30	39	50.7
Alt ısı değeri (MJ/kg)	ASTM D240	39.54	39.55	39.54
Viskozite (mm ² /s at 40°C)	TS EN ISO 3104	4.367	5.6	4.428
Parlama noktası (°C)	TS EN ISO 2719	171	86	166.75
Soğuk filter tıkanma noktası (°C)	TS EN 116	-2	-	-
Sülfür (mg/kg)	TS EN ISO 20846	6.20	-	-
İyot değeri (g İyot/100g)	TS EN 14111	109	-	-
Su içeriği (%)	TS 6147 EN ISO 12937	0.020	-	-
Kaynama noktası (°C)	ASTM D86	-	195	-

Deneylerde katkı maddesi olarak B_2O_3 ve n-oktanol kullanılmıştır. n-oktanol, MERCK'ten satın alınmış olup saflığı %99'un üzerindedir. B100, n-oktanol ve B95O5'in bazı fiziksel ve kimyasal yakıt özellikleri **Tablo 1**'de gösterilmiştir. B95O5'in özellikleri, karışım oranına göre hesaplanmıştır. Bu çalışmada kullanılan B_2O_3 nanopartikülü Nanography Nano Technology Inc. Firmasından temin edilmiştir. Bu nanopartikülün özellikleri **Tablo 2**'de verilmiştir.

Tablo 2. B_2O_3 nanopartikül özellikleri

Parametreler	
Kimyasal formülü	B_2O_3
Saflık (%)	99.95
Ortalama partikül boyutu(nm)	50
Moleküler ağırlık	69.62
Yoğunluk (g/cm^3)	2.46
Kaynama noktası ($^{\circ}C$)	1860
Erime noktası ($^{\circ}C$)	510
Görünüm	Katı beyaz kristal

Şekil 1'de B_2O_3 'e ait SEM görüntüleri sunulmaktadır. B_2O_3 nanopartiküllerinin genel morfolojisi incelendiğinde, parçacıkların düzensiz bir şekilde bir araya gelerek kümeler oluşturduğu göze çarpmaktadır. Belirgin bir kristal morfolojisi gözlenmemektedir; parçacık yüzeyleri ise oldukça pürüzlü ve katmanlı bir görünüm sergilemektedir. SEM analizi ayrıca boyut dağılımının homojen olmadığını ortaya koymaktadır. Bir nanopartikül, en az bir boyutunun 100 nm'nin altında olmasıyla tanımlanmaktadır. 500 nm ölçeğindeki SEM görüntüsünde, yapının katmanlar biçiminde üst üste biriktiği açıkça görülmektedir. Nanopartiküllerin pürüzlü ve katmanlı yüzey yapısı, yakıt damlacıkları içinde süspansiyon oluşturarak yakıtın termofiziksel özelliklerini değiştirir. Nanopartiküllerin oluşturduğu bu düzensiz kümeler, yanma odasındaki yüksek sıcaklıkla karşılaştığında yakıt damlacığı içinde yerel sıcak noktalar oluşturmaktadır. Bu durum, mikro patlama olarak adlandırılan damlacığın aniden parçalanmasına yol açarak daha küçük boyutta yakıt damlacıkları oluşturmaktadır.



Şekil 1. B_2O_3 nanopartiküllerinin SEM görüntüsü

Nanopartiküllerin 100 nm'nin altındaki boyutları ve pürüzlü yüzeyleri, birim hacim başına çok yüksek bir yüzey alanı sunmaktadır. Bu durum, yakıt ile hava arasındaki temas yüzeyini artırarak buharlaşma hızını ve karışım kalitesini iyileştirir. Pürüzlü yüzeyler, yanma reaksiyonları için daha fazla aktif bölge sağlamaktadır. Bu yüksek reaksiyon hızı, yanmanın daha tam gerçekleşmesine yardımcı olur. Pürüzlü yüzeyler, yanma reaksiyonları için daha fazla aktif bölge sağlar. Bu yüksek reaksiyon hızı, yakıtın tam yanmasını teşvik eder.

Literatürde nano katkı maddeleri üzerine yapılan çalışmalar ve dizel yakıtlarındaki uygulanabilirliğini inceleyen çeşitli araştırmalar dikkate alınarak, bu deneysel çalışmada B_2O_3 nanopartikül konsantrasyonu 100 ppm olarak belirlenmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalar, 100 ppm civarındaki dozajların yakıtın termofiziksel özelliklerini (termal iletkenlik ve yüzey alanı/hacim oranı gibi) iyileştirmede etkili olduğunu, aynı zamanda yakıtın viskozite ve stabilize dengesini bozmadan katalitik etki sağladığını göstermektedir [34], [35]. Bu çalışmanın temel odağı, farklı nanopartikül konsantrasyonlarının etkisinden ziyade, nanopartikül katkılı bir yakıtın CRDI sistemindeki püskürtme zamanlaması değişikliklerine verdiği tepkiyi analiz etmektir. Bu nedenle, araştırmalarda verimli olduğu kanıtlanmış sabit bir konsantrasyon seçilerek, enjeksiyon stratejisinin motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

B_2O_3 nanopartikülleri 2g ölçme kapasitesine sahip ve 0.005 mg ölçme hassasiyetine sahip bir terazi miktarı ayarlanmıştır. 1 litre yakıt karışımına 0.1g nanopartikül ilave edilerek karışım yakıtı içerisinde homojen bir şekilde dağılımını sağlamak amacıyla otuz dakika boyunca ultrasonik banyoda karıştırılmıştır.

Test motorunun fotoğrafı ise **Şekil 2**'de verilmiştir. Test düzeneği: bir test motoru, elektrikli girdap akımı dinamometresi, yakıt ve hava ölçüm sistemleri, motor yağı ve soğutma suyu şartlandırıcıları, bir emisyon ölçüm cihazı ve tüm bu bileşenleri kontrol eden bir üniteden oluşmaktadır.



Şekil 2. Test motorunun görünümü

Deneysel çalışmada kullanılan dizel motor, tek silindri, su soğutmalı ve CRDI enjeksiyon sistemi ile donatılmış, 1120 cc hacme ve 16,4:1 sıkıştırma oranına sahiptir. Motor yağı ve soğutma suyu sıcaklıkları, yardımcı bir şartlandırma sistemi aracılığıyla sabit tutulmuştur. Motora ait teknik veriler ise **Tablo 3**'te sunulmaktadır.

Tablo 3. Test motorunun teknik özellikleri

Özellikler	
Motor tipi	4-zamanlı, tek silindirli sıkıştırma ile ateşlemeli
Silindir çapı (mm)	106
Kurs (mm)	127
Silindir hacmi (cm ³)	1120
Sıkıştırma oranı	16.4:1
Maksimum güç (1500 rpm, kW)	50
Maksimum tork (1400 rpm, Nm)	160
Yakıt sistemi	CRDI-1800 bar
Yakıt pompası	Bosch yüksek basınçlı mekanik pompa
Emme ve egzoz supap sayısı	2 ve 1
Soğutma sistemi	Su soğutmalı (Çiller suyu ile şartlandırıcılı)
Yağlama sistemi	Kuru karter (Çiller suyu ile şartlandırıcılı)

Deneylere başlamadan önce, motor yağı, soğutma suyu ve yakıt sıcaklıkları sırasıyla 90°C, 70°C ve 20°C değerlerine ulaştırılmış ve deneysel çalışma süresince bu sıcaklıklar sabit tutulmuştur. Soğutma suyu sıcaklığının 70°C'ye, yağlama yağı sıcaklığının ise 90°C'ye ayarlanmasında çiller suyunun kullanıldığı bir şartlandırma sisteminden yararlanılmıştır. Motorun kararlı çalışma sıcaklığına ulaşması, kontrol odasında bulunan bilgisayarlardan izlenmektedir.

Motor yağı ve soğutma suyu sıcaklıkları belirlenen sıcaklıklara gelene kadar motor boşa çalıştırılmıştır. Deneysel çalışmada B95O5 ve B95O5B₂O₃100 test yakıtları kullanılmıştır. Her bir test yakıtı ile deney yapılmadan önce, motor, bir önceki testten kalan yakıt kalıntılarının tamamen temizlenmesini sağlamak amacıyla yeterli süre boyunca çalıştırılmıştır. Her deneyde motor performans parametreleri ve egzoz emisyon değerleri sabit hale gelene kadar beklenmiştir. Bir deneyde y Her bir deney 3 kez tekrarlanmıştır. Bu tekrar eden deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınmıştır. Deney düzeneğinde kullanılan cihazlar ve egzoz gaz analizörünün hassasiyet değerleri sırasıyla **Tablo 4** ve **Tablo 5**'te gösterilmektedir.

