



Yanıt yüzey metodolojisi ile n-bütanol katkılı dizel karışımlarında Al_2O_3 nanoparçacık konsantrasyonunun optimizasyonu: Performans ve emisyon analizi

Optimization of Al_2O_3 nanoparticle concentration in n-butanol-enriched diesel blends via response surface methodology: Performance and emission analysis

Mehmet Ali Kallioğlu^{1,*}

¹ Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

Bu çalışmada, n-bütanol katkılı dizel karışımlarında Al_2O_3 nanoparçacık konsantrasyonunun etkileri yanıt yüzey metodolojisi (YYM) ile sistematik olarak incelenmiş ve optimize edilmiştir. Deneyler, motorun dört farklı yük koşulunda (0.3; 1.0; 2.0 ve 3.0 FOEB) ve nanoparçacık konsantrasyonlarında (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) gerçekleştirilmiştir. YYM'ye dayalı merkezi kompozit tasarım (MKT) kullanılarak istatistiksel deney tasarımı (DoE) uygulanmış ve performans ile emisyon çıktılarının optimizasyonu yapılmıştır. Sonuçlar, 75 ppm seviyesinde fren efektif veriminde (FEV) %18.75 artış ve fren özgül yakıt tüketiminde (FÖYT) %20.75 iyileşme sağlandığını göstermiştir. Ayrıca CO, HC ve duman emisyonlarında belirgin azalmalar elde edilirken, yüksek oksijen içeriği ve silindir içi sıcaklık nedeniyle NO_x emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. YYM analizleri, optimum nanoparçacık konsantrasyonunun dengeli koşullarda 85 ppm, performans odaklı durumda 80 ppm ve emisyon odaklı durumda 91 ppm olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, Al_2O_3 katkılı nanoyakıtların sürdürülebilir dizel motor uygulamaları için güçlü bir potansiyel sunduğunu göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Nanopartikül, Al_2O_3 , Dizel motor, Optimizasyon, n-bütanol

1 Giriş

Küresel enerji tüketiminin büyük bir bölümü, hava kirliliği, sera gazı salımı ve enerji güvenliği gibi ciddi sorunlara yol açan fosil yakıtlara dayanmaktadır [1]. Artan enerji talebi, tükenen fosil yakıt rezervleri ve iklim değişikliğinin giderek şiddetlenen etkileri, bu bağımlılığın sürdürülemez olduğunu açıkça ortaya koymaktadır [2]. Bu küresel zorluklara yanıt olarak, Avrupa Yeşil Anlaşması (2019) ve Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri gibi uluslararası protokoller, emisyonların azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması yönünde katı düzenlemeler getirmiştir [3,4].

Bu çerçevede, sürdürülebilir ve verimli alternatif yakıtların geliştirilmesi hem belirlenen çevresel hedeflere

Abstract

In this study, the effects of Al_2O_3 nanoparticle concentration in n-butanol-enriched diesel blends were systematically investigated and optimized using Response Surface Methodology (RSM). Experiments were conducted under four different engine load conditions (0.3, 1.0, 2.0, and 3.0 BMEP) and nanoparticle concentrations of 0, 25, 50, 75, and 100 ppm. A Central Composite Design (CCD) based on RSM was employed as a Design of Experiments (DoE) approach to optimize performance and emission parameters. The results showed that at 75 ppm dosage, brake thermal efficiency (BTE) increased by 18.75%, while brake specific fuel consumption (BSFC) improved by 20.75% compared to baseline fuel. Moreover, significant reductions were observed in CO, HC, and smoke emissions, whereas NO_x emissions increased due to higher oxygen content and elevated in-cylinder temperatures. RSM analysis revealed optimum nanoparticle concentrations of 85 ppm under balanced conditions, 80 ppm for performance-oriented scenarios, and 91 ppm for emission-oriented cases. These findings demonstrate the potential of Al_2O_3 -based nanofuels as a sustainable alternative for advanced diesel engine applications.

Keywords: Nanoparticle, Al_2O_3 , Diesel engine, Optimization, n-butanol

ulaşmak hem de gelecekteki enerji arz güvenliğini sağlamak için bir zorunluluk haline gelmiştir.

Günümüzde sanayi, tarım ve ulaşım sektörlerinin enerji gereksinimi, büyük ölçüde yüksek verimlilikleri ve ekonomik olmaları nedeniyle dizel motorlar tarafından karşılanmaktadır. Özellikle yüksek tork kapasiteleriyle ağır vasıta, tarım ve sanayi makinelerinde yaygınlaşan bu motorlar, teknik üstünlüklerine rağmen neden oldukları emisyon salımları sebebiyle ciddi çevresel eleştirilerle karşı karşıyadır. Bu çevresel sorunları gidermek amacıyla su-dizel emülsiyonları [5] ve katalitik konvertörler [6] gibi teknolojiler geliştirilmiş olsa da, bu yöntemlerin birçoğu motor verimliliğini ve yakıt ekonomisini olumsuz etkilemektedir. Verimlilik ve çevresel etki arasındaki bu ikilemi aşmak üzere son yıllardaki araştırmalar, yakıtlara alkol bazlı bileşenler, biyokütle kökenli yakıtlar ve

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmetali.kallioğlu@batman.edu.tr (M. A. Kallioğlu)

Geliş / Received: 10.10.2025 Kabul / Accepted: 03.12.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1800801

nanopartiküllerin eklenmesine odaklanmıştır. Bu katkılarla hem motor performansının artırılması hem de zararlı emisyonların eş zamanlı olarak azaltılması hedeflenmektedir. Bu nedenle söz konusu yaklaşımlar, yalnızca mevcut emisyon azaltma stratejilerine bir alternatif sunmakla kalmamakta, aynı zamanda EURO VI gibi sıkı standartların sınır değerlerine ulaşmada gelecek vadeden çözümler olarak öne çıkmaktadır [7, 8].

Dizel yakıtlarına metanol, etanol ve bütanol gibi alkollerin eklenmesindeki temel amaç, yakıtın oksijen içeriğini artırmaktır. Bu ilave oksijen, yanma verimini iyileştirerek karbon monoksit (CO) ve yanmamış hidrokarbonlar (HC) gibi eksik yanma ürünlerinin oluşumunu önemli ölçüde azaltır [9]. Bu alkoller arasında, özellikle dört karbonlu bir yapıya sahip olan bütanol ve izomerleri, diğer alkollere kıyasla sunduğu üstünlükler nedeniyle öne çıkmaktadır. İzomerleri içinde n-bütanol; metanol ve etanole göre daha yüksek enerji içeriği, dizel yakıtıyla daha yüksek uyumluluğu, daha az aşındırıcı etki ve suda daha düşük çözünürlük gibi özellikleriyle en umut vadeden alternatif olarak kabul edilmektedir [10]. Ayrıca n-bütanol, dizelin viskozitesini ve yoğunluğunu düşürerek yakıtın püskürtme ve atomizasyon karakteristiklerini de iyileştirir. Bu özellikler, daha düşük soğutma etkisi ve kendiliğinden tutuşmaya daha yatkın olmasıyla birleştiğinde, n-bütanolü dizel yakıt katkısı olarak öncelikli bir tercih haline getirmektedir [11].

İçten yanmalı motorlarda nanopartikül (NP) katkı maddelerinin kullanımı, motor performansını iyileştirme, yanma süreçlerini optimize etme ve egzoz emisyonlarını azaltma konularında önemli bir potansiyel sunmaktadır. Genellikle metal veya karbon bazlı olan bu malzemeler, 1–100 nm boyut aralığında ve kübik, prizmatik veya silindirik gibi çeşitli yüzey morfolojilerinde bulunabilen kendilerine özgü termofiziksel özelliklere sahiptir [12]. Sahip oldukları geniş yüzey alanı/hacim oranı, hızlı buharlaşma kabiliyetleri ve daha kısa tutuşma gecikmesi süreleri sayesinde, yakıtların yanma davranışlarını iyileştiren katalitik bir rol üstlenirler. Yapılan deneysel çalışmalar [13], özellikle metalik nanoparçacıkların yakıtta düşük konsantrasyonlarda eklenmesinin bu katalitik etkiyi güçlendirdiğini göstermektedir. Bu katkılar, yakıtın termofiziksel özelliklerini geliştirerek daha etkin bir atomizasyon ve homojen bir hava-yakıt karışımı sağlar; bu durum ise doğrudan yanma verimini artırarak motor performansını yükseltir ve zararlı egzoz emisyonlarını azaltır [14].

