



Eurodizel yakıtlarında Nikel (III) Oksit nanoparçacık kullanımının dizel motorlara etkisinin yanıt yüzey metodolojisi ile analizi

Analysis of the effects of Nickel (III) Oxide nanoparticle use in eurodiesel fuels on diesel engines by response surface methodology

Ali Serkan Avcı^{1,*}

¹Batman Üniversitesi, Beşiri Organize Sanayi Bölgesi Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 72100, Batman, Türkiye

Öz

Dizel motorlarda verimliliğin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması amacıyla nanoteknoloji tabanlı yakıt katkıları önemli bir araştırma alanıdır. Bu çalışmada, ticari saf Eurodizel yakıtına 25, 50, 75 ve 100 ppm oranlarında ilave edilen Nikel (III) Oksit nanoparçacıklarının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneyler, tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda 0.3, 1.0, 2.0 ve 3.0 bar FOEB koşullarında yürütülmüştür. Sonuçlar, 75 ppm Ni_2O_3 dozajının en uygun performansı sağladığını göstermiştir. Bu koşulda en yüksek FTV %24.93'e ulaşırken, FÖYT 0.28 kg/kWh'ye düşmüştür. CO, HC ve duman emisyonlarında belirgin azalmalar elde edilirken, NO_x emisyonu yüksek yükte kısmen artmıştır. Sistem davranışını modellemek amacıyla Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) uygulanmıştır. YYM ile geliştirilen ikinci dereceden modeller yüksek doğruluk göstermiştir (R^2 =%93.06–99.90). Farklı endüstriyel ve çevresel öncelikler için beş optimizasyon senaryosu oluşturulmuştur. Dengeli, emisyon odaklı ve performans odaklı optimizasyon senaryolarında optimum koşullar sırasıyla 82.82 ppm–1.58 bar, 78.78 ppm–0.30 bar ve 58.58 ppm–3.00 bar olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Motor performansı, Egzoz emisyonları, Optimizasyon, Ni_2O_3

1 Giriş

Dünya genelinde ekonomik kalkınma ve insan yaşamının sürdürülebilirliği büyük ölçüde enerji kaynaklarının kesintisiz arzına dayanmaktadır. Bilimsel ve teknolojik gelişmelere paralel olarak artan bu küresel enerji talebinin günümüzde yaklaşık %80-88'lik devasa bir kısmı halen fosil kökenli yakıtlardan karşılanmaktadır [1]. Özellikle ulaşım sektörü, tüketilen bu petrol tabanlı kaynakların en büyük kullanıcılarından biri konumundadır ve küresel ısınmayı tetikleyen sera gazı salınımlarında kritik bir paya sahiptir [2]. Sınırlı fosil yakıt rezervlerinin hızla tükenmeye yüz tutması ve atmosferik kirliliğin tehlikeli boyutlara ulaşması, alternatif enerji çözümlerini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, çevresel tahribatın azaltılması ve iklim değişikliğinin etkilerinin sınırlandırılması amacıyla, Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA) ile Avrupa Yeşil Mutabakatı gibi uluslararası politika

Abstract

The use of nanotechnology-based fuel additives is an important research area for improving diesel engine efficiency and reducing environmental impacts. In this study, the effects of Nickel (III) Oxide nanoparticles added directly to commercial Eurodiesel fuel at 25, 50, 75, and 100 ppm on engine performance and exhaust emissions were investigated. Experiments were conducted on a single-cylinder, direct-injection diesel engine at 0.3, 1.0, 2.0, and 3.0 bar BMEP. The results showed that 75 ppm Ni_2O_3 provided the best performance. Under this condition, maximum BTE reached 24.93%, while BSFC decreased to 0.28 kg/kWh. Significant reductions were obtained in CO, HC, and smoke emissions, whereas NO_x partially increased at high load. Response Surface Methodology (RSM) was applied to model system behavior, and the developed second-order models showed high accuracy (R^2 = 93.06–99.90%). Five optimization scenarios were established for different industrial and environmental priorities. The optimum conditions for balanced, emission-oriented, and performance-oriented scenarios were 82.82 ppm–1.58 bar, 78.78 ppm–0.30 bar, and 58.58 ppm–3.00 bar, respectively.

Keywords: Engine performance, Combustion, Exhaust emissions, Optimization, Ni_2O_3

girişimleri uygulamaya konulmuştur. Avrupa Yeşil Mutabakatı, 2050 yılına kadar iklim nötrlüğünün sağlanmasını ve ara hedefler doğrultusunda sera gazı emisyonlarının önemli ölçüde azaltılmasını öngörmektedir [3]. Benzer şekilde, SKA kapsamında özellikle SKA 7 ve SKA 13; enerji dönüşümünün hızlandırılması, temiz ve sürdürülebilir enerji sistemlerinin yaygınlaştırılması, fosil yakıt kullanımının azaltılması ve çevresel etkileri yüksek sektörlerde emisyon kontrolünün güçlendirilmesi gereğini ortaya koymaktadır [4]. Bu hedefler doğrultusunda, içten yanmalı motorlarda alternatif yakıtların kullanımı ve egzoz emisyonlarının azaltılmasına yönelik teknolojik çözümler her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır.

İçten yanmalı motorlar, özellikle dizel motorlar, yüksek termal verimleri, dayanıklı yapıları ve yakıt ekonomileri nedeniyle taşımacılık, tarım, enerji üretimi ve sanayi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: aliserkan.avci@batman.edu.tr (A. S. Avcı)
Geliş / Received: 22.04.2026 Kabul / Accepted: 10.06.2026 Yayınlanma / Published: 25.06.2026
doi: 10.28948/ngumuh.1935931

birlikte, bu motorlar partikül madde (PM) ve azot oksitler (NOx) gibi zararlı emisyonların önemli kaynakları arasında yer almaktadır [5]. Bu nedenle, dizel motorların çevresel etkilerini azaltmaya yönelik olarak yanma iyileştirme stratejileri, egzoz arıtma sistemleri ve yakıt özelliklerini geliştiren katkı maddeleri üzerine yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Sıklaşan emisyon standartlarını karşılayabilmek ve motorun termodinamik performansını maksimize edebilmek için, saf Eurodizel yakıtının tek başına kullanımı artık endüstriyel taleplere tam anlamıyla yanıt verememektedir. Standart dizel yakıtının bu limitlerini aşmak üzere, nanoteknoloji uygulamalarından faydalanılarak geliştirilen nanoparçacık (NP) katkılı yakıt karışımları oldukça yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Genellikle nanometre boyutlarında olan bu partiküller; yüksek yüzey alanı/hacim oranına, yüksek ısıl iletkenliğe ve gelişmiş kütle transferi yeteneklerine sahiptir. Yakıtı entegre edildiklerinde damlacıkların atomizasyon kalitesini artırarak hava ile yakıtın çok daha homojen karışmasını sağlarlar; bu durum tutuşma ve yanma süreçlerinin daha etkin gerçekleşmesine katkı sağlayabilir [6, 7]. Çeşitli metal ve metal oksit yapılar arasından, özellikle yüksek oksidasyon kabiliyetleri ve reaksiyon hızlandırıcı etkileri ile nikel bazlı nanomalzemeler alternatif yakıt formülasyonları için güçlü bir adaydır [8].

Nikel esaslı nanoparçacıklar, yüksek yüzey alanları, katalitik etkinlikleri ve ısıl özellikleri nedeniyle yakıt katkısı olarak dikkat çekmektedir. Özellikle Ni_2O_3 yapısının, yanma sürecinde oksidasyon reaksiyonlarını destekleyerek yakıtın daha etkin biçimde yanmasına katkı sağlayabildiği değerlendirilmektedir [9]. Bu etkiler, tutuşma davranışı, hava-yakıt karışımının düzenli yanması ve ısı transferi üzerinde olumlu katkılar oluşturabilecek mekanizmalarla ilişkilendirilmektedir [10, 11]. Bu mekanizmalar sonucunda motor performansında iyileşme sağlanırken, CO, HC ve duman gibi eksik yanma kaynaklı emisyonlarda azalma meydana gelebilmektedir [12]. Bu nedenle Ni_2O_3 , dizel motorlarda yakıt özelliklerini iyileştirme potansiyeli bulunan önemli katkı maddelerinden biri olarak değerlendirilmektedir [13].