Tablo 4. Test ekipmanında bulunan cihazlar ve hassasiyetleri.

Parametreler	Aygıt	Hassasiyet
Motor hızı	AVL kodlayıcı	± 0.1 rpm
Moment	HBM	± 0,1 Nm
Yakıt tüketimi	AVL 735	< %0.15
Enjeksiyon zamanlaması	Açı kodlayıcı	± 0.1 KMA
Sıcaklık sensörü	PT100 (K tipi)	< ± %1

Tablo 5. Egzoz gaz analizörü hassasiyeti

Parametreler	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
HC	0-10000 ppm	1 ppm
NO	0-5000 ppm	1 ppm
CO ₂	0-18 % hacimsel	0.01 % hacimsel

Deneysel süreçte ölçülen verilerde çevresel koşullar ve kullanılan ölçüm ekipmanı nedeniyle hatalar meydana gelir [36]. Hesaplanan motor parametrelerinin belirsizlikleri **Tablo 6**'da verilmiştir.

Tablo 6. Motor parametrelerinin belirsizlikleri

Parametreler	Belirsizlik (%)
Moment	0.11
FÖET	0.19
Fren termik verim	0.186
EGT	1
HC	0.01
NO	0.055
CO ₂	0.02

Belirsizlik analizi, deneysel çalışmada kullanılan ekipmanın hassasiyetinden ve ölçümlerden elde edilen hatalardır. Toplam belirsizlik, mevcut olan parametrelerin belirsizlikleri ve türetilmiş belirsizlikler dikkate alınarak aşağıdaki **Denklem (1)** yardımıyla yaklaşık olarak %1.04 olarak hesaplanmıştır.

$$U_R = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2} \quad (1)$$

Deneyler sırasında test motoru, 1500 rpm sabit hızda ve dört farklı yük koşullarında (%25, %50, %75 ve %100) çalıştırılmıştır. Bu çalışmada motor yükü, gaz pedalının açıklık yüzdesini ifade etmektedir. Örneğin; %100 yük, pedalın tamamen açık olduğu durumu; %50 yük ise pedalın yarı açık olduğu durumu ifade etmektedir. Tam gaz durumunda, motor dinamometre ile yüklenerek 1500 rpm hıza ulaştırılmıştır. Pedal yüzdesi (yük) azaltıldığında motor hızı da düşmüş, bunun üzerine dinamometre yükü azaltılarak hız tekrar 1500 rpm'ye çıkarılmıştır. Test motoru, değişen yük ve hız koşullarına göre ayarlama yapan, motorun

elektronik kontrol ünitesinde gömülü ve önceden programlanmış bir harita doğrultusunda çalışmaktadır. 1500 rpm sabit motor hızında enjeksiyon basıncı ve zamanlamasının yüke bağlı değişimi Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Test motorunun 1500 rpm'deki yüküne bağlı enjeksiyon basıncı ve zamanlama ayarı.

Motor yükü (%)	Enjeksiyon basıncı (bar)	Enjeksiyon zamanlaması (KMA)
25	750	15
50	900	16
75	1300	17
100	1600	18

DeneySEL çalışmaya, 1500 rpm sabit devirde, ilk olarak standart püskürtme zamanlamasında (Tablo 5'te gösterildiği gibi) B95O5 Sta olarak adlandırılan yakıt ile başlanmıştır. Motor yükü test odasında bulunan bir yükleme kontrolörü ile değiştirilmiş ve %25, %50, %75 ve %100 yük şartlarında test edilmiştir. CRDI motorun ECU'sunda yer alan avans haritalarında püskürtme zamanlaması 2 KMA geciktirilerek (-2 KMA) olarak ayarlanmıştır. Grafik göstergelerinde B95O5-2 KMA olarak adlandırıldı. Tablo 5'te her bir yük değerine karşılık gelen avans değerinden 2 KMA eksiltilecek aynı yük şartlarında deneySEL çalışmaya devam edilmiştir. Örneğin %25 yükte yeni püskürtme zamanlaması 13 KMA, %50 için 14 KMA'dır. Ardından 2 KMA erken enjeksiyon (+ 2KMA) için avans ilave edilerek (Üst ölü noktadan 2 derece erkene alınarak) aynı yük şartlarında deney devam etmiştir. Burada yeni avans değeri %25 yük için 17 KMA, %50 için ise 18 KMA'dır. Grafik göstergelerinde B95O5+2KMA olarak adlandırılmıştır. Bu yakıt için

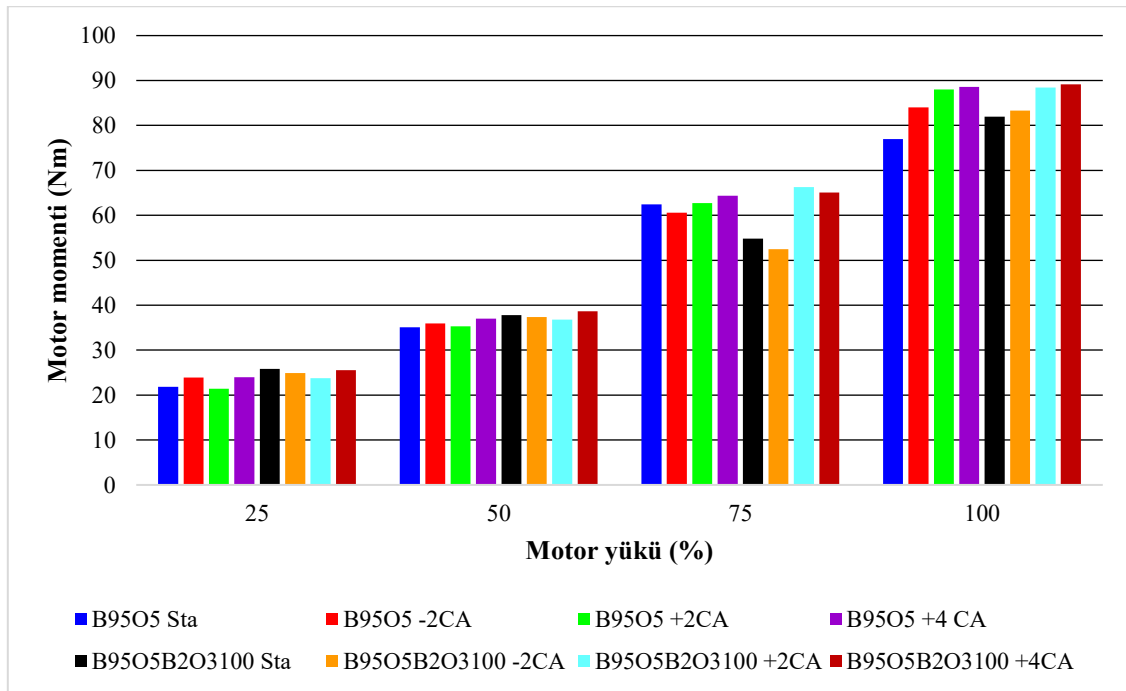
püskürtme zamanlaması 2 derece daha erkene alınarak B95O5+4KMA için aynı yük şartlarında deneySEL çalışma gerçekleştirilmiştir. Ardından 100 ppm B₂O₃ nanopartikül katkılı test yakıt için standart, -2, +2 ve +4 KMA püskürtme zamanlamaları değiştirilerek dört farklı yük için deneySEL çalışma yapılmıştır.

3 Tartışma

Bu bölümde, deneylerden elde edilen motor performans parametrelerinden motor momenti, fren özgül enerji tüketimi, fren termik verim ile egzoz emisyonlarından HC, NO ve CO₂ kapsamlı bir şekilde tartışılmıştır. Ayrıca, elde edilen bulgular, literatür ile karşılaştırılarak tartışılmıştır.