Alüminyum Oksit (Al_2O_3) nano malzemesinin yakıt katkısı dizel ve türevleri olan yakıtlarda kullanımı incelendiğinde; Reşitoğlu ve Keskin, yapılan çalışmada %3 ve %6 oranında propanol–dizel karışımlarının tek silindirik bir dizel motorda test edilmesiyle, CO emisyonlarında %25'e, duman emisyonlarında ise %12'ye varan azalmalar sağlandığını; azot oksit (NO_x) emisyonlarının büyük ölçüde değişmediğini ve özgül yakıt tüketiminde ise düşük ısı değer nedeniyle sınırlı artışlar görüldüğünü ortaya koymaktadır [15]. Chen vd., yapmış oldukları çalışmada, alkol/dizel karışımlarına (metanol, etanol, n-bütanol) Al_2O_3 (30nm) 25-100 ppm NP ilavesinin 4 zamanlı tek silindirik 11.32 kW gücündeki motorda yanma ve emisyon üzerinde etkisi

incelenmiştir. N-bütanol ilavesi düşük setan sayısı sebebiyle saf dizele kıyasla ateşleme gecikmesini uzatırken, 25 ppm ve 100 ppm Al_2O_3 NP katkısı ile bu gecikme düşük yükte % 2.2, yüksek yükte % 3.7 oranında kısalmıştır. Yanma süresi aynı koşullarda sırasıyla % 2.3 ve % 7.7 oranında azalmış, bu da daha hızlı ve tamamlanmış bir yanma sürecini işaret etmektedir. Emisyonlar açısından, CO miktarı NP katkısıyla düşük yükte %50, yüksek yükte % 26.6 azalmış; HC emisyonları ise 25 ppm ve 100 ppm katkılarında % 19.5–% 27.5 oranında düşüş göstermiştir. Duman opaklığı düşük yükte % 37.4 yüksek yükte yaklaşık %15 oranında azalmıştır. Buna karşın NO_x emisyonları artış eğilimi göstermiş, 25 ppm ve 100 ppm katkılarda düşük yükte % 6.9, yüksek yükte % 6.8 artış kaydedilmiştir. Genel olarak, alkol/dizel karışımları oksijen içeriği sayesinde CO ve dumanı azaltırken, Al_2O_3 NP'leri yanmayı hızlandırarak hem CO hem HC emisyonlarını düşürmüştü fakat NO_x 'u artırmıştır. Bu sonuçlar, NP katkılı alkol/dizel nano yakıtların motor verimliliğini iyileştirirken emisyon profillerini dengelemek için dikkatle optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır [16]. Al-Dawody ve Edam, deneysel çalışmada 25-50 ve 100 ppm dozajındaki nano Al_2O_3 (45nm) malzemesi bir B20 yakıtına eklenmiştir. Oluşturulan yakıt karışımları 3.7 kW nominal güce sahip tek silindirik 4 zamanlı, sabit, su soğutmalı Dizel motorunda performans ve emisyonların parametreleri test edilmiştir. Elde edilen bulgularda ilk duruma göre, FEV değerinde 23.1 % bir artış olmuş ve FÖYT değeri 14.86 % oranında düşmüştür. Emisyon parametreleri duman hariç ilk duruma göre azalmıştır. HC için % 13.25, CO için % 30.25 ve NO_x için 10.92 % olmaktadır. Duman emisyon ise ilk duruma göre %17 oranında artış göstermektedir. Genel olarak hem yakıt performansı için hem de emisyonlarda ideal dozajın 25 ppm olduğunu bildirmişleridir [17]. Kaushik vd. yapılan deneysel çalışmada, 25 ve 50 ppm dozajındaki nano Al_2O_3 (37nm) malzemesi katılan biyodizel karışımlarında belirgin iyileşmeler sağlamıştır. Saf dizelde 50 ppm katkı ile FEV % 4.5 artmış, FÖYT %11 azalmış, CO %12 ve HC %16 düşmüştür. B20 karışımında nanoparçacık katkısı FEV kaybını % 7'den % 2'ye indirerek % 5 iyileştirme sağlamış, CO ve HC emisyonlarını sırasıyla % 37 ve % 31 azaltmıştır. En yüksek etki B50A50'de görülmüş, CO %39, HC % 38 azalmıştır. Bu sonuçlar, Al_2O_3 katkısının performans kayıplarını telafi ederek emisyonlarda güçlü bir düşüş sağladığını göstermektedir [18]. Çakmak, yapılan deneysel çalışmada hacmen % 15 biyodizel karışımına 100 ppm Al_2O_3 (37nm) nanoparçacıkları ve 2000 ppm antioksidan (BHT, TBHQ, KEY) eklenerek 3.7 kW gücünde, tek silindirik, dört zamanlı, su soğutmalı Dizel motorunda performans ve emisyonlar test edilmiştir. Bu testlerde NP katkısı, Al_2O_3 tek başına kullanıldığında CO, HC ve is emisyonları sırasıyla % 1.61, % 70.21 ve % 13.85 azalırken NO_x % 30.36 artmıştır. Antioksidanlarla birlikte kullanımda NO_x % 5.17–7.63 civarında düşüş gözlenmesine karşın CO ve HC % 15–73 civarında artmıştır. yükselmiş; en etkili NO_x azaltıcı katkının TBHQ olduğu saptanmıştır [14]. Rajesh vd., Çalışmasında Hindistan ceviz yağ asidi kaynaklı biyodizelde 25-50 ve 100 ppm'de Al_2O_3 NP'leri test edildi. İdeal doz olan 100 ppm ilk duruma göre, FEV değeri % 6.5 artarken, HC ve CO

emisyonları sırasıyla % 29.3 ve % 34 düşüş gözlenmiştir. Bunlara karşın NO_x emisyonları daha yüksek yanma sıcaklıkları nedeniyle ilk duruma göre artış gözlenmiştir. 100 ppm Al_2O_3 katkı dozajı, silindiri içi basınç ve net ısı salınımı parametrelerinde saf dizel ile benzerlik göstermesi nedeniyle optimal seviye olarak önerilmektedir [19].

Önceki çalışmalar incelendiğinde nano Al_2O_3 katkılı durum saf dizel/biyodizel/n-bütanol göre, emisyon parametrelerinden CO ve HC değerlerinde mutlak bir düşüş söz konusudur. Buna karşın NO_x değerlerinde Zeldovich [20] mekanizması doğrultusunda artış gözlenmiştir. Motor performans verilerinden ise FEV de değerinde artış ve FÖYT değerlerinde iyileşme gözlenmiştir. Genel olarak, Al_2O_3 NP'leri, tutuşma gecikmesini kısaltarak ve mikro patlamalarla atomizasyonu iyileştirerek yanma verimini artırır, katalizör etkisiyle özgül yakıt tüketimini düşürür. Yüksek viskozite püskürtme değerleri yanmayı olumsuz etkileyebilse de genel olarak dizel türevli yakıtlarda verimlilik ve performansı artıran değerli bir katkıdır.

Bu çalışmada, literatüre dayalı olarak Al_2O_3 nano katkı malzemesi (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm dozajlarında) D80But20 (% 80 Eurodizel, % 20 n-bütanol) yakıt karışımına eklenmiştir. Elde edilen katkılı yakıt karışımı, literatüre dört temel açıdan katkı sunmaktadır: (i) Motor performansı ve yanma parametreleri (FEV ve FÖYT) tüm yakıtlar için incelenmiştir. (ii) Emisyon değerleri (CO, NO_x , HC ve duman) değerlendirilmiştir. (iii) YYM yöntemi ile farklı yakıt türleri için istatistiksel ANOVA analizi gerçekleştirilmiştir. (iv) Nano malzemelerin farklı dozajlarda eklenmesi beş farklı model koşulunda optimize edilmiş ve deneysel doğrulaması yapılmıştır. Böylece Al_2O_3 katkısının n-bütanol kullanımındaki etkileri kapsamlı şekilde ortaya konmuş ve tüm rasyonel bileşenler açıklanmıştır. Bu kazanımlar, gelecekte içten yanmalı motorlar üzerine yapılacak çalışmalara hem akademik hem de endüstriyel açıdan rehberlik etmesi bakımından önem taşımaktadır.