Nikel esaslı nanoparçacıklara ilişkin literatür değerlendirildiğinde, bu katkılar dizel motorlarda yanma verimini artırma ve emisyon performansını iyileştirme potansiyeline sahip olduğu anlaşılmaktadır. Keskin vd. [14], tall oil kökenli biyodizelde Mn ve Ni bazlı katkılar dizel motor performansı ve emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, biyodizel karışımının özgül yakıt tüketimini artırmasına karşın metal katkılarının bu değeri iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca Mn katkısıyla CO emisyonunda %64.28'e, Ni katkısıyla ise %24.36'ya varan azalmalar elde edilmiştir. Srinidhi ve Madhusudhan [15], palmye yağı metil esteri-dizel karışımlarına NiO nanoparçacık ilavesinin motor performansı ve yanma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırmacılar, özellikle %20 biyodizel içeren karışımda 40 ppm NiO kullanımının en iyi sonucu verdiğini; bu koşulda fren ısı veriminin yaklaşık %6.2 arttığını, fren özgül yakıt tüketiminin ise %5.6 azaldığını bildirmiştir. Srinidhi vd. [12] ise dizel-biyodizel karışımlarında NiO nanoparçacık katkısı

ile farklı enjeksiyon zamanlamalarının birlikte etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, ileri enjeksiyon avansı ve NiO katkısının birlikte uygulanmasıyla fren ısı veriminin yaklaşık %6.3 arttığını, fren özgül yakıt tüketiminin ise %5.29–7.86 aralığında azaldığını göstermiştir. Ayrıca CO ve yanmamış hidrokarbon emisyonlarında düşüş gözlenirken, NOx emisyonunda sınırlı yükselme rapor edilmiştir. Hassan vd. [13], 100 ppm Ni ve Al nanoparçacık katkılı dizel-biyodizel-n-bütanol karışımlarında, nanoparçacık kullanımının motor performansını iyileştirdiğini bildirmiştir. Özellikle %10 hintyağı biyodizeli ve %90 dizel içeren karışımda FÖYT yaklaşık %9 oranında azalırken, fren termal verim (FTV)'de %9'a yakın artış gözlenmiştir. Navinprasad vd. [16], n-pentan/dizel karışımlarında NiO_2 nanoparçacık katkısının motor performansı ve emisyonlar üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, nanoparçacık ilavesiyle fren ısı veriminin yaklaşık %8 arttığını ve özgül yakıt tüketiminin %15'e kadar azaldığını göstermiştir. Ayrıca HC emisyonlarında %40'a, CO emisyonlarında ise %10'a varan düşüşler rapor edilmiştir. Sarvestani vd. [17], %20 biyodizel içeren dizel karışımına 90 ppm NiFe_2O_4 nanoparçacık ilavesinin emisyonlar üzerindeki etkisini incelemiştir. Bulgular, nanoparçacık katkısının motor performansında belirgin bir olumsuzluk oluşturmada HC emisyonunu %44.3, CO emisyonunu %12, partikül sayısını %26 ve partikül kütlelerini %30 oranında azalttığını göstermiştir. Özgür [18], dizel yakıtına ilave edilen NiFe_2O_4 ve $\text{Zn}_{0.5}\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ nanoparçacıklarının egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, her iki katkının da yakıt özelliklerinde sınırlı değişime neden olurken NOx, CO ve HC emisyonlarını azalttığını göstermiştir. Mandizadeh vd. [19], NiFe_2O_4 nanoyapılarının dizel yakıtına katkı olarak kullanımını incelemiş ve bu katkının motor performansını korurken emisyonları iyileştirdiğini bildirmiştir. Özellikle tam yükte NOx emisyonunun %23, HC emisyonunun %15, CO emisyonunun yaklaşık %5 ve duman emisyonunun %10 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Son olarak, önceki çalışmalarda, Ni_2O_3 nanoparçacıklarının biyodizel ve n-bütanol içeren yakıt karışımlarında motor performans ve emisyonlar üzerinde iyileştirici etkiler oluşturduğu belirlenmiştir [20, 21]. Ancak söz konusu araştırmalar alternatif yakıt harmanları üzerine yoğunlaşmış olup, Ni_2O_3 katkısının ticari saf Eurodizel üzerindeki etkisi henüz yeterince ortaya konulmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışma, yalnızca Eurodizel yakıtı esas alınarak bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır.

Motor performansı ve emisyon çalışmalarında, çoklu parametrelerin etkileşimini modelleme ve optimum koşulları belirleme başarısı nedeniyle Yanıt Yüzey Metodolojisi (YYM) yaygın olarak kullanılmaktadır [22, 23]. Deney sayısını azaltması, zaman ve maliyet avantajı sunması ve güvenilir tahminler üretebilmesi bu yöntemin öne çıkan avantajlarıdır [24]. Bu çalışmada, nanoparçacık oranı ve motor yükünün etkileri YYM ile analiz edilmiş ve optimum koşullar belirlenmiştir.

Bu çalışma, ticari saf Eurodizel yakıtına ilave edilen Nikel (III) Oksit (Ni_2O_3) nanoparçacıklarının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini istatistiksel bir yaklaşımla değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Ayrıca, herhangi bir alternatif yakıt harmanına ihtiyaç duyulmaksızın uygulamaya dönük teknik bir çerçeve sunulması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, saf Eurodizel içerisine farklı konsantrasyonlarda (0, 25, 50, 75 ve 100 ppm) Ni_2O_3 ilave edilerek hazırlanan nano-yakıt karışımları, tek silindirli ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorda, farklı motor yükleri altında (0.3; 1.0; 2.0 ve 3.0 bar FOEB) sistematik olarak test edilmiştir. Literatürde nikel tabanlı nanoparçacık katkılı yakıtlarla gerçekleştirilen çalışmaların büyük bölümü, belirli çalışma koşullarındaki eğilimleri tanımlayıcı olarak sunmaktadır. Bu çalışmada ise geleneksel grafiksel yorumlamanın ötesine geçilerek, tüm veriler doğrudan YYM ve Merkezi Kompozit Tasarım (MKT) temelli nicel bir modelleme yaklaşımıyla değerlendirilmiştir. Motor performans göstergeleri olan fren termal verimi (FTV) ve fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT) ile egzoz emisyon parametreleri olan CO, HC, NO_x ve duman için ikinci dereceden yanıt yüzey modelleri geliştirilmiştir. Böylece, Ni_2O_3 dozajı ile motor yükü arasındaki doğrusal, karesel ve etkileşimsel ilişkiler nicel olarak ortaya konulmuş ve performans ile emisyon hedeflerini birlikte değerlendirebilen bir optimizasyon altyapısı oluşturulmuştur. Ayrıca, farklı kullanım önceliklerini yansıtmak amacıyla performans odaklı, emisyon odaklı ve dengeli yaklaşımı temsil eden bağımsız optimizasyon senaryoları oluşturulmuştur. Bu sayede yalnızca tek bir optimum noktanın belirlenmesiyle yetinilmemiş, aynı zamanda uygulama açısından anlamlı ve endüstriyel olarak değerlendirilebilir optimum çalışma bölgeleri tanımlanmıştır.

2 Materyal ve metot

2.1 Nikel (III) Oksit nanoparçacığının özellikleri

Bu çalışmada yakıt katkı maddesi olarak kullanılan Ni_2O_3 nanoparçacıkları Nanografi Co. (Ankara, Türkiye)'den temin edilmiştir. Malzemeye ait teknik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur [25].

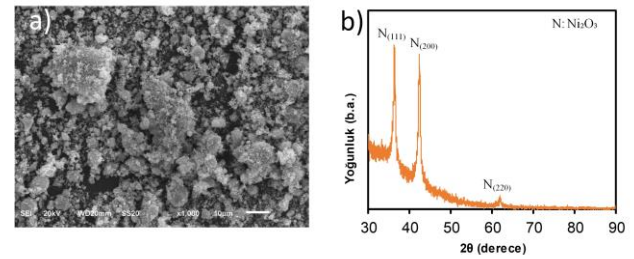
Tablo 1. Ni_2O_3 nanoparçacığının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Bileşik	Ni_2O_3
Üretici	Nanografi Nanoteknoloji
Ürün Numarası	NG01NM1802
Saflık (%)	99.95+
Renk	Siyah - koyu gri
Ortalama Parçacık Boyutu (nm)	40
Özgül Yüzey Alanı (m^2/g)	40-60
Yığın Yoğunluğu (g/cm^3)	0.38
Gerçek Yoğunluk (g/cm^3)	4.84
Elementel Analiz (ağırlıkça %)	Ni_2O_3 : 99.95, Co: <0.014, Pb: 0.01, Fe: 0.028, Cu: 0.01, Ca: 0.035

Şekil 1a'da Ni_2O_3 nanoparçacıklarına ait yüzey morfolojisi sunulmaktadır. Elde edilen görüntüler, parçacıkların genel olarak küresel ya da küresele yakın bir yapıda olduğunu ve yüksek yüzey enerjisine bağlı olarak kümelenme eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Parçacık boyutları nano ölçekte olmakla birlikte, bazı alanlarda daha büyük topluluklar halinde bir araya geldikleri de görülmektedir. Bu yapının, malzemenin etkin yüzey alanını artırarak katalitik özelliklerine katkı sağlayabileceği düşünülmektedir. Ayrıca yüzeyde gözlenen düzensiz ve pürüzlü yapı, yakıt ortamında etkileşimi artıracak aktif bölgelerin varlığına işaret etmektedir [26].