3.1 Motor momenti

Motor momenti, içten yanmalı bir motorun krank mili üzerinde ürettiği döndürme kuvveti olarak tanımlanmaktadır. Silindir içindeki yanma basıncının piston üzerinde oluşturduğu kuvvetin krank miline aktarılmasıyla meydana gelir. Moment değeri, hava-yakıt karışımı, ateşleme zamanlaması, hacimsel verim ve motor devri gibi birçok faktöre bağlı olarak değişir. DeneySEL çalışmalarda, dinamometre kullanılarak ölçülen bu değer, fren özgül enerji tüketimi ve termik verim gibi diğer performans parametrelerinin hesaplanmasında temel girdiyi oluşturmaktadır. Şekil 3'te yüke bağlı motor momenti gösterilmiştir. Motor yükü arttıkça, her iki yakıtın tüm avans değerlerinde motor momentinin arttığı görülmektedir. En düşük moment %25 yükte 21.44 Nm ile B95O5 +2 KMA'da elde edilirken, en yüksek moment tam yükte 89.16 Nm ile B95O5B₂O₃100 +4 KMA'da elde edilmiştir. Bu sonuç motora daha fazla yakıtın gönderilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3. Motor momentinin yüke bağlı değişimi

Genel olarak erken püskürtme ile motor momentinin arttığı belirlenmiştir. B95O5 ile -2 KMA'da motor momentinin standart avansa göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Püskürtmenin geç yapılmasının, silindir içerisindeki havanın daha yüksek sıcaklık ve basınca ulaşmasına, başka bir deyişle sıkıştırma oranının artmasına neden olarak moment artışı sağladığı düşünülmektedir. Aynı yakıt için avans artırıldığında (+2 ve +4 KMA) daha yüksek moment değerlerinin elde edildiği görülmektedir. +4 KMA ile bu yakıt için en yüksek moment elde edilmiştir. B95O5 yakıt karışımının yüksek viskoziteye sahip olması, yakıtın damlacıklara ayrılmasını ve buharlaşmasını zorlaştırmaktadır. Püskürtme zamanlamasındaki bu artış, yakıtın buharlaşması için ek bir süre sağladığı için daha homojen bir karışım ve iyileştirilmiş yanma sağlamaktadır [37], [38]. 100 ppm B₂O₃ ilaveli yakıt açısından bakıldığında benzer bir eğilim olduğu görülmektedir. B95O5 ile karşılaştırıldığında genellikle daha yüksek motor momenti elde edilmiştir. Motor momentindeki bu artış, nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı hacim oranının yakıtın termal iletkenliğini artırmasına ve yakıtın buharlaşma kabiliyetini artırmasına bağlı olarak yanma sürecini iyileştirmesine atfedilmektedir. Ayrıca, +2 ve +4 KMA erken püskürtme zamanlamasının yakıtın buharlaşması için gerekli süreyi de sağladığı ve motor momentini artırdığı söylenebilir.

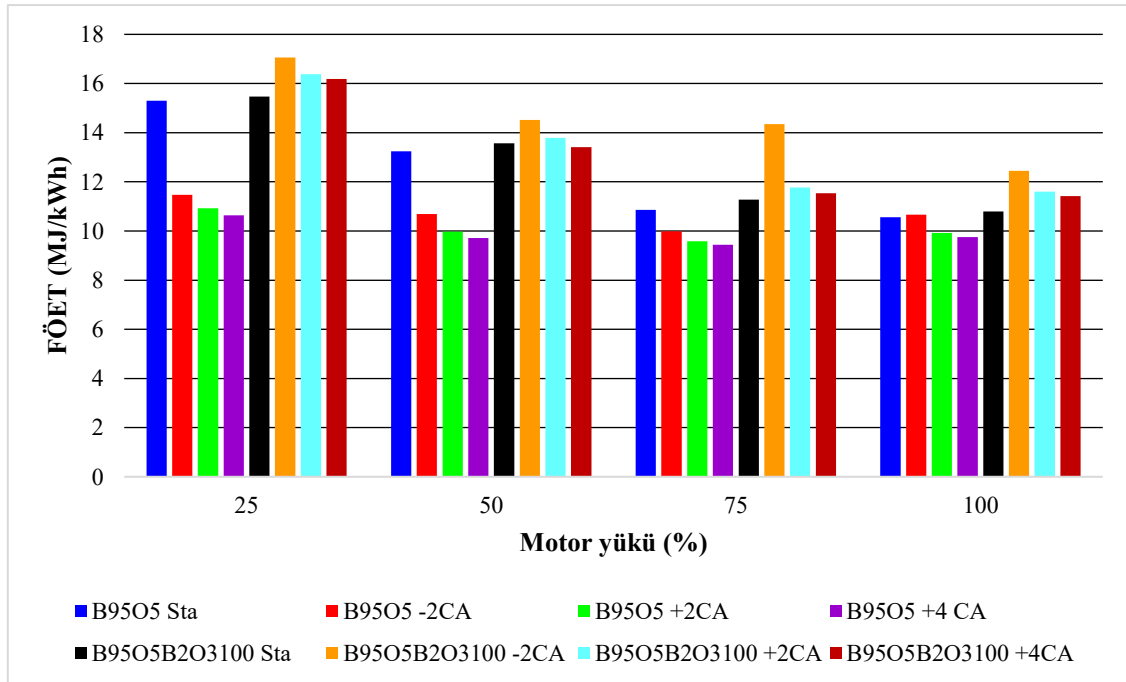
3.2 Fren Özgöl Enerji Tüketimi (FÖET)

FÖET birim zamanda birim güç başına tüketilen enerji olarak tanımlanmaktadır [39]. Şekil 4'te motor yüküne bağlı olarak FÖET'in değişimi gösterilmiştir. Yakıt karışımları ve

tüm püskürtme zamanlamaları için motor yükü %25'ten %100'e doğru arttıkça FÖET değerlerinde genel bir azalma eğilimi gözlemlenmiştir. En yüksek FÖET, %25 yük şartlarında B95O5B₂O₃100 -2 KMA'da 17.05 MJ/kWh iken, en düşük FÖET ise %75 yük şartlarında B95O5 test yakıtıyla 9.45 MJ/kWh ile +4 KMA'da elde edilmiştir. Düşük yüklerde (%25) FÖET değerleri en yüksek seviyesindeyken, motor yükünün artmasıyla birlikte bu değerler belirgin bir şekilde düşmektedir. Bu durum, artan motor yüküyle birlikte silindir içi sıcaklık ve basınçların yükselmesi, yanma veriminin artması ve üretilen toplam güç içinde sürtünme kayıplarının oransal olarak azalması ile açıklanabilir [40].

Avans ayarlarının optimizasyonu FÖET üzerinde doğrudan bir iyileşme sağlamıştır. Avansın +2 KMA ve +4 KMA olarak artırılması FÖET'i düşürmüştü; özellikle katkısız B95O5 +4 KMA konfigürasyonu tüm koşullarda en iyi sonuçları vererek %75 motor yükünde minimum FÖET değerine ulaşmıştır. Püskürtme avansının erkene alınması, silindir içi tepe basıncını optimum noktaya taşıyarak yakıt enerjisinin mekanik işe dönüşümünü maksimize eder [41].

B₂O₃ nanopartikül katkısının yakıtın viskozitesini arttırdığı yapılan çalışmalarda bildirilmiştir [42]. Yakıt karışımları kıyaslandığında, 100 ppm B₂O₃ nanopartikül katkılı (B95O5B₂O₃100) yakıtın, katkısız B95O5 karışımına göre tüm yük ve avans koşullarında daha yüksek FÖET değerleri sergilediği tespit edilmiştir. Muhtemelen nanopartiküllerin topaklanmaya uğraması, yakıtın kinematik viskozite ve yoğunluğunu artırarak atomizasyon kalitesini etkilediği düşünülmektedir. Püskürtme formunun bozulması ve zayıf hava-yakıt karışımı, yanma süresini uzatarak FÖET'in artmasına neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4. Motor yüküne bağlı FÖET değişimi

3.3 Fren termik verim

Fren termik verim, yakıtın ne kadarının faydalı işe dönüştürüldüğünün bir göstergesidir [43]. Şekil 5'te motor yüküne bağlı fren termik verimindeki değişim gösterilmiştir. Fren termik verim, motor yükünün artmasıyla birlikte tüm test yakıtları için artış eğilimi göstermiştir. En düşük BTE, B95O5B₂O₃100 test yakıtı ile %25 yükte ve -2 KMA'da %21.1 iken, en yüksek BTE ise +4 KMA'da ve %75 yük koşullarında %38.116 olarak B95O5 ile elde edilmiştir. Düşük yüklerde (%25) %21,1 ile %33,8 aralığında seyreden BTE değerleri, yükün artmasıyla birlikte ivmelenerek %38 seviyelerine kadar ulaşmıştır. Yük arttıkça silindir cidarlarına olan nispi ısı transferi kayıplarının azalması ve mekanik verimin yükselmesi, yakıt enerjisinin çok daha verimli bir şekilde fren gücüne dönüşmesini sağlamaktadır [44]. En yüksek fren termik verimi değerleri FÖET bulgularıyla uyumlu olarak yine B95O5 +4 KMA'da elde edilmiştir. Avans miktarının +4 KMA seviyesine çıkarılması, tutuşma gecikmesini telafi ederek ana yanma fazının genişlemesine olanak tanımakta ve termal verimliliği artırmaktadır. Diğer bir neden ise yüksek viskoziteye sahip yakıtın buharlaşması için ihtiyaç duyulan zamanın sağlanmasıyla yanmanın iyileşmesi ile açıklanabilir. Bu sonuçlar, literatürde bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir [41], [45].