2 Materyal ve metod

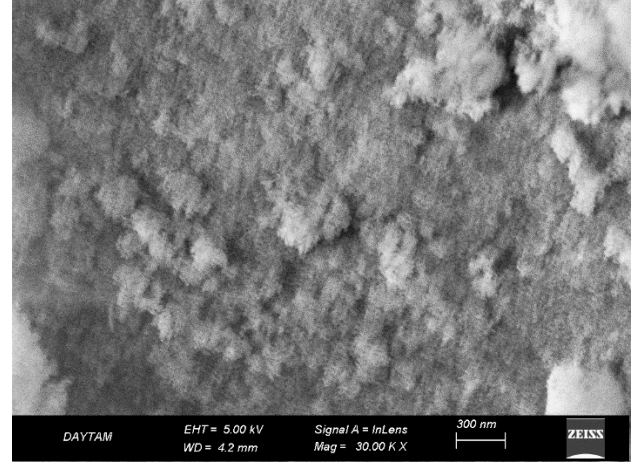
2.1 Nanopartikül özellikleri

Bu çalışmada kullanılan Al_2O_3 NP'leri, Ankara merkezli Nanografi Co. firmasından [21] temin edilmiştir. Malzeme seçiminde, literatürde sınırlı sayıda araştırmaya konu olan (≤ 18 nm) düşük yüzey alanlı, yüksek sertlik ve üstün boyutsal kararlılık gösteren NP'ler tercih edilmiştir. Bu partiküllerin temel özellikleri Tablo 1'de verilmiş, yüzey morfolojileri ise taramalı elektron mikroskopu (TEM) görüntüsü ile Şekil 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Al_2O_3 nanopartiküllerinin detayları

Tanım	Açıklama
Bileşik	Al_2O_3
Üretici	Nanografi Nanoteknoloji
Ürün numarası	NG04SO0107
CAS numarası	1344-28-1
Saflık (%)	99.5+
Görünüş	Beyaz
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	18
Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)	58
Özgül Isı Kapasitesi ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)	890
Yoğunluk (kg/m^3)	3900
Şekil	Küresel

Literatürde Al_2O_3 NP'leri, düşük maliyetleri, etkin katalitik yanma performansları ve zararlı emisyonların azaltılmasındaki yüksek verimlilikleri nedeniyle öne çıkmaktadır. Ayrıca bu NP'ler, yüksek reaktivite, geniş yüzey-hacim oranı, kimyasal kararlılık, ısıya direnç ve çevresel faktörlere (güneş ışığı ve nem) karşı hassasiyet gibi önemli özellikleriyle yakıt katkı malzemesi olarak tercih edilmektedir.



Şekil 1. Al_2O_3 nanopartikülleri için TEM görüntüsü

2.2 Yakıtların hazırlanma prosesi

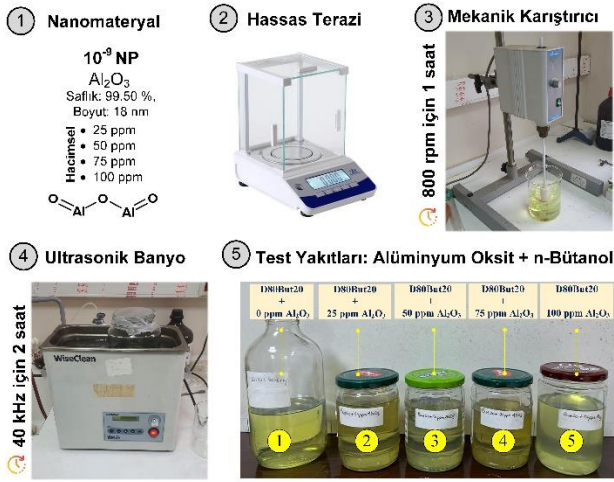
NP (Al_2O_3) katkılı n-bütanol yakıtlarının üretim süreci ve fiziksel görünüşleri Şekil 2'de sunulmaktadır. Bütanolün düşük setan sayısı, bütanol-dizel karışımlarının standart dizel yakıtına kıyasla daha uzun tutuşma gecikmesi göstermesine neden olmaktadır. Karışımdaki bütanol oranının artışı bu gecikmeyi daha da uzatmakta, ancak aynı zamanda yanma verimliliğini artırarak toplam yanma süresinin kısalmasına katkı sağlamaktadır. Literatürde genellikle hacmen % 20'ye kadar bütanol harmanlaması tavsiye edilmektedir [11], bu oranın aşılması ise motorun çalışmasında zorluklara yol açabilmektedir. Bu nedenle çalışmada, Eurodizel yakıtına % 20 n-bütanol ilave edilerek D80But20 karışımı hazırlanmıştır. Nanoyakıtların elde edilmesi için Al_2O_3 NP'leri bu karışım ile hacimsel olarak 25, 50, 75 ve 100 ppm dozajlarında ayrı ayrı karıştırılarak her biri bir litrelik test yakıtları üretilmiştir. Bu yakıt karışımlarına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 2'de verilmiştir [11].

Tablo 2. Yakıtların kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikleri	Eurodizel	Bütanol
Moleküler Formül	C_xH_y	$\text{C}_4\text{H}_9\text{-OH}$
Molekül ağırlığı-(kg/kmol)	190	74
O-(%wt)	0	21.59
Yoğunluk-(kg/m^3)	835	809
Kalorifik değer-(MJ/kg)	42.49	33.09
Viskozite-(mm^2/s)	2.72	2.22
Parlama Noktası-($^{\circ}\text{C}$)	45	35
Setan İndeksi	52	17

Yakıt karışımının kimyasal stabilitesini artırmak ve daha homojen bir süspansiyon elde etmek amacıyla, NP katkılı biyodizel ve n-bütanol karışımları belirli aşamalar izlenerek hazırlanmıştır. Bu kapsamda, eurodizel yakıtına % 20

oranında n-bütanol ilavesiyle oluşturulan D80But20 formülüne farklı dozajlarda Al₂O₃ NP'leri eklenmiş ve beş farklı yakıt türü elde edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, hacimsel oranlara göre 0 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm ve 100 ppm Al₂O₃ içerecek şekilde düzenlenmiştir. Hazırlama süreci üç basamaktan oluşmaktadır. İlk olarak, Al₂O₃ NPLeri Shimadzu hassas terazide ± 0.001 g doğrulukla tartılmıştır. İkinci aşamada, partiküllerin aglomerasyonunu ve topaklanmasını önlemek için mekanik karıştırıcıda 800 rpm hızında 1 saat boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Son aşamada ise homojen dağılımı sağlamak amacıyla, Wisd WiseClean Ultrasonic Bath cihazında 40 kHz frekansta 2 saat boyunca ultrasonik homojenizasyon yapılmıştır. Bu işlem basamakları Şekil 2'de şematik olarak sunulmaktadır.



Şekil 2. Alüminyum oksit takviyeli n-bütanol/dizel karışımlarının hazırlanma prosedürü

2.3 Deneyssel yöntem

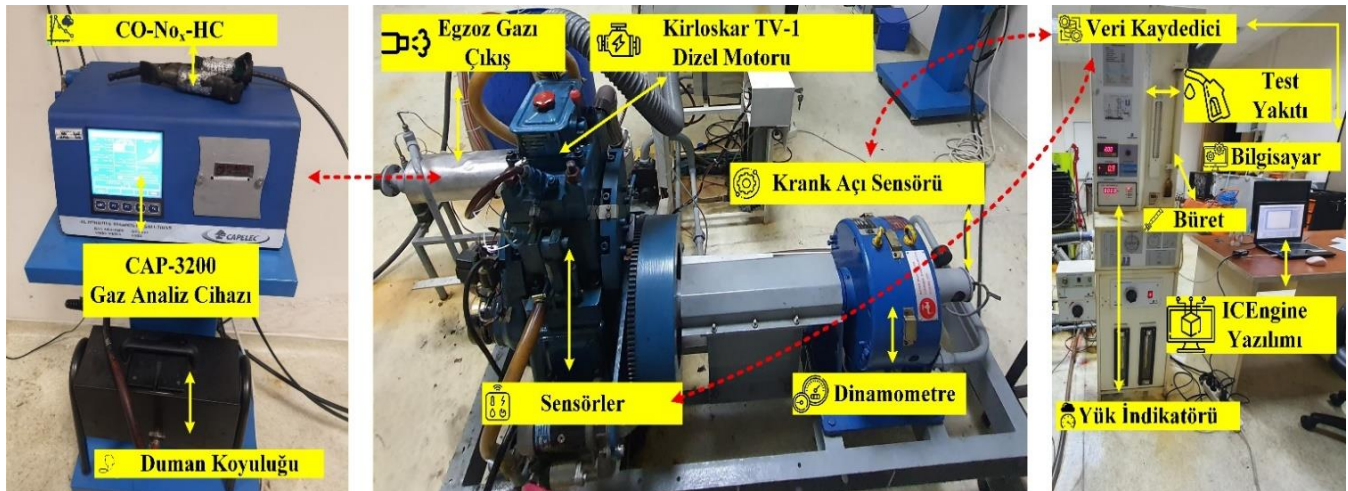
Hazırlanan yakıt karışımlarının motor performansı, egzoz emisyonları ve yanma karakteristiklerinin belirlenmesine yönelik deneyssel çalışmalar, Batman Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarı (Batman, Türkiye) bünyesinde yer alan motor test düzeneğinde yürütülmüştür. Deneylerde, Kirloskar Oil Engines Ltd. tarafından üretilmiş tek silindirli, dört zamanlı,

değişken sıkıştırma oranına sahip, su soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motor kullanılmıştır. Motorun temel teknik özellikleri Tablo 3'te sunulmaktadır.