Şekil 1b'de verilen XRD analizi, sentezlenen Ni_2O_3 nanoparçacıklarının kristal yapısını ortaya koymaktadır. Desende belirlenen karakteristik kırınım piklerine ek olarak, 62.9° ve 75.4° civarında yer alan zayıf pikler de Ni_2O_3 fazını desteklemektedir [16]. Kırınım deseninin JCPDS 47-1049 standardı ile uyum göstermesi, numunenin kübik kristal fazda sentezlendiğini göstermiştir [9]. Piklerin yüksek belirginliğe sahip olması ise kristallilik derecesinin yüksek olduğuna işaret etmektedir [20].



Şekil 1. Ni_2O_3 nanoparçacığının a) SEM görüntüsü b) XRD görüntüsü

2.2 Test yakıtlarının hazırlanması

Ni_2O_3 nanoparçacıklarının saf Eurodizel içerisine optimum düzeyde dağıtılması ve kararlı bir nano-yakıt yapısı elde edilmesi için iki aşamalı bir homojenizasyon stratejisi izlenmiştir. İlk olarak, hassas analitik terazi kullanılarak 25, 50, 75 ve 100 ppm konsantrasyonlarını sağlayacak miktarlarda tartılan nanomalzemeler baz yakıtı ilave edilmiştir. Ön karışımın sağlanması ve partiküllerin sıvı içerisinde askıda kalmasını teşvik etmek amacıyla karışımlara manyetik bir karıştırıcı yardımıyla 60 dakika boyunca 700 dev/dak hızında mekanik ajitasyon uygulanmıştır. Ardından, sıvı içerisindeki olası mikrokümelenmeleri parçalamak ve partiküllerin yakıt moleküllerine nanometrik seviyede entegre olmasını sağlamak için numuneler yüksek frekanslı (40 kHz) ultrasonik banyoda 1 saat süreyle kavitasyon işlemine tabi tutulmuştur. Literatürde, yüksek nanoparçacık dozajlarının topaklanmayı artırarak atomizasyon kalitesini olumsuz etkileyebileceği ve yanma kararsızlıklarına yol açabileceği belirtilmektedir. Bu nedenle, hem motor güvenliğini korumak hem de uygun çalışma koşullarını sağlamak amacıyla katkı oranı 100 ppm ile sınırlandırılmıştır [20, 27, 28].

Dispersiyon aşamaları tamamlandıktan sonra, motor deneylerinin standartlara uygun ve güvenilir koşullarda gerçekleştirilmesini garanti altına almak adına, üretilen nano-yakıt numuneleri saydam cam kaplara aktarılmıştır. Hazırlanan numunelerin faz ayrışması ve kararsızlık durumları, zamana bağlı sedimentasyon (çökme) analiziyle

incelenmiştir. Bulgular, Eurodizel-Ni₂O₃ harmanlarının ilk 3 gün boyunca optik homojenliğini koruduğunu ve motor deneyleri için gereken kısa-orta vadeli fiziksel stabiliteyi sağladığını doğrulamıştır. Ancak 6 haftayı aşan uzun süreli beklemlerde kademeli partikül çökelmeleri gözlenmiştir. Operasyonel güvenilirliği sağlamak adına tüm motor testleri, karışımların tam stabilite sunduğu bu ilk 3 günlük periyot içerisinde tamamlanmıştır. Uygulanan bu yakıt hazırlama prosedürüne ait şematik akış **Şekil 2**'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Ni₂O₃ katkılı eurodizel test yakıtlarının hazırlanış aşamaları

Saf Eurodizel ve Ni₂O₃ nanoparçacık ilaveli test yakıtlarının ASTM standartlarına göre belirlenen fizikokimyasal özellikleri **Tablo 2**'de özetlenmiştir. Tablodaki veriler analiz edildiğinde, yakıt içerisindeki nanoparçacık dozajı 0 ppm'den 100 ppm'e çıkarıldıkça, karışımın yoğunluğunun ve kinematik viskozitesinin kontrollü bir artış sergilediği görülmektedir. Bu eğilim, katı formdaki metal oksit parçacıklarının sıvı faz içerisindeki sürtünme direncini ve birim hacim kütlelerini artırmasının doğal bir sonucudur [18].

Tablo 2. Ni₂O₃ katkılı eurodizel test yakıtlarının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellikler	Metot	0 ppm	25 ppm	50 ppm	75 ppm	100 ppm
Yoğunluk, kg/m ³	ASTM D5865	834.3	834.8	835.4	835.8	836.3
Isıl Değer, Mj/kg	ASTM D5865	42.65	41.84	41.25	40.38	39.54
Kinematik Viskozite, cSt	ASTM D5865	3.5	3.54	3.59	3.62	3.69
Parlama Noktası, °C	ASTM D5865	62	61	61	60	59
Setan Sayısı	ASTM D613	53.8	54.2	54.7	55.1	55.6

Öte yandan, nanoparçacıkların yanıcı olmayan inorganik doğası yakıt içerisindeki yanabilir hidrokarbon oranını bağıl olarak azalttığından, karışımın alt ısı değeri gerilemiştir. Diğer taraftan, Ni₂O₃'ün yüksek ısı iletkenliği sayesinde yakıtın ısıyı çok daha homojen ve hızlı iletmesi buharlaşma yeteneğini artırmış; böylece parlama noktası düşmüştür [14]. Bu termofiziksel değişimlere paralel olarak setan sayısında elde edilen istikrarlı yükseliş, nanoparçacık katkısının

tutuşma reaksiyonlarını hızlandıran katalitik bir rol üstlendiğini ve saf Eurodizel yakıtının genel ateşleme kalitesini belirgin biçimde iyileştirdiğini göstermektedir [29].

2.3 Deneyisel yöntem ve metodoloji

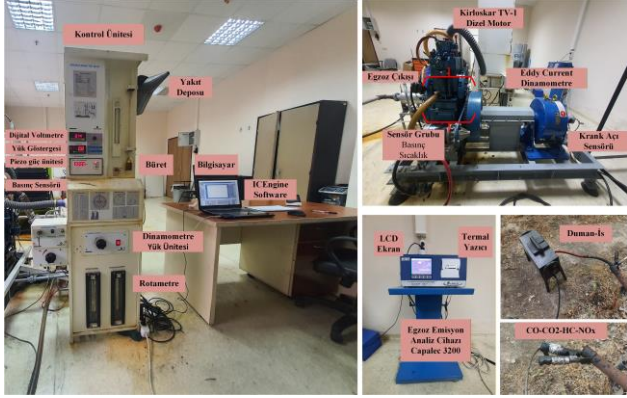
Ni₂O₃ nanoparçacık katkılı Eurodizel yakıtlarının motor performansı ve egzoz emisyonları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yürütülen deneyel çalışmalar, Batman Üniversitesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü Motor Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde güç ünitesi olarak, tek silindirli, dört zamanlı, su soğutmalı ve direkt enjeksiyonlu (DI) bir Kirloskar dizel motor kullanılmıştır. Motora ait teknik özellikler **Tablo 3**'te sunulmuştur. Motor yükü, hassas kontrol olanağı sağlayan su soğutmalı Eddy-current dinamometre ile uygulanmış; çalışma verilerinin izlenmesi ve yük ayarları IEngineSoft v9.0 yazılımı üzerinden gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde motor devri, maksimum tork noktasına karşılık gelen 1500 dev/dak değerinde sabit tutulmuştur. Yakıt tüketimi, 100 mL hacimli büret sistemi kullanılarak belirlenmiş ve tüketim süreleri esas alınarak FÖYT ile FTV hesaplanmıştır. Motora alınan hava debisi, hava tankı ve orifis-manometre düzeneği yardımıyla ölçülmüştür. Emme ve egzoz hatlarındaki sıcaklık değişimleri ise Radix K-tipi termokupllar ile izlenmiştir. Deney düzeneğine ait genel görünüm ve temel bileşenler **Şekil 3**'te verilmiştir.