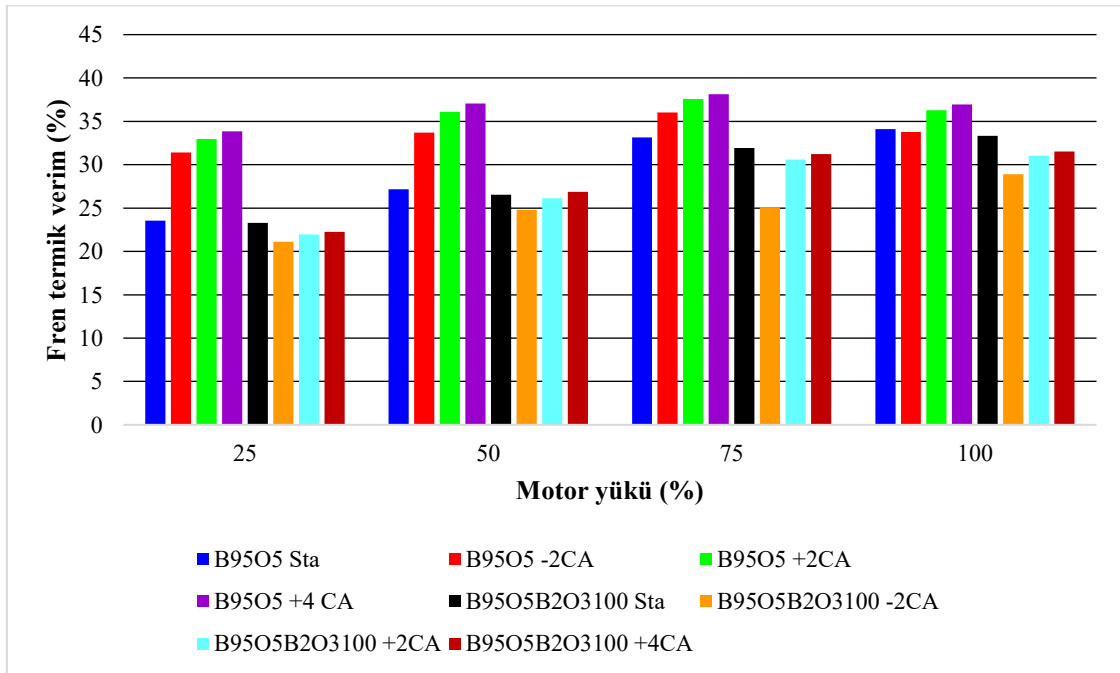
100 ppm nanopartikül ihtiva eden B95O5B₂O₃100 karışımında BTE değerlerinin, standart B95O5 karışımına kıyasla belirgin şekilde daha düşük kaldığı görülmüştür. %75 yük koşulunda standart B95O5 +4 CA %38,116 verim sunarken, 100 ppm B₂O₃ katkılı karışımında bu değer %31.221'e gerilemiştir. Nanopartikül katkısının termik verimde yarattığı bu düşüş, katkı maddesinin damlacık

penetrasyonunu kısıtlayarak eksik yanmaya sebebiyet vermesi ile açıklanabilir. Nanopartiküllerin yakıtın viskozitesini artırması nedeniyle buharlaşma hızını yavaşlatması, alevin silindir içi yayılımını negatif etkileyerek yakıttan elde edilen faydalı iş oranını, yani fren termik verimi düşürmektedir. Bu sonuçlar yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir [46], [47], [48]

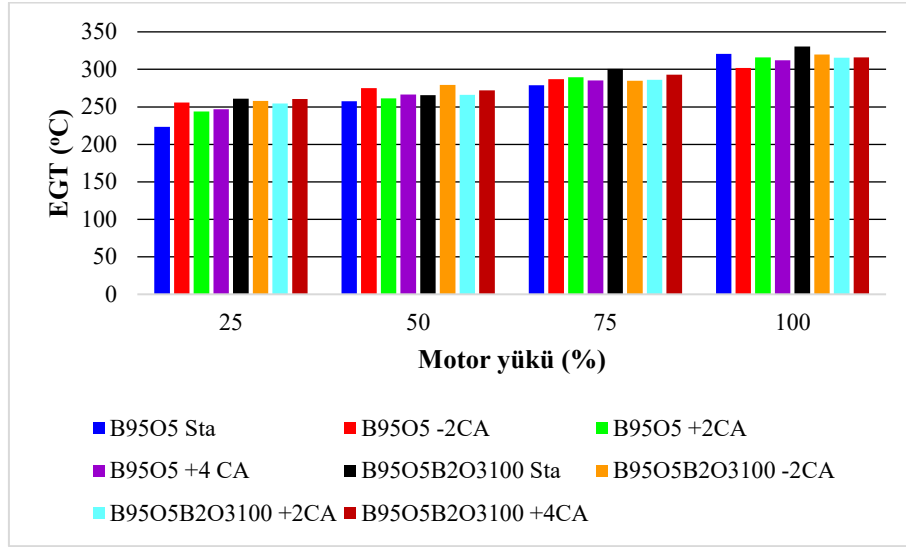
3.4 Egzoz gaz sıcaklığı

EGT silindir içerisinde yakıt enerjisinin açığa çıkma derecesiyle ilişkilidir. Şekil 6'da motor yüküne bağlı olarak değişen EGT değerleri gösterilmiştir. Motor yükü arttırıldıkça EGT'nin yükseldiği tespit edilmiştir. Minimum EGT değeri, %25 yükte B95O5 ile standart avansta 223.45 °C iken, maksimum EGT değeri, tam yük koşullarında B9O5B₂O₃100 ile standart avansta 330.29 °C olarak ölçülmüştür. Yük arttıkça silindir içerisine daha fazla yakıt enjekte edilmektedir. Dolayısıyla daha fazla yakıt daha fazla enerji salınımına ve EGT'de artışa neden olmaktadır. Püskürtme zamanlaması açısından EGT değişimine bakıldığında püskürtmenin -2 KMA'ya ileri alınması sonucunda arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın temel nedeni yanma işleminin egzoz zamanına doğru uzamasından kaynaklanmaktadır. Püskürtme zamanlaması artırıldığında ise EGT'nin genellikle azaldığı görülmüştür. Bu azalma, yanma olayının egzoz zamanına yakın değil, daha erken bir safhada sonuçlanmasından kaynaklanmaktadır.

B₂O₃ katkılı yakıt karışımı açısından bakıldığında, genellikle daha yüksek EGT değerlerinin olduğu saptanmıştır. Bu yükselmenin nedeni, B₂O₃ katkısının yanmayı geciktirmesi ve egzoz zamanına kadar uzamasıyla açıklanabilir [49].