Yanma odası basıncı ve krank açısının ölçümü için piezoelektrik basınç sensörleri ve döner kodlayıcılar kullanılmış, her yakıt için 10 çevrimlik veri kaydı alınmıştır. Motor, sabit 1500 d/dk hızda farklı yük koşullarında çalıştırılmıştır. Hava akışı, dengeleme tankı ile emme manifoldu arasındaki basınç farkından; yakıt tüketimi ise akış hattındaki fark basıncından hesaplanmıştır. Tüm veriler bilgisayar ortamında kaydedilmiş ve IEngineSoft v9.0 yazılımı ile analiz edilmiştir. Ölçülen parametreler arasında silindir içi basınç, sıcaklıklar, akış hızları, motor yükü ve devir sayısı yer almaktadır. Referans yakıt olarak Eurodiesel test edilmiş, ardından nanoparçacık katkılı yakıtlarla aynı prosedür uygulanmıştır. Emisyon değerleri CAPAPEC CAP 3200 analizörü ile ölçülerek NO_x, HC, CO ve Duman düzeyleri değerlendirilmiştir. Her deneyde, yakıt değişimlerinde filtreler temizlenmiş ve motorun oda sıcaklığına dönmesi beklenmiştir. Her deney üç kez tekrarlanmış, ortalama değerler analizlerde kullanılmıştır. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3'te verilmiştir. [22].

Tablo 3. Deneyssel dizel motorun özellikleri

Açıklama	Spesifikasyon
Motor tedarikçisi/Modeli	Apex Innovations / Kirloskar-TV1
Ateşleme	Sıkıştırma-ateşleme
Enjeksiyon	Doğrudan enjeksiyon
Çap (mm) x Strok (mm)	87.5 x 110
Silindir hacmi (cc)	661.45
Sıkıştırma Oranı	17.5:1
Anma gücü (kW)-devir (rpm)	5.2 @1500
Dinamometre/Modeli	Eddy current type/ SAJ test plant pvt. Ltd
Biyel kolu uzunluğu (mm)	185
Soğutma Tipi	Su soğutmalı
Emiş sistemi	Atmosferik beslemeli
Yakıt enjeksiyon zamanlaması (°KA)	ÜÖN'den önce 0-23° krank mili açısı (nominal)
Enjeksiyon memesi açılma basıncı (bar)	210
Enjektör memesi delik sayısı ve çapı	4/ 0.25 mm
Yakıt tipi ve kapasitesi	Dizel- 15 L



Şekil 3. Deney düzeneğinin şematik ve deneyssel görünümü

2.4 Test metodolojisi

Motorun farklı yük koşullarındaki performans ve verimliliğini karşılaştırmak amacıyla fren ortalama etkin basınç (FOEB) parametresi temel alınmıştır. FOEB, güç stroku sırasında yapılan toplam işin motorun deplasman hacmine bölünmesiyle elde edilen karakteristik bir büyüklük olup, motorun gerçek yük altındaki performansını değerlendirmede en güvenilir göstergelerden biridir. Bu parametre hem yakıt türlerinin hem de nanoparçacık katkılarının motor performansına etkilerini nesnel biçimde ortaya koymak amacıyla tercih edilmiştir.

Ana deneyler süresince laboratuvar koşulları sabit tutulmaya özen gösterilmiş; ortam sıcaklığı 24 ± 3 °C, bağıl nem ise 42 ± 4 olarak ölçülmüştür. Çalışmalar, motorun maksimum fren tork hızına karşılık gelen 1500 d/dk sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde doğrudan bağlı bir eddy current dinamometresi kullanılmış ve farklı yük seviyeleri esas alınarak dört ayrı test senaryosu uygulanmıştır: boşta (0.3 bar FOEB), düşük yük (1 bar FOEB), orta yük (2 bar FOEB) ve yüksek yük (3 bar FOEB). Bu yaklaşım, motorun hem düşük hem de yüksek yüklerdeki performansını karşılaştırmalı olarak inceleme imkânı sağlamıştır. Silindir içi basınç ve krank açısı ölçümleri, krank milinin 1° – 720° aralığındaki her konumunda kaydedilmiş ve elde edilen veriler, ardışık 10 çevrimin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Böylece ölçüm belirsizlikleri minimize edilmiş ve sonuçların tekrarlanabilirliği artırılmıştır. Motor performansının analizinde yalnızca basınç-zaman eğrileri değil, aynı zamanda yanma sürecinin karakteristikleri de dikkate alınmıştır.

Performans değerlendirmelerinde üç temel parametre esas alınmıştır: fren ortalama etkin basınç (FOEB) motorun yük altındaki çalışma karakteristiğini belirlemek amacıyla [Denklem \(1\)](#) ile ifade edilmiştir; fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) yakıtın enerjiye dönüştürülme verimliliğini değerlendirmek için [Denklem \(2\)](#) ile tanımlanmıştır; fren termal verimliliği (FEV) ise yakıtın yanma sürecinde faydalı işe dönüşüm oranını analiz etmek amacıyla [Denklem \(3\)](#) ile hesaplanmıştır [8].

$$FOEB = \frac{P_b \cdot n_r}{V_d \cdot \omega} 10^3 \quad (1)$$

$$FÖYT = \frac{\dot{m}_f}{P_b} 10^3 \quad (2)$$

$$FEV = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} 3600 \quad (3)$$

Burada n_r , bir tam çevrim için krank devir sayısı, V_d silindirlerin yer değiştirme hacmidir. $\dot{m}_f$ (kg/h) yakıt kütle akış hızı, Q_{LHV} (kJ/kg) ise yakıtın alt ısı değeri [23].

2.5 Yanıt yüzey metodolojisinin uygulanması

Bu bölümde, performans ve emisyon yanıtlarının modellenmesi amacıyla Yanıt Yüzey Metodolojisinin (YYM) uygulanma adımları ayrıntılı olarak sunulmuştur.

YYM istatistiksel ve matematiksel tekniklerden yararlanarak bağımsız değişkenlerin belirli yanıtlar üzerindeki etkilerini analiz eden ve modelleyen bir optimizasyon yöntemidir. Bu yaklaşım, süreç değişkenleri arasındaki etkileşimleri anlamak, optimum koşulları belirlemek ve sistem performansını iyileştirmek amacıyla yaygın biçimde kullanılmaktadır. YYM; deney tasarımı, model oluşturma, modelin doğruluğunun değerlendirilmesi ve optimum koşulların belirlenmesi aşamalarını kapsamaktadır. Bu çalışmada, bağımsız değişkenler olarak D80But20 yakıt karışımlarına eklenen NP konsantrasyonu, FOEB ve emisyon parametreleri seçilmiştir [24]. Deneyel verilerin analizinde, faktörlerin farklı düzeylerde tanımlandığı durumlara uyum sağlayabilen, aynı zamanda etkileşim etkilerini de dikkate alarak güvenilir sonuçlar üreten iki faktörlü asimetrik tam faktöriyel tasarım yaklaşımı benimsenmiştir. Bu yöntem, hem bağımsız değişkenlerin tekil etkilerini hem de etkileşimlerini gözlemlene olanağı sunarak sistematik bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Çalışmada, dört farklı FOEB düzeyi ile beş farklı NP konsantrasyonu dikkate alınmış ve bu değişkenlerin kombinasyonlarından 20 deney seti (4×5 matris) oluşturulmuştur. Bu tasarım, sürecin değişken parametreler altında nasıl davrandığını anlamak açısından güçlü bir istatistiksel altyapı sunmuş ve elde edilen sonuçların hem genellenebilirliğini hem de güvenilirliğini artırmıştır. Verileri analiz etmek için 2. Dereceden denklem en küçük kareler yöntemi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen denklemlerdeki yanıt ile bağımsız faktörler arasında uygun bir ilişkinin modellenmesi için 2. Dereceden [Denklem \(4\)](#) kullanılmıştır.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (4)$$

Burada Y tahmin edilen çıktı tepkisini, n faktör sayısını, β_0 sabit, β_i , β_{ii} ve β_{ij} sırasıyla doğrusal, kuadratik ve etkileşim katsayılarını, x_i ve x_j bağımsız faktörleri ve ε hatayı temsil etmektedir.