Tablo 3. Dizel motoruna ait teknik özellikler

Açıklama	Teknik Özellik
Motor tedarikçisi	Apex Innovations Pvt. Ltd
Marka - Model	Kirloskar-TV1
Ateşleme tipi	Sıkıştırma ile ateşleme
Yakıt püskürtme sistemi	Direkt enjeksiyon
Çevrim başına strok sayısı	4
Maksimum güç (kW) - Devir (dev/dak)	5.2 @1500
Dinamometre	Eddy current tipi
Biyel kolu uzunluğu (mm)	185
Soğutma sistemi	Su soğutmalı
Emme sistemi	Doğal emişli
Yakıt püskürtme avansı (°KA)	ÜÖN'den (Üst Ölü Nokta) önce 0-23°KA (nominal)
Enjektör açma basıncı (bar)	210
Yakıt türü- Kapasitesi (L)	Dizel-15

Egzoz emisyonları, kalibrasyonu yapılmış CAPALEC CAP 3200 çok bileşenli gaz analizörü ile ölçülmüş; CO, HC, NO_x ve duman koyuluğu değerleri nicel olarak kaydedilmiştir. Ölçümlerin doğruluğunu artırmak amacıyla egzoz gazı paslanmaz çelik bir hat üzerinden analizöre yönlendirilmiş ve hat boyunca sıcaklık takibi yapılmıştır. Deneyel prosedürde öncelikle katkısız saf Eurodizel yakıtı (0 ppm) ile referans ölçümleri alınmış, ardından 25, 50, 75 ve 100 ppm Ni₂O₃ içeren yakıt karışımları aynı yük koşullarında (0.3; 1.0; 2.0 ve 3.0 bar FOEB) test edilmiştir. Deneyel verilerin güvenilirliğini artırmak amacıyla her yakıt değişiminden önce yakıt hattı ve ilgili sistem bileşenleri temizlenmiş, emisyon analiz cihazının filtreleri kontrol

edilmiştir. Her yük kademesinde motorun kararlı çalışma koşuluna ulaşması beklendikten sonra ölçümler alınmıştır. Ayrıca her test noktası üç kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması değerlendirmeye alınmıştır [20]. Bu veriler, daha sonra YYM tabanlı modelleme ve optimizasyon aşamalarında kullanılmıştır.



Şekil 3. Motor test düzeneğinin genel görünümü ve kullanılan ölçüm ekipmanları

Krank milinden elde edilen mekanik enerji, motorun dışarıya aktarabildiği yararlı güç çıkışını göstermektedir. Bu nedenle, çalışmada motorun performans değerlendirmesinde kullanılan temel büyüklükler ilgili bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır [20, 30]. Fren gücü, tork ve motor hızı arasındaki ilişki [Denklem \(1\)](#)'de verilmiştir.

$$P_b = \frac{2\pi \cdot \omega \cdot \tau}{1000} \quad (1)$$

Eşitlikte yer alan τ terimi fren torkunu (Nm), ω krank mili hızını (dev/dak) ve P_b fren gücünü (kW) ifade etmektedir. Motor performansının nicel olarak değerlendirilmesinde FOEB, FÖYT ve FTV parametreleri ise sırasıyla [Denklem \(2\)–\(4\)](#) kullanılarak hesaplanmıştır [29, 31].

$$FOEB (Pa) = \frac{P_b \cdot n_r}{V_d \cdot \omega} 10^3 \quad (2)$$

$$FÖYT \left(\frac{g}{kW} \cdot h \right) = \frac{\dot{m}_f}{P_b} 10^3 \quad (3)$$

$$FTV = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} 3600 \quad (4)$$

Bu bağıntılarda n_r , bir iş çevriminin tamamlanması için gereken krank mili devir sayısını; V_d , silindirin süpürme hacmini; $\dot{m}_f$ (kg/saat), yakıtın kütsel debisini; Q_{LHV} (kJ/kg) ise yakıtın alt ısı değerini göstermektedir.

2.4 Yanıt yüzey metodolojisi

Motor performansı ve egzoz emisyonları gibi çok değişkenli sistemlerin modellenmesi ve optimize edilmesi süreçlerinde, giriş parametreleri ile çıktı yanıtları arasındaki karmaşık etkileşimleri eş zamanlı olarak değerlendirebilen

YYM oldukça güçlü bir istatistiksel yaklaşım olarak öne çıkmaktadır. Geleneksel deney tasarımlarının aksine YYM; deneysel planlamanın yapılması, matematiksel modellerin kurulması, sonuçların istatistiksel olarak doğrulanması ve nihai optimizasyonun gerçekleştirilmesi aşamalarını entegre bir biçimde sunar.

Bu çalışmada, sistemin kontrol edilebilir bağımsız (giriş) faktörleri olarak Ni_2O_3 nanoparçacık dozajı ve motor çalışma şiddetini temsil eden FOEB temel alınmıştır. İncelenen bağımlı (yanıt) değişkenler ise motorun termodinamik verimliliğini gösteren FTV ve FÖYT ile çevresel etkileri yansıtan CO , HC , NO_x ve duman koyuluğundan oluşmaktadır. Giriş faktörlerinin motor karakteristikleri üzerindeki etkilerini farklı çalışma rejimlerinde sistematik olarak görebilmek amacıyla; NP konsantrasyonu 0, 25, 50, 75 ve 100 ppm olmak üzere beş seviyede, motor yükü ise 0.3, 1.0, 2.0 ve 3.0 bar FOEB olmak üzere dört seviyede tanımlanmıştır. Deneysel matrisin kurgulanması ve faktörler arası potansiyel etkileşimlerin analiz edilmesi için MINITAB istatistik yazılımı kullanılarak asimetrik MKT yaklaşımı benimsenmiştir. Bu tasarım kapsamında, belirlenen faktör seviyelerini kapsayacak şekilde 4×5 formatında kurgulanan ve toplam 20 deney noktasından oluşan tam faktöriyel bir test matrisi oluşturulmuştur. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak, her bir yanıt değişkeni için giriş faktörlerinin doğrusal (lineer), karesel (kuadratik) ve karşılıklı etkileşimlerini nicel olarak tanımlayan ikinci dereceden polinom regresyon modelleri ([Denklem 5](#)) türetilmiştir. Son aşamada, geliştirilen bu matematiksel modellerin tahmin yeteneği ve istatistiksel doğruluğu Varyans Analizi (ANOVA) ile test edilerek; giriş faktörleri arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlerin etkin bir biçimde modellendiği görülmüş ve sistemin genel optimizasyonu sağlanmıştır [20, 29, 32].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i>j}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (5)$$

Model eşitliğinde Y tahmin edilen yanıt değerini, n bağımsız değişkenlerin toplam sayısını ve β_0 sabit katsayıyı ifade etmektedir. Buna karşılık β_i , β_{ii} ve β_{ij} terimleri faktörlerin doğrusal, ikinci dereceden ve karşılıklı etkileşim etkilerini göstermekte, ε ise deneysel hatayı temsil etmektedir.

2.5 Belirsizlik analizi

Deneysel bulguların bilimsel geçerliliğini ve test sisteminin ölçüm hassasiyetini istatistiksel olarak kanıtlamak amacıyla, literatürde standart olarak kabul gören Holman [33] yaklaşımı temel alınarak kapsamlı bir belirsizlik analizi yürütülmüştür. Bu metodoloji; sensörlerin kalibrasyon toleranslarından, donanımsal hassasiyet limitlerinden ve anlık çevresel faktörlerden kaynaklanabilecek sapmaların, nihai performans ve emisyon

sonuçları üzerindeki kümülatif etkisini hata yayılım prensibiyle değerlendirmektedir.

$$U_R = \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Tablo 4. Ölçüm sistemlerine ait doğruluk ve belirsizlik değerleri

Parametre	Ölçüm Aralığı	Doğruluk	Belirsizlik (%)
Fren Gücü	0-3.5 kW	±0.3 kW	±0.84
Motor Devri	0-1500 dev/dak	±0.1 dev/dak	±0.07
Motor Yüğü	0-12 kg	±0.1 kg	±0.83
Yakıt Tüketim Kütlesi	-	-	±1.55
Büret Sistemi	-	±0.1 cc	±1.0
Dijital Kronometre	-	±0.2 s	±0.3
FTV	-	-	±1.76
FÖYT	-	-	±1.76
CO	0-10 %	±0.01 %	±0.84
HC	0-20.000 ppm	±1.0 ppm	±0.83
NOx	0-5000 ppm	±1.0 ppm	±0.83
Duman	0-99.9 % hac.	±0.01 %	±0.83

Sistematik olarak bu analiz, birden fazla bağımsız ölçüm değişkenine (x) bağlı olan genel bir yanıt fonksiyonunun (R), alt parametrelerdeki bireysel ölçüm hatalarını toplam sistem belirsizliğine nasıl yansıttığını hesaplar. Söz konusu fiziksel ve matematiksel ilişki [Denklem \(6\)](#) yardımıyla formülize edilmiştir. Deneylerde kullanılan her bir enstrümana ait kalibrasyon aralıkları, spesifik doğruluk oranları ve hesaplanan bireysel belirsizlik değerleri [Tablo 4](#)'te ayrıntılı olarak özetlenmektedir.