Şekil 5. Fren termik verimin motor yüküne bağlı değişimi

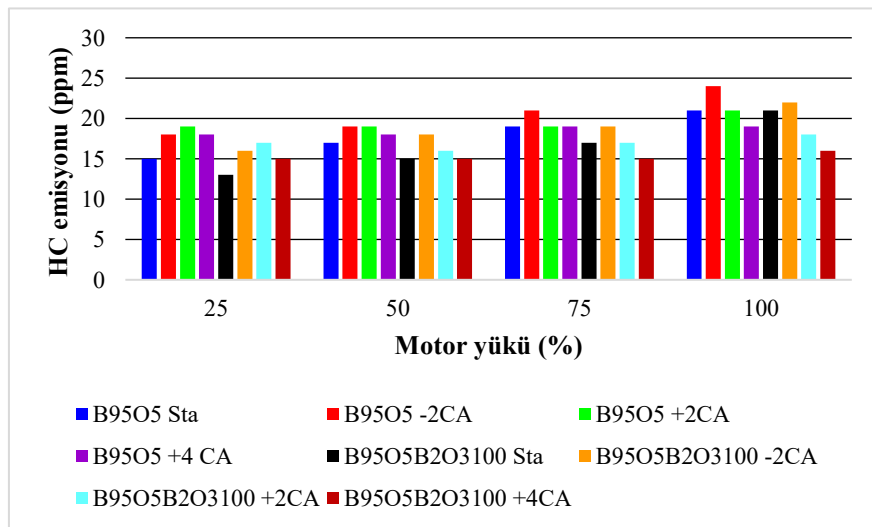


Şekil 6. Motor yüküne bağlı EGT'nin değişimi

3.5 HC emisyonu

HC emisyonları, yakıtın bir kısmının yanma işlemine dahil olmamasından kaynaklanmaktadır. Yakıtın yanma sürecine katılmamasının başlıca sebepleri arasında silindir içindeki boşluklar, sönüm tabakaları, yakıtın sıvı fazda bulunması ve çeşitli bölgelerdeki sızıntılar yer almaktadır. Şekil 7'de HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi verilmiştir. HC emisyonlarındaki minimum değer, %25 yükte, standart avans değerinde, B95O5B₂O₃100 ile 13 ppm iken, maksimum HC emisyonu ise, tam yükte, -2 KMA geç enjeksiyonda B95O5 ile 24 ppm olarak ölçülmüştür. Genel olarak motor yükünün artmasıyla HC emisyonlarında artış gözlenmektedir. Bunun nedeni, yük artışıyla birlikte silindire daha fazla yakıt gönderilmesidir. Püskürtmenin 2 KMA geciktirilmesi (-2 KMA) durumunda özellikle yüksek

yüklere doğru HC emisyonlarında belirgin bir artış meydana geldiği belirlenmiştir. Muhtemelen bu durum, geç püskürtme sonucunda yakıtın bir kısmının yanmadan egzozdan atılmasıyla ilişkilidir [50]. Püskürtme zamanlamasının erken yapılması (+2 ve +4 KMA) sonucunda ise, yakıtın buharlaşması ve yanma süreci için gerekli zamanın sağlanması sayesinde Daha düşük HC emisyonları meydana gelmiştir. Standart avansa kıyasla, %25 ve %50 yüklerde HC emisyonları artış gösterirken, %75 ve tam yük durumlarında azalma eğilimi göstermiştir. Yakıt karışımına B₂O₃ ilavesinin, katkısız yakıt karışımına kıyasla daha düşük HC emisyonu oluşturduğu gözlemlenmiştir. Nanopartiküllerin yakıtın termal iletkenliğini artırarak daha homojen bir karışım oluşturmalarının, HC emisyonlarındaki azalmanın temel nedeni olduğu düşünülmektedir. Bu sonuç literatür ile benzerlik göstermektedir [49], [51].



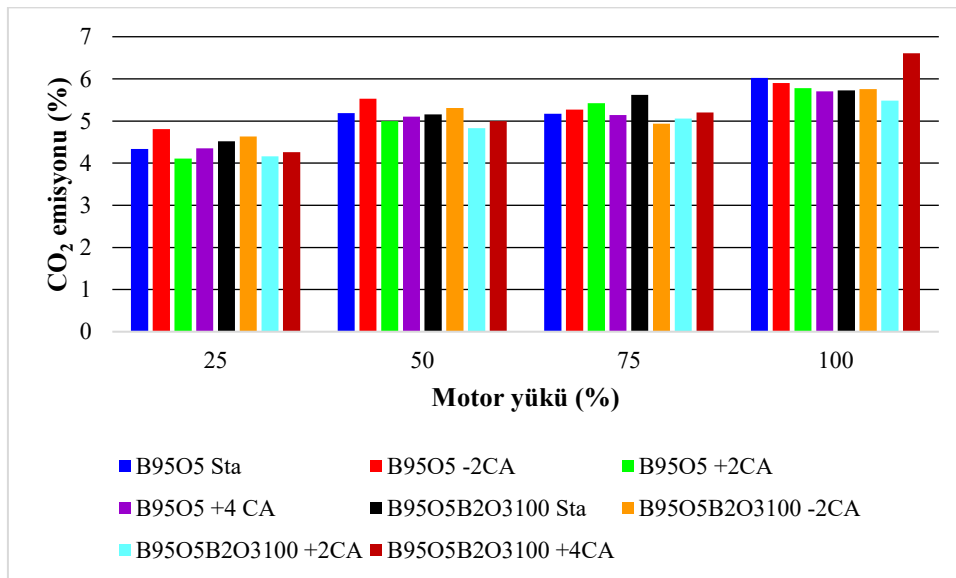
Şekil 7. HC emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi

3.6 CO₂ emisyonu

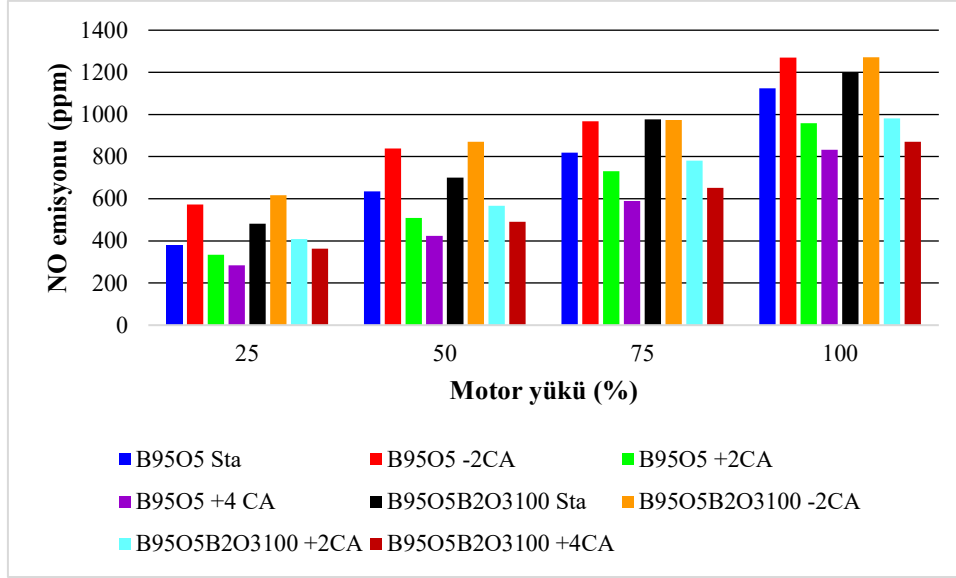
Egzoz emisyonları arasında yer alan CO₂, yakıtın tam yanmasının bir ölçüsü olarak kabul edilir [50]. Şekil 8’de motorun yük durumuna göre CO₂ emisyonlarındaki değişimi gösterilmiştir. CO₂ emisyonun en düşük değeri, %25 yükte B95O5 ile +2 KMA’da %4.11 olarak, en yüksek değeri ise, tam yükte, B95O5B₂O₃100 ile + 4KMA’da %6.61 olarak ölçülmüştür. Tüm test yakıtlarında, motor yükü arttıkça CO₂ emisyonlarında da artış gözlemlenmiştir. Çünkü silindir içerisine yük artışı ile birlikte daha fazla yakıt gönderilmektedir. Ayrıca, yük arttıkça silindir içi sıcaklıklarının artmasıyla birlikte yakıtın oksidasyonu da gerçekleşmektedir [52]. Püskürtmenin 2 KMA geç yapılması %25 ve %50 yük şartlarında CO₂ artışına sebep olmuştur. Muhtemelen bu durum, yanma işleminin egzoz zamanına sarkmasından kaynaklanmaktadır. Bu sonuç, termik verim açısından bir çelişki olarak değerlendirilebilir. Ancak, yanmanın egzoz zamanına doğru sarkması faydalı işi azalttığından dolayı termik verimle ters bir korelasyon oluşturabilir. +4 KMA’da standart püskürtme zamanlamasına kıyasla daha yüksek CO₂ değerleri ölçülmüştür. Bu artış, yüksek viskoziteli yakıtın buharlaşması, karışım oluşturmaları ve yanma için ihtiyaç duyulan sürenin sağlanması ile ilişkilidir. %25 ve %50 yük şartlarında B₂O₃ ilaveli yakıt karışımlarının, katkısız yakıt karışımına kıyasla daha yüksek CO₂ emisyonları oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ancak %75 ve tam yük şartları incelendiğinde CO₂ emisyonlarının azaldığı görülmüştür. Düşük yüklerde B₂O₃’ün yüksek yüzey alanı/hacim oranı sayesinde sağladığı termal iletkenlik, daha baskın olabilir. Daha yüksek yüklerde ise katkısız yakıtın silindir içi sıcaklıklarından daha fazla fayda sağladığı düşünülmektedir [53].