Tablo 4. YYM tasarımı, faktörleri ve seviyeleri

Model	İki Faktör ve Beş Yanıt
Yöntem	Merkezi Kompozit Tam Faktöriyel Tasarım
Sürekli Değişkenler	NP dozajı & FOEB
Düzye	NP (ppm) 0; 25; 50; 75; 100 FOEB (bar) 0.3; 1.0; 2.0; 3.0; -
Yanıtlar	FEV, FÖYT, CO, No _x , HC, ve Duman
Terim	Tam Kuadratik Model
Güven seviyesi	% 95

Optimizasyon çalışmasında giriş faktörleri olarak motor yükü ve Al₂O₃ nanoparçacık konsantrasyonu seçilmiş, seviyeleri [Tablo 4](#)'te verilmiştir. Deney tasarımında tüm değişken kombinasyonlarını içeren merkezi kompozit tam faktöriyel tasarım (CCD) kullanılmış ve analizler MINITAB yazılımı ile yürütülmüştür. Çıkış yanıtlarının değerlendirilmesi için ANOVA uygulanmış, böylece nanoparçacık konsantrasyonunun motor performansı ve

emisyonlar üzerindeki etkileri istatistiksel olarak ortaya konmuştur.

2.6 Belirsizlik analizi

DeneySEL verilerin güvenilirliğini değerlendirmek için Holman'ın belirsizlik analizi yöntemi uygulanmıştır [25]. Hata yayılımı, ölçülen büyüklük ve ona etki eden bağımsız değişkenler esas alınarak köklerin kareleri toplamı (RSS) yöntemiyle tanımlanan Denklem (5) kullanılarak hesaplanmıştır. Ölçüm cihazlarının hassasiyeti, kalibrasyon doğruluğu ve çevresel koşullar, belirsizliğin başlıca kaynaklarını oluşturmıştır. Ayrıntılı belirsizlik değerleri Tablo 5'te sunulmuştur.

$$U_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Tablo 5. Test cihazının ve hesaplanan parametrelerin aralığı, doğruluğu ve belirsizliği

Parametre	Ölçüm sınırları	Doğruluk	Belirsizlik (%)
Fren Gücü-kW	0-3.5	±0.3	±0.84
Motor devri-rpm	0-1500	±0.1	±0.07
Motor yükü-kg	0-12	±0.1	±0.83
KütleSEL yakıt tüketimi- kg/s	-	-	±1.55
Büret-cc	-	±0.1	±1.0
Dijital saat-s	-	±0.2	±0.3
Fren efektif verim-%	-	-	±1.76
Fren özgül yakıt tüketimi- kg/kWh	-	-	±1.76
CO-%	0-10%	±0.01 %	±0.84
HC-ppm	0-20.000	±1.0	±0.83
NO _x ppm	0-5000	±1.0	±0.83
Duman- m ⁻¹	0-99.9	±0.01	±0.83

Tablo 5'te gösterildiği gibi, Denklem (5) kullanılarak hesaplanan FEV, FÖYT, CO, HC, NO_x ve duman parametrelerine ait bileşik belirsizlik ±% 2.99 olarak belirlenmiştir. Bu değer, mühendislik uygulamalarında genel kabul gören %5'lik hata sınırının oldukça altında olup, deneySEL sistemin ölçüm performansının yüksek düzeyde doğruluk ve güvenilirliğe sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 YYM tabanlı istatistiksel analiz

Bu çalışmada elde edilen deneySEL sonuçlar, Tablo 6'da sunulduğu üzere toplam 20 farklı deney koşulunu içermektedir. Modelleme sürecinde YYM esas alınmış ve çıkış parametreleri olarak motor performansını ve emisyon karakteristiklerini yansıtan FEV (%), FÖYT (kg/kWh), CO (%), NO_x (ppm), HC (ppm) ve Duman (m⁻¹) değerleri dikkate alınmıştır. Giriş parametreleri ise motorun yük ve katkı değişimlerini temsil eden NP dozajı (ppm) ve FOEB (bar) olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerin seçimi, motor verimliliği ile emisyon davranışlarının kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

DeneySEL veriler, modelin hem performans tahminlerindeki doğruluğunu hem de emisyon tahminlerindeki güvenilirliğini test etmek amacıyla ayrıntılı şekilde analiz edilmiştir. Böylece modelin farklı koşullarda motor davranışlarını öngörme kapasitesi ortaya konmuş ve geliştirilen yaklaşımın geçerliliği varyans analizi (ANOVA)

ile desteklenmiştir. ANOVA sonuçlarında elde edilen p değerleri, her bir bağımsız değişkenin yanıt değişkeni üzerindeki etkisinin istatistiksel anlamlılığını gösterir. Genel kabul gören bir yaklaşımda, p < 0.05 değeri, ilgili değişkenin % 95 güven düzeyinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu, yani modelde dikkate alınması gerektiğini ifade eder. Aksi durumda ise (p > 0.05) değişkenin modelde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin bulunmamaktadır.

Tablo 6. YYM analizinde kullanılan deneySEL girdi faktörleri

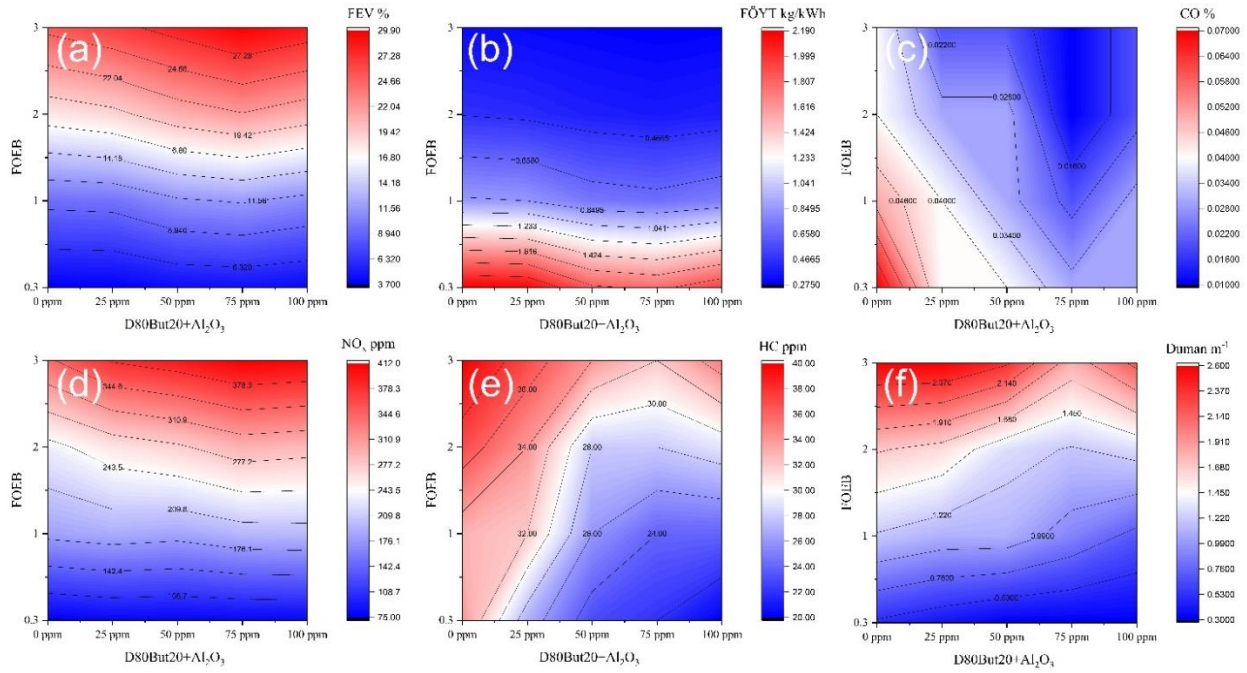
No	NP (ppm)	FOEB (bar)	FEV (%)	FÖYT (kg/kWh)	CO (%)	NO _x (ppm)	HC (ppm)	Duman (m ⁻¹)
1	0	0.3	3.77	2.19	0.07	75	34	0.5
2	0	1	9.52	0.87	0.05	183	33	1.2
3	0	2	17.91	0.46	0.04	234	37	1.7
4	0	3	25.26	0.33	0.04	340	40	2.6
5	25	0.3	3.82	2.16	0.04	80	27	0.4
6	25	1	9.71	0.85	0.04	190	32	1.1
7	25	2	18.82	0.44	0.03	260	34	1.6
8	25	3	26.56	0.31	0.02	381	37	2.6
9	50	0.3	4.50	1.84	0.04	79	23	0.3
10	50	1	11.27	0.73	0.03	185	26	1.1
11	50	2	20.78	0.40	0.03	273	28	1.3
12	50	3	28.23	0.29	0.02	394	34	2.4
13	75	0.3	4.67	1.77	0.03	80	22	0.3
14	75	1	11.76	0.70	0.02	197	24	0.9
15	75	2	21.91	0.38	0.01	294	28	1.2
16	75	3	29.87	0.28	0.01	412	32	1.8
17	100	0.3	4.28	1.93	0.03	81	20	0.3
18	100	1	10.86	0.76	0.03	199	24	0.7
19	100	2	20.60	0.40	0.02	288	29	1.3
20	100	3	28.68	0.29	0.02	407	35	2.2