Belirsizlik analizi sonuçlarına göre, performans ve emisyon parametreleri için hesaplanan birleşik hata payı ±%2.87 düzeyindedir.

3 Bulgular ve tartışma

3.1 YYM sonuçları

Saf Eurodizel yakıtına farklı oranlarda Ni_2O_3 NP ilavesinin ve değişen motor yüklerinin performans ile emisyon karakteristikleri üzerindeki birleşik etkilerini incelemek amacıyla MKT matrisi oluşturulmuş ve elde edilen 20 farklı deney koşuluna ait yanıtlar [Tablo 5](#)'te sunulmuştur. Tablodaki deneysel veriler genel olarak incelendiğinde, motor yükünün artmasıyla birlikte termodinamik doğanın bir gereği olarak fren termal veriminin yükseldiği ve fren özgül yakıt tüketiminin azaldığı görülmektedir. Nanoparçacık konsantrasyonu bağlamında ise özellikle 75 ppm katkı seviyesinin hem performans parametrelerinde hem de emisyon çıktılarında en iyi sonuçları sunduğu göze çarpmaktadır.

Tablo 5. YYM analizinde kullanılan deneysel tasarım matrisi ve yanıt değerleri

	NP (ppm)	FOEB (bar)	FTV (%)	FÖYT (kg/kWh)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	Duman (m) ⁻¹
1	0	0.3	3.58	2.21	0.08	34	42	0.9
2	0	1	9.37	0.88	0.07	38	139	1.1
3	0	2	18.02	0.47	0.07	43	173	1.4
4	0	3	24.57	0.31	0.06	47	229	1.6
5	25	0.3	3.64	2.17	0.07	30	37	0.8
6	25	1	9.57	0.87	0.06	35	133	1
7	25	2	18.18	0.45	0.05	39	160	1.3
8	25	3	24.65	0.3	0.05	42	218	1.4
9	50	0.3	3.73	2.15	0.06	28	36	0.7
10	50	1	9.63	0.86	0.05	32	124	1
11	50	2	18.36	0.43	0.04	36	151	1.2
12	50	3	24.74	0.29	0.03	39	205	1.3
13	75	0.3	3.84	2.09	0.05	25	34	0.6
14	75	1	9.75	0.84	0.04	28	111	0.9
15	75	2	18.57	0.43	0.03	30	138	1.2
16	75	3	24.93	0.28	0.03	32	191	1.1
17	100	0.3	3.75	2.11	0.05	27	35	0.7
18	100	1	9.67	0.85	0.05	31	121	0.9
19	100	2	18.43	0.44	0.03	34	149	1.3
20	100	3	24.88	0.29	0.04	37	198	1.2

Geliştirilen ikinci dereceden (kuadratik) regresyon modellerinin istatistiksel anlamlılığını ve bağımsız giriş değişkenlerinin (NP ve FOEB) yanıtlar üzerindeki etki düzeylerini %95 güven aralığında belirlemek üzere ANOVA gerçekleştirilmiş ve elde edilen p-değerleri **Tablo 6**'da özetlenmiştir. İstatistiksel olarak $p < 0.05$ olan terimler, model üzerinde anlamlı bir etkiye sahip kabul edilmektedir. Ayrıca modellerin öngörü kabiliyetini gösteren belirleme katsayıları (R^2), %93.06 (CO) ile %99.90 (FTV) arasında değişmektedir. Elde edilen bu yüksek R^2 değerleri, oluşturulan matematiksel modellerin deneysel verilerdeki değişkenlik için yüksek açıklama kabiliyeti gösterdiğini desteklemektedir. Ayrıca ileriki optimizasyon aşaması için güvenilir bir tahmin altyapısı sunduğu değerlendirilmektedir.

Tablo 6 detaylı şekilde analiz edildiğinde, motor yükünü temsil eden FOEB faktörünün tüm performans ve emisyon parametreleri üzerinde hem doğrusal (lineer) hem de ağırlıklı olarak karesel (kuadratik) bağlamda ($p=0.000$) baskın bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Motorun temel performans göstergeleri olan FTV ve FÖYT üzerinde NP konsantrasyonunun lineer etkisinin istatistiksel eşğin üzerinde kalması (sırasıyla $p=0.088$ ve $p=0.631$), bu iki parametreyi asıl olarak motor yükünün domine ettiğini doğrulamaktadır. Buna karşın, Ni_2O_3 nanoparçacık katkısının istatistiksel olarak asıl çarpıcı ve anlamlı etkisi ($p=0.000$) CO, HC ve duman gibi yanma verimsizliğinden kaynaklanan emisyon gazları üzerinde ortaya çıkmıştır. Özellikle NP faktörünün karesel teriminin (NP^2); CO ($p=0.000$), HC ($p=0.001$) ve duman ($p=0.007$) üzerinde istatistiksel olarak yüksek düzeyde anlamlı bulunması son derece kritik bir bulgudur. Bu karesel etki, **Tablo 5**'te gözlemlenen; 75 ppm'e kadar azalma, 100 ppm'de etkinin doygunluğa ulaşp yataylaşma eğiliminin matematiksel bir kanıtıdır. Silindir içi reaksiyonlar açısından bu durum, metal oksit yapının belirli bir dozaja kadar katalitik oksidasyonu hızlandırarak eksik yanma ürünlerini başarıyla azalttığını, ancak aşırı dozajda (100 ppm) sıvı içerisindeki partikül aglomerasyonunun (topaklanma) artmasıyla bu katalitik etkinliğin sınırlandığını göstermektedir.

NOx emisyonları açısından değerlendirildiğinde ise, NP konsantrasyonunun lineer etkisinin ($p=0.035$) anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Bu veri, Ni_2O_3 ilavesinin silindir içerisindeki ısı transfer yeteneğini iyileştirerek lokal sıcak noktaların oluşumunu belirli bir ölçüde baskıladığını ve böylece NOx oluşum kinetiğini doğrudan etkilediğini göstermektedir. Öte yandan, **Tablo 6**'da tüm yanıt değişkenleri için ikili etkileşim teriminin ($NP*FOEB$) değerinin $p > 0.05$ çıkması, nanoparçacık ilavesinin emisyonlar üzerinde sağladığı iyileştirmelerin motor yükünden bağımsız çalıştığını ve katkı maddesinin kendi katalitik doğası gereği tüm çalışma rejimlerinde sisteme doğrusal bir fayda sunduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Tablo 7'de verilen ikinci dereceden YYM denklemleri, NP ve FOEB değişkenlerinin performans ve emisyon yanıtları üzerindeki etkilerini nicel olarak göstermektedir. Denklemler genel olarak FOEB artışının FTV'yi artırdığını, FÖYT'yi ise azalttığını ortaya koymaktadır. NP katkısı da

benzer şekilde performansı iyileştirici ve çoğu emisyon parametresini düşürücü yönde etkili olmuştur. Bununla birlikte, kuadratik terimlerin varlığı değişkenlerin etkisinin doğrusal olmadığını ve özellikle NP için belirli bir optimum aralığın bulunduğunu göstermektedir. Emisyon denklemlerinde NP'ye ait negatif katsayılar CO, HC, NOx ve duman değerlerinde genel bir azalma eğilimine işaret etmektedir. Sonuç olarak, geliştirilen modeller Eurodizel- Ni_2O_3 sisteminin davranışını başarılı şekilde temsil etmekte ve optimizasyon aşaması için uygun bir matematiksel temel sunmaktadır.