3.7 NO emisyonu

NO emisyonları silindir içerisindeki oksijen konsantrasyonuna ve sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir [50]. Şekil 9’da motor yüküne bağlı NO emisyonlarındaki değişim verilmiştir. Minimum NO emisyonu, %25 yük koşullarında, +4 KMA’da ve B95O5 test yakıtında yaklaşık olarak 284ppm iken, maksimum NO emisyonu ise sıcaklıkların en yüksek olduğu tam yük şartlarında, -2KMA’da, B95O5B₂O₃100 ile yaklaşık olarak 1272 ppm olarak ölçülmüştür. Motor yükü arttıkça, silindirdir içi sıcaklıkları artmakta ve dolayısıyla NO emisyonları yükselmektedir. Püskürtmenin 2 KMA geciktirilmesi, tüm yük şartlarında hem katkısız hem B₂O₃ katkılı test yakıtlarında NO emisyonunun artışıyla sonuçlanmıştır. NO emisyonundaki bu artışın CRDI sisteminin yüksek püskürtme basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Püskürtmenin +2 ve +4 KMA artırılması ise tüm yük şartlarında ve her iki yakıt türünde de NO emisyonunun azalmasıyla sonuçlanmıştır. CRDI motorun püskürtme zamanlaması, dizel yakıtına göre optimize edilmiş olduğu için standart avans şartlarında yüksek viskoziteye sahip yakıtlarda daha yüksek NO gözlenmektedir. Ancak bu tür yakıtların yanma sürecine hazır hale gelebilmesi için daha fazla zamana ihtiyacı vardır; bu nedenle püskürtme zamanlamasının ileri değerlerinde (+2 ve +4 KMA) daha düşük NO oluşmaktadır. Bu eğilim yapılan diğer çalışmalarla benzerlik göstermektedir [54]. Nanopartikül katkılı yakıtların, katkısız yakıt türüne kıyasla daha yüksek NO sergilediği belirlenmiştir. Bu durumun, silindir içi sıcaklıkların daha yüksek olmasından kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 8. CO₂ emisyonlarının motor yüküne bağlı değişimi



Şekil 9. Motor yüküne bağlı NO emisyonlarının değişimi

4 Sonuçlar

Bu deneysel çalışmada hacimsel olarak %95 biyodizel ve %5 n-oktanol içeren bir karışım yakıtı hazırlanmış ve bu yakıt referans yakıt olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, bu yakıt karışımına 100 ppm dozunda B_2O_3 nanopartikül ilave edilerek ikinci test yakıtı hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada bir CRDI dizel motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya başlamadan önce test düzeneğinin tüm ayar ve kalibrasyonları kontrol edilmiş ve motor çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Deneye öncelikle B95O5 referans yakıtı ile standart püskürtme zamanlamasında başlanmıştır. Motorun ECU'sunda bulunan özel bir yazılımdaki avans haritaları kullanılarak püskürtme zamanlamaları değiştirilmiş ve deneye bu şekilde devam edilmiştir. Aynı işlemler diğer test yakıtı için de tekrarlanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen ölçümler ve bu veriler yardımıyla hesaplanan motor performans parametreleri tartışılmıştır. Sonuçlar özetle aşağıdaki gibidir.

- Motor, nanopartikül katkılı yakıt ile çalıştırıldığında, referans yakıtı göre yaklaşık %2 daha yüksek motor momenti elde edilmiştir. Püskürtmenin standart avanstaki daha erken yapılması (+2 ve +4 KMA) motor momentini artırmıştır. +4 KMA daha erken püskürtme ile motor momenti B95O5'e göre ortalama %11.26 artmıştır.
- Nanopartikül katkılı yakıtı göre, FÖET'in B95O5 test yakıtında daha düşük değerler gösterdiği tespit edilmiştir. Standart püskürtme zamanlamasında ise daha yüksek FÖET değerleri ölçülmüştür. Püskürtme zamanlamasının +2 ve +4 KMA erkene alınması ile birlikte her iki test yakıtı için FÖET değerleri B95O5'e kıyasla sırasıyla %19.15 ve %21.85 azalmıştır.
- En yüksek fren termik verim referans yakıt olan B95O5 ile elde edilmiştir. Püskürtme zamanlamasının geciktirilmesi (-2 KMA), standart püskürtme zamanlamasına kıyasla %14.35 daha yüksek fren

termik verimi oluşturmuştur. Püskürtme zamanlamasının +2 KMA ve +4 KMA erkene alınması da B95O5'e kıyasla fren termik verimi sırasıyla %21.17 ve %23.72 artırmıştır.

- EGT motor yüküne bağlı olarak artmıştır. En yüksek EGT değerleri nanopartikül katkılı yakıt ile elde edilmiştir. B95O5B₂O₃100-Sta, B95O5'e kıyasla %7.15 daha yüksek EGT meydana gelmiştir. -2 KMA geç püskürtme zamanlamasında B95O5 ve B95O5B₂O₃100 yakıtlarındaki EGT artışı B95O5-Sta'ya göre sırasıyla %3.63, %5.72 artmıştır.
- B95O5B₂O₃100 ile çalışmada HC emisyonları, B95O5'e kıyasla %5.56 ile %15.28 oranlarında azalma sağlanmıştır. Her iki test yakıtı için püskürtme zamanlamasının erkene alınması, HC emisyonlarını artırmıştır. Düşük motor yüklerinde standart püskürtme zamanlamasında HC emisyonları düşük seviyelerde seyretmiştir. Özellikle yüksek yüklerde (%75 ve %100) ve +4 KMA'da HC emisyonları azalmıştır.
- CO₂ emisyonları motor yükü arttıkça yükselmiştir. CO₂'nin yüksek değerleri genellikle referans yakıtta ölçülmüştür. Püskürtmenin geç yapılması (-2 KMA) CO₂'yi artırmıştır. Püskürtme zamanlamasının artırılması (+2 ve +4 KMA) durumunda ise CO₂ değerleri, geç püskürtmeye göre daha düşük olmakla birlikte, standart püskürtme zamanlamasına kıyasla artış eğilimi göstermiştir. B95O5B₂O₃100 yakıtının +4 KMA'daki CO₂ emisyonu, B95O5'e göre %1.69 artmıştır. Aynı yakıt ile -2 KMA'da ise, B95O5'e kıyasla %5.74 azalmıştır.
- Motor yükü arttıkça NO emisyonları da artmıştır. Püskürtme zamanlamasının -2 KMA geciktirilmesi sonucunda NO emisyonları, B95O5 ve B95O5B₂O₃100 yakıtlarında sırasıyla %23.47 ve %26.35 artmıştır. Püskürtme zamanlamasının +2 ve +4 KMA ya artırılması hem katkısız hem de B₂O₃ katkılı yakıt için NO emisyonlarını düşürmüştür. Bu azalma referans

yakıt ile karşılaştırıldığında, B95O5 ile +4 KMA'da %27.97 iken, B95O5B₂O₃100 ile +4 KMA'da ise %19.63'tür. Referans yakıtı kıyasla B₂O₃ katkısının genel olarak NO emisyonlarını artırdığı sonucuna varılmıştır.

Sonuçlara göre, B₂O₃ nanopartikül ilavesinin motor momenti ve EGT değerlerinde iyileşme sağladığı; FÖET ve fren termik veriminde azalmaya neden olduğu; HC ve CO₂ emisyonlarında nispeten iyileşme görüldüğü; ancak NO emisyonlarının yükseldiği tespit edilmiştir. Püskürtme zamanlamasının ve +4 KMA'ya artırılması ile hem motor performansı hem de egzoz emisyonlarında her iki test yakıtı için olumlu sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Optimum püskürtme zamanlamasının her iki test yakıtı için +4 KMA erken enjeksiyon olduğu belirlenmiştir. Genel olarak, B95O5 ile çalışmada diğer test yakıtına göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Gelecekte yapılacak olan çalışmalarda B₂O₃ katkısının püskürtme basıncı, EGR gibi parametreler de değiştirilerek motor performansı, yanma ve egzoz emisyonlarına olan etkilerinin araştırılması önerilmektedir.