Tablo 7. ANOVA sonuçları

Source	DF	FEV	FÖYT	CO	NO _x	HC	Duman
R ² (%)	-	99.71	95.95	89.77	98.55	96.85	95.88
Model	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Lineer	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NP (ppm)	1	0.000	0.169	0.000	0.003	0.000	0.001
FOEB (bar)	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Kuadratik	2	0.002	0.000	0.003	0.210	0.000	0.656
NP (ppm)*NP (ppm)	1	0.004	0.400	0.001	0.266	0.000	0.514
FOEB(bar)*FOEB (bar)	1	0.016	0.000	0.203	0.164	0.497	0.527
2-değişkenli etkileşim	1	0.004	0.297	0.144	0.029	0.004	0.228

DeneySEL çalışmadan elde edilen ANOVA sonuçları Tablo 7'de ve Şekil 4'te gösterilmektedir, modelin tüm performans (FEV, FÖYT) ve emisyon (CO, NO_x, HC, duman) çıktı parametreleri yüksek derecede anlamlıdır (p < 0.001). Özellikle FOEB, tüm parametreler üzerinde en düşük p-değerleri ile en baskın bağımsız değişken konumundadır; bu durum motor yükünün hem termodinamik performans çıktıları (özgül yakıt tüketimi ve fren termal verim) hem de yanma kaynaklı emisyon karakteristikleri üzerinde belirleyici bir rol oynadığını göstermektedir.

NP konsantrasyonu, lineer etkiler kapsamında FEV, CO, NO_x, HC ve Duman üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunurken, FÖYT üzerinde ise etkisi p = 0.169 ile anlamsızdır. Square terimlerine bakıldığında, NP² etkisinin FEV, CO ve HC üzerinde anlamlı olması, nanoparçacık katkısının belirli eşik değerlerinden sonra motor performansı ve emisyon karakteristiklerinde doğrusal olmayan (non-linear) eğilimler yarattığını işaret etmektedir. Buna karşılık FOEB² terimi özellikle FÖYT üzerinde güçlü bir etki göstermiştir (p = 0.000), bu da artan yük koşullarında yakıt-hava oranının değişimi ile birlikte verimlilik üzerinde ikinci



Şekil 4. Nanopartikül miktarı ve FOEB'e bağlı oluşturulan modellerin YYM' göre değişimi; (a) FEV, (b) FÖYT, (c) CO, (d) NO_x, (e) HC, (f) Duman

dereceden bir etkinin oluştuğunu kanıtlamaktadır. 2-değişkenli etkileşim terimleri değerlendirildiğinde, NP × FOEB interaksyonu özellikle FEV ($p=0.004$), NO_x ($p=0.029$) ve HC ($p=0.004$) üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Bu durum, nanoparçacık katkısının yanma sıcaklığı ve oksidasyon kinetiği üzerindeki etkisinin motor yükü ile birlikte değiştiğini ve özellikle NO_x oluşum mekanizmasında belirleyici olan alev sıcaklıkları ile HC'nin oksidasyon verimliliğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Diğer çıktı parametrelerinde NP katkısı ile motor yükü arasında sinerjik bir etkileşim olmadığını göstermektedir.

Tüm bu bileşenler doğrultusunda, ideal NP katkı seviyesi ile FOEB parametrelerinin birlikte ele alınması, yanma süreçlerinin daha gerçekçi modellenmesini ve emisyonların daha etkin kontrolünü mümkün kılarak hem sistem performansını hem de emisyon azaltımını hedefleyen bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır.

3.2 Optimizasyon ve deneysel geçerleme

Deneyisel verilerin optimizasyonu aşamasında, yanıt değişkenlerinin farklı önceliklere göre değerlendirilmesini sağlamak amacıyla beş ayrı model tipi tanımlanmıştır. İlgili model türleri ve kriterleri Tablo 8'de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Model I, tüm yanıt değişkenlerine eşit ağırlık atayarak tarafsız bir yaklaşım sergilemekte ve herhangi bir parametreye öncelik tanımlamamaktadır. Model II, yalnızca emisyon değerlerini dikkate almakta ve çevresel sürdürülebilirliği temel hedef olarak benimsemektedir. Model III, motor performans metriklerine odaklanmakta ve emisyon kriterlerini dışlayarak güç üretimi ile operasyonel verimliliği optimize etmeyi amaçlamaktadır. Model IV, tüm yanıt değişkenlerini kapsamakla birlikte emisyon

parametrelerine nazaran performans değerlerine daha yüksek ağırlıklık tanımlayarak dengeli ancak performans odaklı bir optimizasyon stratejisi geliştirmektedir. Buna karşılık Model V, tüm yanıt değişkenlerini kapsamlı biçimde ele almakta, ancak performans değerlerine karşın emisyon kriterlerine daha yüksek ağırlık vererek çevresel etkilerin en aza indirilmesine yönelik bir optimizasyon yaklaşımı sunmaktadır.

Tablo 8. Model optimizasyonu için kriterler

Giriş		NP {0, 25, 50, 75, 100} - FOEB {0.3, 1, 2, 3}									
Katsayı	Hedef	Model I		Model II		Model III		Model IV		Model V	
FEV (%)	Max.	✓	*	-	-	✓	*	✓	***	✓	*
FÖYT (kg/kWh)	Min.	✓	*	-	-	✓	*	✓	***	✓	*
CO (%)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
No _x (ppm)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
HC (ppm)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***
Duman (m ⁻¹)	Min.	✓	*	✓	*	-	-	✓	*	✓	***