Tablo 6. Yanıt değişkenlerine ait lineer, kuadratik ve etkileşim terimlerinin p-değerleri

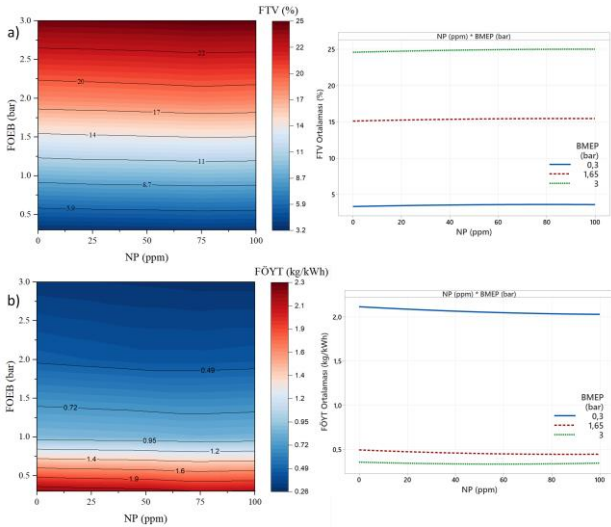
Faktörler	Lineer (NP)	Lineer (FOEB)	Kuadratik (NP^2)	Kuadratik ($FOEB^2$)	İkili Etkileşim ($NP*FOEB$)	R^2
FTV	0.088	0.000	0.511	0.000	0.738	99.90%
FÖYT	0.631	0.000	0.848	0.000	0.780	96.75%
CO	0.000	0.000	0.000	0.054	0.780	93.06%
HC	0.000	0.000	0.001	0.185	0.119	93.89%
NOx	0.035	0.000	0.35	0.007	0.351	95.30%
Duman	0.000	0.000	0.007	0.000	0.142	95.82%

Tablo 7. Eurodizel yakıtı için geliştirilen ikinci dereceden YYM denklemleri

EURODİZEL	
FTV (%)	$0.451 + 0.00675 NP + 9.916 FOEB - 0.000043 NP^2 - 0.6251 FOEB^2 + 0.00063 NP*FOEB$
FÖYT (kg/kWh)	$2.677 - 0.00160 NP - 1.993 FOEB + 0.000007 NP^2 + 0.4067 FOEB^2 + 0.000278 NP*FOEB$
CO (%)	$0.08851 - 0.00077 NP - 0.01717 FOEB + 0.000005 NP^2 + 0.00277 FOEB^2 + 0.000008 NP *FOEB$
HC (ppm)	$32.47 - 0.2156 NP + 6.92 FOEB + 0.001457 NP^2 - 0.667 FOEB^2 - 0.0172 NP*FOEB$
NOx (ppm)	$22.4 - 0.418 NP + 112.2 FOEB + 0.00337 NP^2 - 14.75 FOEB^2 - 0.097 NP*FOEB$
Duman (m^{-1})	$0.7109 - 0.00581 NP + 0.5472 FOEB + 0.000043 NP^2 - 0.0892 FOEB^2 + 0.000617 NP*FOEB$

Şekil 4'te sunulan kontur ve etkileşim grafikleri, NP konsantrasyonu ile FOEB değişkenlerinin FTV ve FÖYT üzerindeki birleşik etkisini ortaya koymaktadır. **Şekil 4a** incelendiğinde, FTV'nin özellikle FOEB artışıyla belirgin

biçimde yükseldiği, NP konsantrasyonundaki artışın ise bu eğilimi destekleyici fakat daha sınırlı bir katkı sağladığı görülmektedir. Kontur grafiğinde düşük yük ve düşük NP seviyelerinde yaklaşık %3.2–5.8 aralığında kalan FTV değerleri, yüksek yük ve yüksek NP bölgesine geçildikçe %23–25 bandına ulaşmaktadır. Deneysel sonuçlarla da uyumlu olarak, en yüksek FTV değeri 75 ppm NP ve 3 bar FOEB koşulunda %24.93 olarak elde edilmiştir. Sağ taraftaki etkileşim grafiğinde, tüm NP seviyelerinde 3 bar FOEB koşulunun 1 ve 1.65 bar seviyelerine göre belirgin biçimde daha yüksek FTV ürettiğini doğrulamaktadır. Elde edilen bu performans artışı, temelde Ni_2O_3 nanoparçacıklarının sunduğu yüksek katalitik aktivite ile doğrudan bağlantılıdır; zira bu katkı maddesi silindir içi oksidasyon reaksiyonlarını ivmelendirerek tutuşma gecikmesini minimize etmekte ve yanma evresini daha verimli hale getirmektedir [34]. Öte yandan, nanoparçacık dozajının 100 ppm seviyesine çıkarılmasıyla FTV'de gözlemlenen kısmi gerileme eğilimi, artan partikül yoğunluğunun sıvı içerisinde topaklanma (aglomerasyon) oluşturması ve bunun sonucunda gereğinden fazla ısı soğurularak yanma homojenliğinin bozulmasıyla açıklanmaktadır [31]. Nitekim güncel literatür araştırmaları da, nikel oksit tabanlı nanomalzemelerin olağanüstü geniş yüzey alanı/hacim oranları sayesinde yakıt damlacıklarının atomizasyon kalitesini artırdığını, ısı ve kütle transfer mekanizmalarını güçlendirerek dizel motorlarda termal verimi doğrudan yukarı taşıdığını doğrulamaktadır [12, 16].



Şekil 4. NP konsantrasyonu ve FOEB'nin performans parametreleri üzerindeki YYM tabanlı etkileri: a) FTV b) FÖYT

Şekil 4b'de verilen FÖYT grafiği, FTV ile ters yönlü bir davranış sergilemektedir. Düşük FOEB ve düşük NP düzeylerinde 2.0–2.3 kg/kWh aralığında olan yüksek FÖYT değerleri, yük arttıkça ve NP konsantrasyonu optimum bölgeye yaklaştıkça kademeli olarak azalarak 0.26–0.35 kg/kWh bandına düşmektedir. Deneysel verilerde, katkısız yakıtta 3 bar FOEB koşulunda 0.31 kg/kWh olan FÖYT değeri, 75 ppm NP ilavesiyle 0.28 kg/kWh düzeyine gerilemiştir. Etkileşim grafikleri de, özellikle yüksek yükte

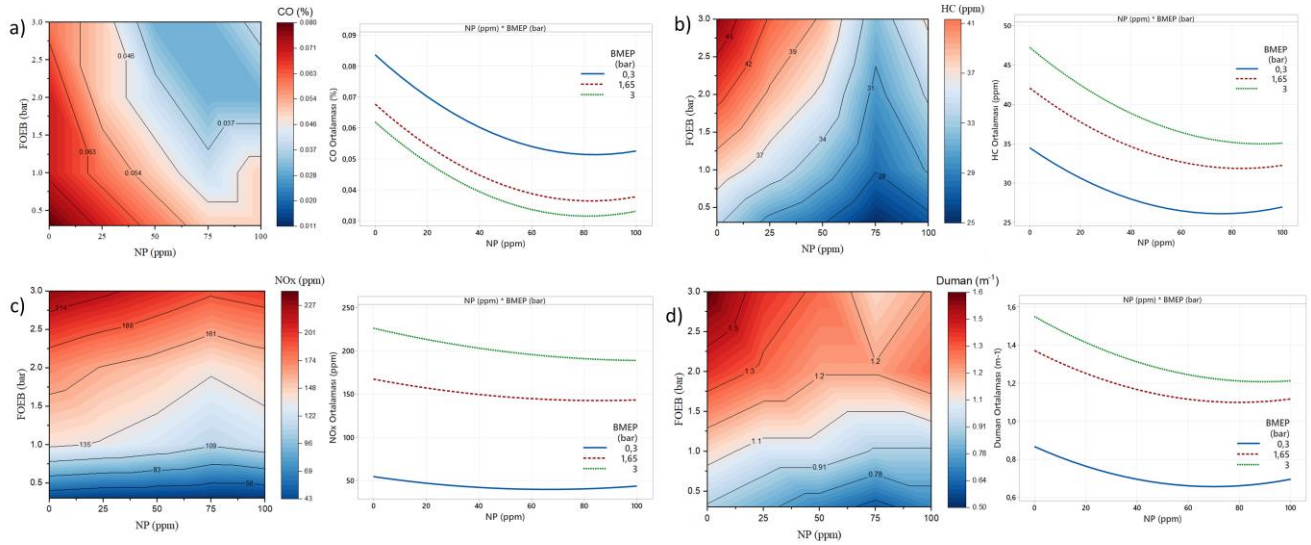
NP artışına bağlı olarak FÖYT eğrisinin aşağı yönlü seyrettiğini göstermektedir. Gözlemlenen bu belirgin yakıt tasarrufu, temelde metal oksit nanomalzemelerin yanma odasındaki oksijen moleküllerini daha homojen bir şekilde dağıtması, yüzeylerde oluşabilecek karbon birikintilerinin oksidasyon sürecini hızlandırması ve böylelikle çok daha eksiksiz bir yanma reaksiyonunu tetiklemesi ile açıklanmaktadır [35]. Buna paralel olarak mevcut literatürde, nikel oksit kökenli katkılar bu etkiyi yaratmaktadır [14].