CRedit yazarlık katkı beyanı

Güven Demirtaş: Kavramsallaştırma, Veri düzenleme, Formal analiz, Fon sağlama, Araştırma, Yöntem, Proje yönetimi, Kaynak sağlama, Yazılım, Danışmanlık, Doğrulama, Görselleştirme, Yazma-ilk taslak, Yazma-inceleme ve düzenleme.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %7

Yazım sürecinde üretken yapay zekâ (YZ) ve YZ destekli teknolojilerin kullanımına ilişkin beyan

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında yazarlar, dil ve okunabilirliği iyileştirmek için "DeepSeek" adlı yapay zeka aracını kullanmıştır. Bu aracı kullandıktan sonra, yazarlar içeriği gerektiği gibi gözden geçirmiş ve düzenlemiş olup, yayın içeriğinden tamamen sorumludur.

Referanslar

- [1] A. Rahman Adib, M. Mizanur Rahman, T. Hassan, M. Ahmed, and A. Al Rifat, "Novel biofuel blends for diesel engines: Optimizing engine performance and emissions with *C. cohnii* microalgae biodiesel and algae-derived renewable diesel blends," *Energy Convers. Manag.*, vol. 23, no. August, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100688.
- [2] U. Demir, M. Keskin, S. Özer, and G. Coskun, "The effect of adding green synthesized and commercial silver nanoparticles to biodiesel on diesel engine performance and emissions," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 67, no. December 2024, 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.105797.
- [3] A. G. M. B. Mustayen, M. G. Rasul, X. Wang, M. Negnevitsky, and J. M. Hamilton, "Remote areas and islands power generation: A review on diesel engine performance and emission improvement techniques," *Energy Convers. Manag.*, vol. 260, no. April, p. 115614, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115614.
- [4] D. Tan *et al.*, "Utilization of renewable and sustainable diesel/methanol/n-butanol (DMB) blends for reducing the engine emissions in a diesel engine with different pre-injection strategies," *Energy*, vol. 269, no. January, p. 126785, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126785.
- [5] H. Söyler, "Boost pressure influence on combustion, emission characteristics, and performance of diesel engines with various fuel types," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 63, no. x, 2025, doi: 10.1016/j.jestch.2025.101983.
- [6] A. S. Mohammed, S. M. Atnaw, A. V. Ramaya, and G. Alemayehu, "A comprehensive review on the effect of ethers, antioxidants, and cetane improver additives on biodiesel-diesel blend in CI engine performance and emission characteristics," *J. Energy Inst.*, vol. 108, no. October 2022, p. 101227, 2023, doi: 10.1016/j.joei.2023.101227.
- [7] A. Karaoğlu and H. Söyler, "A New Approach for Improving Biodiesel Conversion Efficiency: A Stacking Ensemble Model Based on Linear Regression Approach with GAN-Enhanced," *Arab. J. Sci. Eng.*, pp. 19421–19441, 2025, doi: 10.1007/s13369-025-10227-5.
- [8] H. Söyler, M. K. Balki, and C. Sayin, "Determination of optimum parameters for esterification in high free fatty acid olive oil and ultrasound-assisted biodiesel production," *Biomass Convers. Biorefinery*, 2023, doi: 10.1007/s13399-021-01976-y.
- [9] A. A. El-Nagar, M. M. El-Sheekh, M. Elkelawy, and H. A. E. Bastawissi, "Enhancing diesel engine performance and emissions with innovative Ethanol-Surfactant blends in Biodiesel: Unveiling insights through fractional factorial design," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 73, no. December 2024, p. 104169, 2025, doi: 10.1016/j.seta.2024.104169.
- [10] B. Karpanai Selvan *et al.*, "Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine – Combustion engine performance and emission characteristics study," *Fuel*, vol. 311, no. August 2021, p. 122621, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122621.
- [11] J. Li, Y. Liang, S. Wang, S. Wu, W. Yang, and R. Liu, "Blending n-octanol with biodiesel for more efficient and cleaner combustion in diesel engines: A modeling study," *J. Clean. Prod.*, vol. 403, no. December 2022, p. 136877, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136877.
- [12] J. Ahn, K. Jang, J. Yang, B. Kim, and J. Kwon, "Impact of Using n-Octanol/Diesel Blends on the Performance and Emissions of a Direct-Injection Diesel Engine," *Energies*, vol. 17, no. 11, pp. 1–21, 2024, doi: 10.3390/en17112691.
- [13] V. Bansal and H. Raheman, "Engine performance and emission optimization of waste cooking oil/diesel/n-octanol blends via response surface methodology," *Int. J. Sustain. Energy*, vol. 45, no. 1, 2026, doi: 10.1080/14786451.2026.2614788.
- [14] Y. Çelebi, M. Cengiz, and H. Aydın, "A comprehensive utilization of pentanol and its blends as diesel engine fuel: A review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 193, no.

- December 2024, p. 107602, 2025, doi: [10.1016/j.biombioe.2025.107602](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107602).
- [15] G. Demirtaş and C. Sayın, "Effect of MWCNT added biodiesel, n-octanol blend on the performance, combustion and noise level of a single cylinder CRDI diesel engine," *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, vol. 40, no. 2, pp. 899–910, 2025, doi: [10.17341/gazimmfd.1369457](https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1369457).
- [16] K. S. Mehra and V. Goel, "Energy, exergy, environmental and sustainability assessment of renewable n-octanol biofuel on a compression ignition engine," *Biomass and Bioenergy*, vol. 201, no. June, p. 108116, 2025, doi: [10.1016/j.biombioe.2025.108116](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108116).
- [17] A. K. Singh, H. S. Pali, and M. M. Khan, "Experimental investigations of CI engine performance using ternary blends of n-butanol/biodiesel/diesel and n-octanol/biodiesel/diesel," *Arch. Thermodyn.*, vol. 45, no. 1, pp. 109–118, 2024, doi: [10.24425/ather.2024.150443](https://doi.org/10.24425/ather.2024.150443).
- [18] S. Koca, O. Zincirci, and F. Aktas, "Investigation of the Effect of TiO₂ Nanoparticles on Engine Performance and Emission Characteristics in Diesel Engines," *Int. J. Automot. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, pp. 242–251, 2024, doi: [10.30939/ijastech..1478380](https://doi.org/10.30939/ijastech..1478380).
- [19] V. Kumar and A. K. Choudhary, "Prediction of the Performance and emission characteristics of diesel engine using diphenylamine Antioxidant and ceria nanoparticle additives with biodiesel based on machine learning," *Energy*, vol. 301, no. November 2023, p. 131746, 2024, doi: [10.1016/j.energy.2024.131746](https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131746).
- [20] S. Khan, Y. Dewang, J. Raghuwanshi, A. Shrivastava, and V. Sharma, "Nanoparticles as fuel additive for improving performance and reducing exhaust emissions of internal combustion engines," *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, vol. 102, no. 2, pp. 319–341, 2022, doi: [10.1080/03067319.2020.1722810](https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1722810).
- [21] A. H. Hamzah, A. Akroot, H. A. Abdul Wahhab, R. M. Ghazal, A. E. J. Alhamd, and M. Bdaiwi, "Effects of nano-additives in developing alternative fuel strategy for CI engines: A critical review with a focus on the performance and emission characteristics," *Results Eng.*, vol. 22, no. April, p. 102248, 2024, doi: [10.1016/j.rineng.2024.102248](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102248).
- [22] S. G. Ghanati, B. Doğan, and M. K. Yeşilyurt, "The effects of the usage of silicon dioxide (SiO₂) and titanium dioxide (TiO₂) as nano-sized fuel additives on the engine characteristics in diesel engines: a review," *Biofuels*, vol. 15, no. 2, pp. 229–243, 2024, doi: [10.1080/17597269.2023.2221882](https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2221882).
- [23] G. Pullagura, J. Bikkavolu, S. Vadapalli, K. R. R. Chebattina, and V. Kuchipudi, "Comparative Study of TiO₂ Nanoparticles and Alcoholic Fuel Additives-Biodiesel-Diesel Blend for Combustion, Performance, and Emission Improvements," *Int. J. Heat Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1249–1257, 2022, doi: [10.18280/ijht.400517](https://doi.org/10.18280/ijht.400517).
- [24] M. K. A. Ali and M. M. Makrahy, "Experimental Investigation of the Effect of Al₂O₃ Nanomaterials as Fuel Additives on Emissions Characteristics of Diesel Engine," *Emiss. Control Sci. Technol.*, vol. 11, no. 1, 2025, doi: [10.1007/s40825-025-00262-x](https://doi.org/10.1007/s40825-025-00262-x).
- [25] H. Solmaz, A. Calam, E. Yılmaz, F. Şahin, S. M. S. Ardebili, and F. Aksoy, "Evaluation of MWCNT as fuel additive to diesel-biodiesel blend in a direct injection diesel engine," *Biofuels*, vol. 14, no. 2, pp. 147–156, 2023, doi: [10.1080/17597269.2022.2122154](https://doi.org/10.1080/17597269.2022.2122154).
- [26] M. S. Chandra Sekar, V. R. Ananthan, N. Baskaran, H. K. Suresh Kumar, and R. Arumugam, "Combustion, performance, and emission study on the octanol- neem biodiesel blends fueled diesel engine," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 46, no. 1, pp. 6167–6179, 2024, doi: [10.1080/15567036.2020.1741736](https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1741736).
- [27] Z. Aldarwish, M. H. Aghkhani, H. Sadrnia, and J. Zareei, "Investigation of the optimal timing and amount of fuel injection on the efficiency and emissions of a diesel engine through experimentation and numerical analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 19, p. e38790, 2024, doi: [10.1016/j.heliyon.2024.e38790](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38790).
- [28] H. Söyler, M. K. Balki, and C. Sayın, "The impact of injection timing and pressure on a CRDI engine's combustion characteristics," *J. Eng. Res.*, vol. 13, no. 2, pp. 854–864, 2025, doi: [10.1016/j.jer.2024.02.015](https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.015).
- [29] S. Ouchikh, M. S. Lounici, K. Loubar, L. Tarabet, and M. Tazerout, "Effect of diesel injection strategy on performance and emissions of CH₄/diesel dual-fuel engine," *Fuel*, vol. 308, no. August 2021, p. 121911, 2022, doi: [10.1016/j.fuel.2021.121911](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121911).
- [30] J. Li *et al.*, "Effects of different injection timing on the performance, combustion and emission characteristics of diesel/ethanol/n-butanol blended diesel engine based on multi-objective optimization theory," *Energy*, vol. 260, no. August, p. 125056, 2022, doi: [10.1016/j.energy.2022.125056](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125056).
- [31] S. Rajendran *et al.*, "Effect of injection timing on combustion, emission and performance characteristics of safflower methyl ester in CI engine," *Results Eng.*, vol. 20, no. September, p. 101599, 2023, doi: [10.1016/j.rineng.2023.101599](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101599).
- [32] M. Kumar, S. Bhowmik, and A. Paul, "Effect of pilot fuel injection pressure and injection timing on combustion, performance and emission of hydrogen-biodiesel dual fuel engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 68, pp. 29554–29567, 2022, doi: [10.1016/j.ijhydene.2022.06.260](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.260).
- [33] G. Jamuna Rani, Y. V. H. Rao, and B. Balakrishna, "Fuel injection timing impact on diesel engine performance, combustion and emission characteristics of nano additive biodiesel blends," *Int. J. Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 2078–2085, 2022, doi: [10.1080/01430750.2020.1725119](https://doi.org/10.1080/01430750.2020.1725119).
- [34] J. Li, J. Wei, H. Chen, Y. Xu, Y. Liu, and Q. Dai, "Study on the combustion and emission characteristics of a compression ignition engine using diesel/ethanol blend with carbon nanoadditives," *Renew. Energy*, vol. 246, no. March, p. 122941, 2025, doi: [10.1016/j.renene.2025.122941](https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.122941).
- [35] G. Demirtaş, M. K. Balki, and C. Sayın, "Effects of a