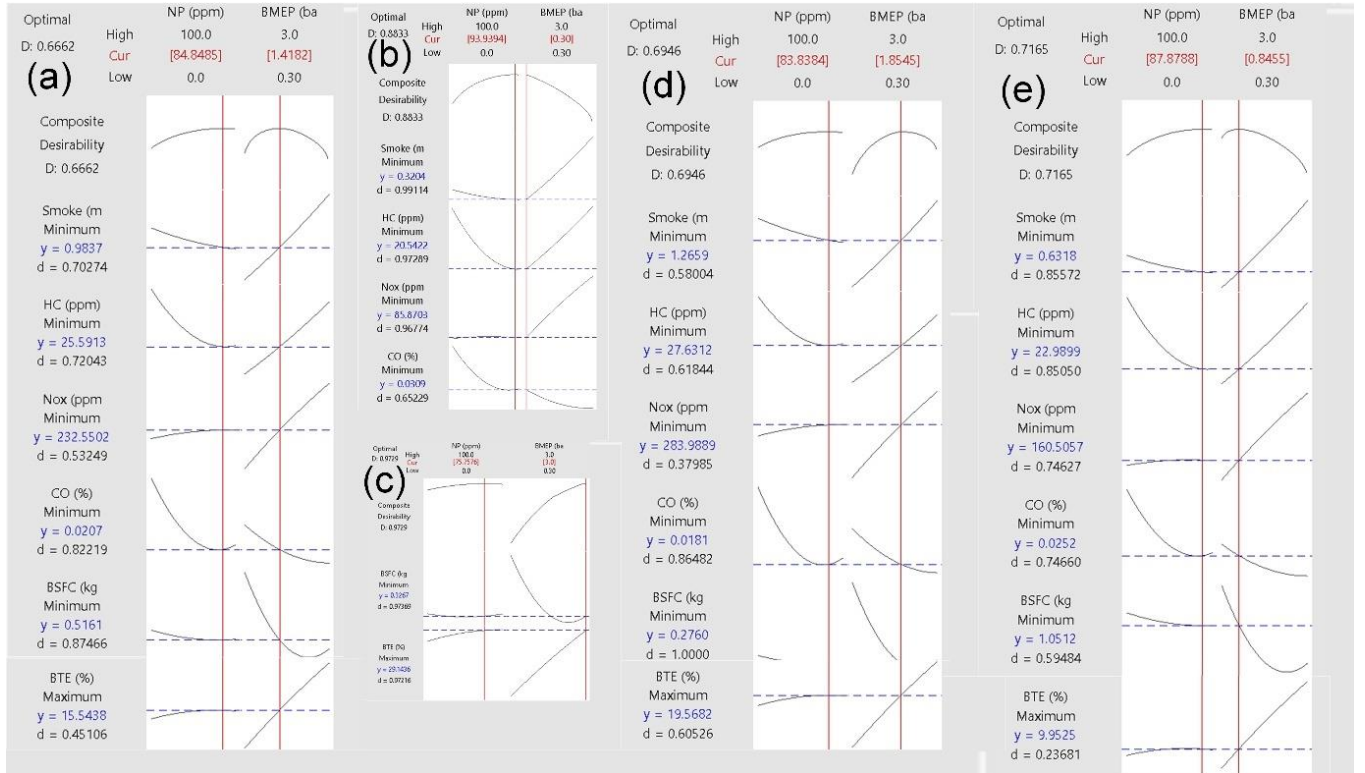
Tablo 9'da ve Şekil 5'te geliştirilen her bir model için YYM analiziyle belirlenen optimum nanoparçacık dozajı (ppm) ve motor yükü (FOEB) değerleri sunulmuştur. Bu optimum noktalar üzerinden elde edilen tahmini yanıtlar, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmış ve uygunluk (bileşik istenilirlik) skorları hesaplanmıştır. Elde edilen karşılaştırmalar, yakıt bileşimi ve hedef önceliklerinin optimum durumdaki etkisini göstermektedir.

NP katkılı optimizasyon modellerinin istatistiksel hata analizi, modeller arasında belirgin doğruluk farkları olduğunu ortaya koymuştur. Ortalama mutlak hata değeri en düşük olan Model I (% 2.57), deneysel verilerle en yüksek uyumu gösteren model olarak öne çıkmıştır.

Tablo 9. Modellerin optimizasyonu ve deneysel geçerleme sonuçları

Model	NP (ppm)	FOEB (bar)	Bileşik İstenirlik	Durum	FEV (%)	FÖYT (kg/kWh)	CO (%)	No _x (ppm)	HC (ppm)	Duman (m ⁻¹)
I	84.84	1.41	0.66	O	15.54	0.5161	0.020	232.55	25.59	0.98
				E	16.48	0.5394	0.020	235.00	25.00	1.00
				% Er	5.70	4.32	0.00	1.04	-2.36	2.00
II	93.93	0.3	0.88	O	n/a	n/a	0.030	85.87	20.54	0.32
				E	n/a	n/a	0.040	88.00	20.00	0.30
				% Er	n/a	n/a	25.00	2.42	-2.70	-6.67
III	75.75	3.00	0.97	O	29.14	0.3267	n/a	n/a	n/a	n/a
				E	26.74	0.3167	n/a	n/a	n/a	n/a
				% Er	-8.98	-3.16	n/a	n/a	n/a	n/a
IV	83.83	1.85	0.69	O	19.56	0.2759	0.018	283.98	27.63	1.26
				E	18.99	0.2754	0.020	294.00	27.00	1.00
				% Er	-3.00	-0.18	9.50	3.41	-2.33	-26.00
V	87.87	2.23	0.71	O	9.95	1.0512	0.025	160.5	22.98	0.63
				E	9.70	1.0459	0.030	157	23.00	1.00
				% Er	-2.58	-0.51	16.00	-2.23	0.09	37.00

O: Optimum Değer, E: Deneysel değer, Er: % Hata



Şekil 5. Optimizasyon grafiği: D80But20 yakıtının tüm modeller üzerindeki etkisi (a) Model-I, (b) Model-II, (c) Model-III, (d) Model-IV, (e) Model-V

Model III (6.07) orta seviyede doğruluk sergilerken, Model IV (% 7.40) performans ve emisyon tahminlerinde dengeli bir doğruluk sunmuş ancak özellikle duman parametresinde yüksek sapma göstermiştir. En yüksek hata oranları ise CO ve duman tahminlerindeki sapmaların dikkat çektiği Model II (9.20) ve Model V'te (% 9.40) kaydedilmiştir. Model IV (% 26) ve Model V (% 37)'deki duman parametresindeki yüksek hatasız değerler, kurum oluşumunun sıcaklık, türbülans ve hava/yakıt oranına yüksek duyarlılığı nedeniyle YYM'nin bu doğrusal olmayan davranışı tam yakalayamamasından ve küçük farkların oransal olarak büyümesinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar, Al₂O₃ katkılı optimizasyonlar için en istikrarlı ve güvenilir

tahminlerin Model I tarafından sağlandığını teyit etmektedir. Bununla birlikte, diğer durumlarda farklı senaryolarda motor performansı ve emisyon davranışlarının nasıl değişebileceği modellenerek ideal çalışma koşullarına ait bulgular netleştirilmiştir.

Modellerin istatistiksel doğruluğunun yanı sıra, farklı çalışma senaryoları altında sundukları optimizasyon stratejileri de incelenmiştir. Performans odaklı senaryolarda, 75-84 ppm katkı dozajı ve yüksek yük koşullarında yanma veriminin en üst seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Emisyon odaklı modellerde ise düşük ve orta yüklerde 88-94 ppm dozajlarının; CO, HC ve duman emisyonlarını belirgin şekilde azalttığı görülmüştür. Dengeli yaklaşımlar, orta

seviye motor yükü ve 85 ppm (± 3 ppm) katkı seviyelerinde hem performans hem de emisyonlarda tatmin edici sonuçlar vermiş ve kompozit istenirlik değerlerini 0.66–0.71 aralığında tutmuştur.

Genel olarak Al_2O_3 NP'ü, uygun dozaj ve yük koşullarında dizel motorların enerji dönüşüm verimini artırırken, özellikle kısmi yanmış ürünler CO ve HC'yi azaltsa da artan sıcaklığa bağlı olarak NO_x oluşumunu artırmaktadır.

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, D80But20 yakıtlarının performansını iyileştirmek amacıyla 25–100 ppm aralığında metal oksit sınıfına ait alüminyum oksit nanoparçacıkları katkı olarak kullanılmıştır. Bu nanoparçacıklarının ikincil mikro patlama, yüksek kimyasal reaktivite ve geniş özgül yüzey alanı gibi ayırt edici özelliklerinin yanma süreçleri, motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini belirlemek üzere kapsamlı deneysel analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler, beş farklı senaryo hedefi doğrultusunda yanıt yüzey yöntemi ile optimize edilmiş, böylece her bir yakıt karışımına ait performans ve emisyon parametreleri istatistiksel olarak değerlendirilerek optimum nanoparçacık dozajı ortaya konulmuştur.