Şekil 5'te verilen kontur ve etkileşim grafikleri, NP konsantrasyonu ile FOEB değişkenlerinin CO, HC, NO_x ve duman emisyonları üzerindeki birleşik etkisini göstermektedir. Şekil 5a incelendiğinde, CO emisyonunun hem NP konsantrasyonu arttıkça hem de FOEB yükseldikçe azaldığı görülmektedir. Düşük NP ve düşük-yük bölgesinde yaklaşık %0.08 seviyesine ulaşan CO değeri, yüksek NP ve yüksek FOEB koşullarında %0.03–0.04 aralığına kadar düşmektedir. Etkileşim grafikleri de tüm yük seviyelerinde NP artışının CO'yu aşağı yönlü etkilediğini, bu azalmanın özellikle yüksek yükte daha belirgin hale geldiğini göstermektedir. Söz konusu azalma, Ni_2O_3 nanoparçacıklarının katalitik etkisiyle yanma reaksiyonlarının daha etkin ilerlemesi ve yakıt-hava karışımının daha homojen hale gelmesiyle bağlantılıdır [36].

Şekil 5b'de HC emisyonunun NP konsantrasyonu arttıkça belirgin biçimde azaldığı, buna karşılık FOEB yükseldikçe arttığı görülmektedir. Kontur grafiğinde en yüksek HC değerleri düşük NP–yüksek FOEB bölgesinde yaklaşık 45–47 ppm düzeyine ulaşırken, en düşük değerler yüksek NP–düşük FOEB koşullarında 25–30 ppm bandında elde edilmiştir. Etkileşim eğrileri, NP ilavesinin tüm yüklerde HC'yi düşürdüğünü, ancak yüksek yük koşullarında bu etkinin daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Bu düşüş, Ni_2O_3 'ün katalitik aktivitesinin yanma sürecinde meydana gelen kararsız ara bileşiklerin daha etkin biçimde oksitlenmesini sağlamasıyla ilişkilendirilebilir [37].

Şekil 5c'de NO_x emisyonlarının FOEB artışıyla belirgin biçimde yükseldiği, NP konsantrasyonundaki artışla ise genel olarak azaldığı anlaşılmaktadır. NP ilavesi, özellikle orta ve yüksek yük bölgelerinde NO_x oluşumunu baskılayarak katkısız yakıtta göre daha düşük değerler sağlamıştır. Etkileşim grafiğinde de 3 bar FOEB çizgisinin en yüksek NO_x düzeylerini verdiği, ancak NP arttıkça bu eğrinin aşağı yönlü seyrettiği görülmektedir. Bununla birlikte, 100 ppm'de NO_x emisyonlarında hafif bir artışın yeniden ortaya çıkması, yüksek NP dozajlarında aglomerasyon ve ısıl davranıştaki değişimlerin yanma yapısını kısmen bozmasına bağlanabilir [38].

Şekil 5d'de duman emisyonunun FOEB ile arttığı, NP konsantrasyonu arttıkça ise azaldığı görülmektedir. Düşük NP ve yüksek yük koşullarında 1.5–1.6 m^{-1} seviyesine ulaşan duman değeri, yüksek NP katkısıyla birlikte özellikle düşük ve orta yüklerde 0.6–0.9 m^{-1} aralığına kadar gerilemiştir. Etkileşim grafikleri de tüm FOEB seviyelerinde NP artışının duman emisyonunu azaltıcı yönde etkili olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, Ni_2O_3 katkısının daha homojen atomizasyon ve daha etkin oksidatif yanma sağlayarak is oluşumunu baskıladığını göstermektedir.



Şekil 5. NP konsantrasyonu ve FOEB'nin emisyon parametreleri üzerindeki YYM tabanlı etkileri: a) CO b) HC c) NO_x d) Duman

3.2 Optimizasyon yaklaşımı ve deneysel doğrulama

Motorun kullanım amaçlarına, endüstriyel gereksinimlere ve çevresel regülasyonlara bağlı olarak değişen operasyonel hedefleri karşılayabilmek adına, bu çalışmada Tablo 8'de özetlenen beş farklı istatistiksel optimizasyon senaryosu kurgulanmıştır. Her bir model, sistemin performans ve emisyon yanıtlarına atanan önem derecelerinin (ağırlıklandırmaların) değiştirilmesiyle oluşturulmuş spesifik bir karar verme stratejisine dayanmaktadır.

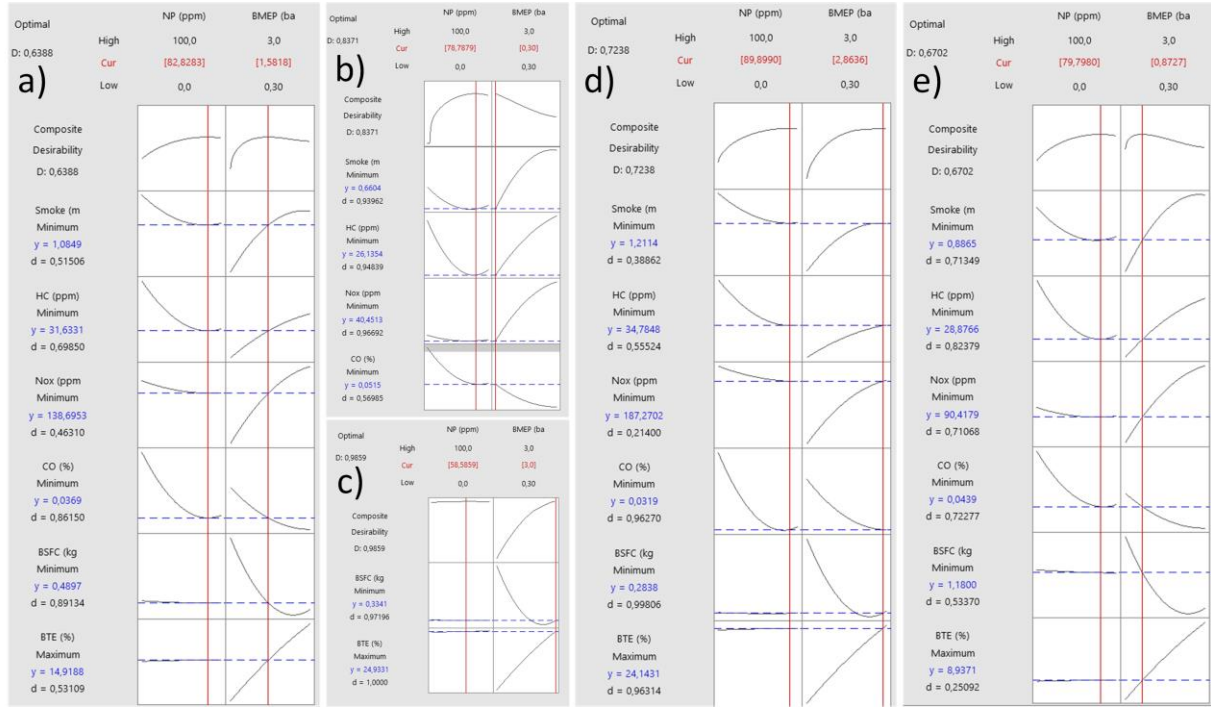
Tablo 8. Her bir modele ait optimizasyon kriterleri ve hedef yönleri

Girdiler	NP {0, 25,50,75,100} – FOEB {0.3, 1.0, 2.0, 3.0}					
Sabitler	Hedef	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5
FTV (%)	Max.	✓	*	-	✓	***
FÖYT(kg/kWh)	Min.	✓	*	-	✓	***
CO (%)	Min.	✓	*	✓	-	***
HC (ppm)	Min.	✓	*	✓	-	***
NOx (ppm)	Min.	✓	*	✓	-	***
Duman (m ⁻¹)	Min.	✓	*	✓	-	***

Model 1 (Dengeli Yaklaşım), hem termodinamik verimliliği hem de ekolojik etkileri eşdeğer düzeyde (*) önemseyerek, motorun genel optimizasyon noktasını arayan kompromis (uzlaşmacı) bir profildir. Model 2 (Çevre/Emisyon Odaklı), motorun performans çıktılarını önceliklendirmeden egzoz emisyonlarının azaltılmasına odaklanmaktadır. Model 3 (Performans Odaklı), FTV ve FÖYT temelli performans göstergelerini önceliklendirmektedir. Model 4 (Performans Ağırlıklı

Karma), tüm parametrelerin denkleme dâhil edildiği, ancak performans parametrelerine daha yüksek ağırlık (***) verilen karma bir senaryodur. Model 5 (Emisyon Ağırlıklı Karma), motor performansından bağımsız olarak tüm yanıtları içermekle birlikte egzoz emisyonlarına daha yüksek ağırlıklı verilen karma bir senaryodur. İleriye dönük farklı uygulama senaryolarına esneklik kazandıran bu çok yönlü modelleme sayesinde; Ni₂O₃ nanoparçacık konsantrasyonu ve motor yükü faktörlerinin hangi kombinasyonlarda en ideal sonuçları üreteceği nicel olarak saptanmıştır. Nihai amaç, belirlenen tüm senaryolarda saf Eurodizel-Ni₂O₃ yakıt karışımının termal verimliliğini üst sınırlara taşıırken, eksik yanma kaynaklı zararlı egzoz çıktılarını asgari seviyelerde sınırlandırabilmektir.