- CRDI Engine Running on Biodiesel, n-Octanol and Nanoparticle Blended Nanofuel on Performance, Emissions and Combustion,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, no. 2, pp. 2565–2580, 2024, doi: 10.1007/s13369-023-08266-x.
- [36] M. Celik and S. Uslu, “Experimental investigation of diesel engine running on diesel fuel supplemented with CeO₂ metal nanoparticles,” *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 45, no. 1, pp. 246–262, 2023, doi: 10.1080/15567036.2023.2168093.
- [37] P. Prakash and C. Dhanasekaran, “Influencing parameter optimisation of CRDI engine fuelled with lemongrass biodiesel blends,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 719–738, 2023, doi: 10.1080/01430750.2022.2142286.
- [38] S. Wasiu, S. Sulaiman, R. A. Aziz, and S. Azhar, “Effects of Different Injection Timings on the Performance and Emission Characteristics of the Direct-Injection Compressed Natural Gas Engine,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 666–672, 2018, [Online]. Available: <http://www.ripublication.com>.
- [39] N. Gültekin, H. E. Gülcan, and M. Ciniviz, “Investigation of the effects of hydrogen energy ratio and valve lift amount on performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression ignition engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 49, pp. 352–366, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.294.
- [40] A. F. Emma, S. Alangar, and A. K. Yadav, “Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 14, no. January, p. 100214, 2022, doi: 10.1016/j.ecmx.2022.100214.
- [41] K. Santhosh and G. N. Kumar, “Effect of injection time on combustion, performance and emission characteristics of direct injection CI engine fuelled with equi-volume of 1-hexanol/diesel blends,” *Energy*, vol. 214, p. 118984, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118984.
- [42] A. Çakmak and H. Özcan, “Investigation of the usability of boron oxide nanoparticles as diesel fuel additive,” *J. Boron*, vol. 7, no. 1, pp. 420–429, 2022, doi: 10.30728/boron.1021667.
- [43] S. Vadlamudi, S. K. Gugulothu, J. Kumar Panda, K. S. Chalapathi, and D. Mohanty, “An ideal investigation on conventional CRDI engine for optimum paradigm analysis of performance and exhaust emissions by using oxygenated and hydrogen fuel: An experimental green dual fuel approach,” *Fuel*, vol. 372, no. February, p. 132160, 2024, doi: 10.1016/j.fuel.2024.132160.
- [44] J. Ramachander, S. K. Gugulothu, G. R. K. Sastry, J. Kumar Panda, and M. S. Surya, “Performance and emission predictions of a CRDI engine powered with diesel fuel: A combined study of injection parameters variation and Box-Behnken response surface methodology based optimization,” *Fuel*, vol. 290, no. January, p. 120069, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2020.120069.
- [45] S. Mark and J. Jayaraman, “Experimental investigation on the effect of varied injection timings in a CRDI diesel engine driven by a biodiesel-diesel blend,” *Res. Eng. Struct. Mater.*, vol. 11, no. 5, pp. 2085–2095, 2025, doi: 10.17515/resm2024.433ma0904rs.
- [46] B. Prabakaran and A. Udhoji, “Experimental investigation into effects of addition of zinc oxide on performance, combustion and emission characteristics of diesel-biodiesel-ethanol blends in CI engine,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 4, pp. 3355–3362, 2016, doi: 10.1016/j.aej.2016.08.022.
- [47] N. Karisathan Sundararajan and A. R. B. Ammal, “Improvement studies on emission and combustion characteristics of DIC engine fuelled with colloidal emulsion of diesel distillate of plastic oil, TiO₂ nanoparticles and water,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 12, pp. 11595–11613, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-1380-0.
- [48] R. S. Gavhane *et al.*, “Influence of silica nano-additives on performance and emission characteristics of soybean biodiesel fuelled diesel engine,” *Energies*, vol. 14, no. 5, pp. 1–16, 2021, doi: 10.3390/en14051489.
- [49] S. Kumar and P. Dinesha, “Combined influence of fuel injection strategy and nanoparticle additives on the performance and emission characteristics of a biodiesel fueled engine,” *Cogent Eng.*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2021.1939515.
- [50] S. Ahmadipour, M. H. Aghkhani, and J. Zareei, “Investigation of injection timing and different fuels on diesel engine performance and emissions,” *J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 385–396, 2020, doi: 10.22061/jcarme.2019.4143.1497.
- [51] T. Sathish Kumar *et al.*, “Biofuel powered engine characteristics improvement through split injection parameter multivariate optimization with titanium based nano-particle additives,” *Fuel*, vol. 322, no. April, p. 124178, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124178.
- [52] H. A. Dhahad, M. A. Fayad, M. T. Chaichan, A. Abdulhady Jaber, and T. Megaritis, “Influence of fuel injection timing strategies on performance, combustion, emissions and particulate matter characteristics fueled with rapeseed methyl ester in modern diesel engine,” *Fuel*, vol. 306, no. X, p. 121589, 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.121589.
- [53] E. Murugesan, R. Dhairiyasamy, S. Dixit, and S. Singh, “The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 69, no. January, 2025, doi: 10.1016/j.csite.2025.106070.
- [54] N. T. Nghia, N. X. Khoa, W. Cho, and O. Lim, “A Study the Effect of Biodiesel Blends and the Injection Timing on Performance and Emissions of Common Rail Diesel Engines,” *Energies*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/en15010242.