Test edilen yakıt karışımlarına ait sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- NP katkı miktarı oranı ile % FEV değeri ilk duruma göre artarken, FÖYT (kg/kWh) değerinde katkısız duruma göre iyileşme gözlenmiştir.
- NP katkı miktarı ile CO, HC, Duman değerlerinde azalma gözlenirken, NO_x emisyon değerinde ise NP katkısının yanma sıcaklığını artırması emisyonda artışa sebebiyet vermiştir.
- Elde edilen regresyon analiz sonuçları, tüm yanıtlar için % 90'ın üzerinde R^2 değerleri sağlamış olup, bu durum geliştirilen YYM modelinin farklı motor yüklerinde nanoparçacık oranının etkilerini güvenilir ve doğru bir şekilde yansıtmaya kapasitesine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
- Beş farklı koşul altında yapılan optimizasyon sonuçlarına göre, optimum nanopartikül dozajı D80But20 yakıtı için dengeli koşulda 85 ppm (± 3 ppm), performans odaklı durumda 80 ppm (± 4 ppm) ve emisyon odaklı durumda ise 91 ppm (± 3 ppm) olmaktadır. Bu durum optimizasyon sonuçlarının, performans ve emisyonlar arasında bir denge kurulması gerektiğini ve NP dozajının operasyonel önceliklere göre belirlenmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu araştırmanın bulguları, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH) ile güçlü bir uyum sergilemektedir. Çalışma, enerji verimliliğini artırarak Hedef 7.3 (enerji verimliliği) ve 12.2'ye (doğal kaynakların verimli kullanımı) doğrudan hizmet ederken; zararlı emisyonları azaltması sayesinde ise Hedef 9.4 (sürdürülebilir sanayileşme), 11.6 (sürdürülebilir şehirler ve hava kalitesi) ve 13.2'ye (iklim eylemi) yönelik somut çıktılar sağlamaktadır. Bu doğrultuda, Al_2O_3 katkılı bütanol karışımları, hem mevcut enerji altyapısının verimliliğini

artıran hem de çevresel sürdürülebilirliği destekleyen ileri bir alternatif yakıt teknolojisi olarak önemli bir potansiyel sunmaktadır. Sonuç olarak bu araştırma, nanoparçacık katkılarının mevcut yakıtları iyileştirme ve düşük emisyonlu yeni nesil yakıtlar geliştirme yolunda sunduğu imkanları ortaya koyarak ilgili alana önemli bir çerçeve kazandırmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, Batman Üniversitesi Otomotiv Araştırma Laboratuvarı'na (Batman, Türkiye) verdikleri destek ve katkılarından dolayı teşekkürlerini sunmaktadır.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] G. Gentilucci, A. Accardo, E. Spessa, Life cycle greenhouse gas emissions of diesel oil and zero-emission trucks: Systematic review of status and perspectives, *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 32, 101563, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101563>.
- [2] D. Golomb, Fossil Fuel Combustion: Air Pollution and Global Warming, in: *Managing Air Quality and Energy Systems*, CRC Press, pp. 177–190, 2020.
- [3] C. Fetting, The European Green Deal, ESDN Report, December 2020.
- [4] F. Biermann, N. Kanie, R.E. Kim, Global governance by goal-setting: the novel approach of the UN Sustainable Development Goals, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 26, 26–31, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.01.010>.
- [5] C.O. Obunaonye, C.P. Onuoha, E.E. Oguzie, E.I. Emereibeole, A Review on the Effectiveness of Water-In-Diesel Emulsions as an Alternative Fuel, *Journal of Solution Chemistry*, 1–42, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10953-025-01480-1>.
- [6] L. Robles-Lorite, R. Dorado-Vicente, E. Torres-Jimenez, G. Bombek, L. Lešnik, Recent advances in the development of automotive catalytic converters: A systematic review, *Energies*, 16, 6425, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10953-024-01431-7>.
- [7] W.U. Mulk, M.A. Ismael, A.R.A. Aziz, M. Azman, M. Aider, M. Younas, M. Hamdy, M.A. Nemitallah, Recent progress in biodiesel-fueled ICEs and role of nano-additives in optimizing combustion and emissions with cost analysis-a comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226 116263, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.-116263>.
- [8] A. Atmaca, M.A. Kallioğlu, Titanium dioxide (TiO_2) nanoparticle effects on diesel engine efficiency and emission control: A comprehensive study with RSM modelling, *Fuel*, 404, 136228, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.-2025.136228>.
- [9] H. Khan, M.E.M. Soudagar, R.H. Kumar, M.R. Safaei, M. Farooq, A. Khidmatgar, N.R.

- Banapurmath, R.A. Farade, M.M. Abbas, A. Afzal, Effect of nano-graphene oxide and n-butanol fuel additives blended with diesel—Nigella sativa biodiesel fuel emulsion on diesel engine characteristics, *Symmetry*, 12, 961, 2020. <https://doi.org/10.3390/sym12060961>.
- [10] T.T. Truong, X.P. Nguyen, V.V. Pham, V.V. Le, A.T. Le, V.T. Bui, Effect of alcohol additives on diesel engine performance: a review, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 47, 2011490, 2025. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.2011490>.
- [11] K. Nanthagopal, R.S. Kishna, A.E. Atabani, A.H. Al-Muhtaseb, G. Kumar, B. Ashok, A compressive review on the effects of alcohols and nanoparticles as an oxygenated enhancer in compression ignition engine, *Energy Conversion and Management*, 203, 112244, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112244>.
- [12] A.H. Hamzah, A. Akroot, H.A.A. Wahhab, R.M. Ghazal, A.E. Alhamd, 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 in Engineering*, 22, 102248, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102248>.
- [13] N.B. Parmar, J.J. Patel, The Role of Nanoparticles as Additives in Diesel/Biodiesel: A Review on Performance and Emission Enhancements, *Journal of Scientific Research and Reports*, 31, 561–574, 2025. <https://doi.org/10.0.38.6/jsrr/2025/-v31i63152>.
- [14] A. Çakmak, Al₂O₃ nanoparçacıklarının ve çeşitli antioksidan katkı maddelerinin dizel motor karakteristiklerine etkilerinin araştırılması, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13, 1–1, 2024. <https://doi.org/10.28948-ngmuh.1284143>.
- [15] İ.A. Reşitoğlu, A. Keskin, Use of propanol with diesel: effects on fuel consumption and exhaust emissions of diesel engine, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8, 372–377, 2019. <https://doi.org/10.28948-ngmuh.517141>.
- [16] Q. Chen, C. Wang, K. Shao, Y. Liu, X. Chen, Y. Qian, Analyzing the combustion and emissions of a DI diesel engine powered by primary alcohol (methanol, ethanol, n-butanol)/diesel blend with aluminum nano-additives, *Fuel*, 328, 125222, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125222>.
- [17] M.F. Al-Dawody, M.S. Edam, Experimental and numerical investigation of adding castor methyl ester and alumina nanoparticles on performance and emissions of a diesel engine, *Fuel*, 307, 121784, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121784>.
- [18] Y. Kaushik, V. Verma, K.K. Saxena, C. Prakash, L.R. Gupta, S. Dixit, Effect of Al₂O₃ nanoparticles on performance and emission characteristics of diesel engine fuelled with diesel–neem biodiesel blends, *Sustainability*, 14, 7913, 2022. <https://doi.org/10.3390/su-14137913>.
- [19] K. Rajesh, C. Bibin, G. Soundararajan, R. Ashok Kumar, S. Arunkumar, Y. Devarajan, N. Kaliappan, Investigating the impact of alumina nanoparticles in coconut oil distillate biodiesel to lessen emissions in direct injection diesel engine, *Scientific Reports*, 14, 13228, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63862-7>.
- [20] Y.B. Zeldvich, The oxidation of nitrogen in combustion and explosions, *J. Acta Physicochimica*, 21, 577, 1946.
- [21] Aluminum Oxide Nanoparticles - Nanografi., <https://nanografi.com/nanoparticles/single-metal-oxide-nanopowder/aluminum-oxide-nanoparticles/>, accessed March 29, 2024.
- [22] M.A. Kallioğlu, U. Ercan, A.S. Avcı, Effects of eurodiesel fuels with multi-element oxide nanoparticles (Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe₂O₄) on diesel engines investigated through RSM, *Biofuels*, 1–16, 2025. <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2480501>.
- [23] M.K. Yesilyurt, A detailed investigation on the performance, combustion, and exhaust emission characteristics of a diesel engine running on the blend of diesel fuel, biodiesel and 1-heptanol (C₇ alcohol) as a next-generation higher alcohol, *Fuel*, 275, 117893, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117893>.
- [24] A.S. Avcı, U. Ercan, M.A. Kallioğlu, Multi-metal oxide (Zn_{0.5}Mn_{0.5}Fe₂O₄) nanoparticle additives in biodiesel–n-butanol blends: impact on diesel engine performance and emissions, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–28, 2025. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06760-3>.
- [25] J.P. Holman, *Experimental methods for engineers*, McGraw-Hill Companies, New York, 8th ed, pp. 63–72, 2021.