Şekil 6, NP katkılı Eurodizel yakıtı için oluşturulan beş farklı optimizasyon senaryosuna ait sonuçları göstermektedir. Grafikler birlikte değerlendirildiğinde, optimum NP miktarının modele bağlı olarak yaklaşık 58.58–89.89 ppm, FOEB değerinin ise 0.30–3.00 bar aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durum, optimum çalışma noktasının seçilen hedef fonksiyonuna doğrudan bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Dengeli yaklaşımı temsil eden Model 1'de optimum nokta 82.82 ppm NP ve 1.58 bar FOEB olarak belirlenirken, emisyon öncelikli Model 2'de düşük yük bölgesi öne çıkmış ve optimum değerler 78.78 ppm ile 0.30 bar olarak elde edilmiştir. Yalnızca performans odaklı Model 3 ise en yüksek yükte (3.00 bar) ve 58.58 ppm NP düzeyinde optimum sonuç vermiştir. Tüm yanıtların birlikte değerlendirildiği ancak performansa daha yüksek önem verilen Model 4'te optimum nokta 89.89 ppm NP ve 2.86 bar FOEB olarak bulunmuştur. Emisyon değişkenlerinin önceliklendirildiği Model 5'te ise optimum koşullar 79.79 ppm NP ve 0.87 bar FOEB düzeyinde gerçekleşmiştir. Bileşik uygunluk değerlerinin 0.63–0.98 aralığında değişmesi, geliştirilen optimizasyon senaryolarının kabul edilebilir düzeyde güvenilir sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 6. NP katkılı Eurodizel yakıtı için farklı senaryolara ait optimizasyon sonuçları: a) Model 1 b) Model 2 c) Model 3 d) Model 4 e) Model 5

Tablo 9’da, geliştirilen YYM modellerinin doğrulanmasına yönelik iki aşamalı yaklaşımın sonuçları sunulmaktadır. İlk aşamada, her bir model için arzu edilebilirlik fonksiyonu yardımıyla optimum NP konsantrasyonu ve FOEB değerleri belirlenmiş; ikinci aşamada ise bu çalışma noktaları deneysel olarak yeniden uygulanmıştır. Bu amaçla, ilgili NP dozajında hazırlanan yakıt karışımları belirlenen yük koşullarında test edilmiş, elde edilen deneysel sonuçlar model tahminleriyle karşılaştırılarak hata yüzdeleri hesaplanmıştır. Tablo 9’daki doğrulama sonuçları esas alındığında, ortalama hata

yüzdeleri Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 ve Model 5 için sırasıyla %4.05, %2.68, %5.95, %3.50 ve %5.72 olarak hesaplanmıştır. Tüm ortalama hata değerlerinin %7’nin altında kalması, önerilen modellerin deneysel verileri başarılı biçimde temsil ettiğini ve optimizasyon sonuçlarının güvenilir olduğunu göstermektedir [39]. En belirgin sapmaların bazı emisyon parametrelerinde, özellikle CO değerlerinde gözlenmesi ise bu parametrenin düşük mutlak büyüklüğü ve cihaz çözünürlüğüne bağlı olarak göreceli hatanın daha yüksek görünmesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo 9. Optimizasyon modellerinin deneysel doğrulama sonuçları

Model	NP (ppm)	FOEB (bar)	Bileşik Uygunluk	Durum	FTV (%)	FÖYT (kg/kWh)	CO (%)	HC (ppm)	NOx (ppm)	Duman (m ⁻¹)
1	82.82	1.58	0.63	O	14.91	0.48	0.036	31.63	138.69	1.08
				E	15.11	0.49	0.04	33.0	135.0	1.11
				Er %	1.3	2.1	11.1	4.3	-2.7	2.8
2	78.78	0.3	0.83	O	n/a	n/a	0.051	26.13	40.45	0.66
				E	n/a	n/a	0.05	25.0	41.0	0.64
				Er %	n/a	n/a	-2.0	-4.3	1.4	-3.0
3	58.58	3.0	0.98	O	24.93	0.33	n/a	n/a	n/a	n/a
				E	23.49	0.35	n/a	n/a	n/a	n/a
				Er %	-5.8	6.1	n/a	n/a	n/a	n/a
4	89.89	2.86	0.72	O	24.14	0.28	0.031	34.78	187.27	1.21
				E	23.03	0.27	0.03	33.0	191.0	1.24
				Er %	-4.6	-3.6	-3.3	-5.1	2	2.5
5	79.79	0.87	0.67	O	8.93	1.18	0.043	28.87	90.41	0.88
				E	9.24	1.27	0.04	27.0	94.0	0.93
				Er %	3.5	7.6	-7.0	-6.5	4.0	5.7

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

4 Sonuçlar

Bu çalışmada, saf Eurodizel yakıtına farklı konsantrasyonlarda ilave edilen Ni_2O_3 nanoparçacıklarının tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir dizel motorun performans ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş; elde edilen veriler YYM çerçevesinde modellenmiş ve optimize edilmiştir. Çalışmadan elde edilen temel bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Ni_2O_3 katkısı yakıtın yoğunluğunu ve kinematik viskozitesini artırırken alt ısı değerini ve parlama noktasını düşürmüştür; setan sayısında ise kademeli bir yükselme sağlamıştır. Bu değişimler, nanoparçacıkların yakıt ortamındaki katalitik ve termofiziksel etkileşimlerinin doğal bir yansımasıdır.
- Motor yükünün artmasıyla FTV yükselmiş, FÖYT azalmıştır. Ni_2O_3 katkısı bu eğilimi pekiştirmiş; 75 ppm NP ve 3 bar FOEB koşulunda referans yakıtı kıyasla FTV'de %1.46'lık oransal bir artış ve FÖYT'de %9.67'lik bir iyileşme (azalma) sağlanarak, en yüksek FTV değeri (%24.93) ve en düşük FÖYT değeri (0.28 kg/kWh) elde edilmiştir.
- CO, HC ve duman emisyonları, NP konsantrasyonunun artmasıyla birlikte tüm yük koşullarında gerilemiştir. Bu azalma, Ni_2O_3 'ün oksidatif katalitik etkisiyle yakıtın daha eksiksiz yanmasına bağlanmaktadır. En belirgin iyileşmeler 75 ppm katkı düzeyinde gözlemlenmiştir. Buna karşın, nanoparçacık dozajının 100 ppm seviyesine çıkarılmasıyla sıvı içerisinde partikül topaklanması (aglomerasyon) meydana gelmiş; bu durum yanma homojenliğini bozarak bazı performans ve emisyon değerlerinde kısmi bir gerilemeye neden olmuştur.
- NO_x emisyonu, motor yükü arttıkça yükselmiş; Ni_2O_3 katkısı ise özellikle orta yük bölgelerinde NO_x oluşumunu kısmen baskılamıştır. Yüksek NP dozajlarında (100 ppm) aglomerasyon etkisiyle NO_x 'te sınırlı bir artış yeniden gözlemlenmiştir.
- Geliştirilen ikinci dereceden YYM modelleri, R^2 değerleri %93.06 ile %99.90 arasında değişerek deneysel veriyi yüksek doğrulukla temsil etmiştir. ANOVA sonuçları, FOEB faktörünün tüm yanıtlar üzerinde baskın etkiye sahip olduğunu; NP faktörünün ise başta CO, HC ve duman olmak üzere emisyon parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı ($p < 0.05$) bir iyileştirici rol üstlendiğini ortaya koymuştur.
- Beş farklı optimizasyon senaryosu karşılaştırıldığında, tüm modellerde optimum NP konsantrasyonunun 58.58–89.89 ppm aralığında kümelendiği görülmüştür. Optimum FOEB ise seçilen hedefe göre 0.30 bar (emisyon öncelikli) ile 3.00 bar (performans öncelikli) arasında değişmiştir.
- Doğrulama deneylerinde tüm modeller için ortalama hata oranları %7'nin altında kalmış; bu sonuç geliştirilen matematiksel modellerin farklı işletme senaryolarında güvenilir tahmin kapasitesine sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Genel bir değerlendirme yapıldığında, Ni_2O_3 nanoparçacığının saf Eurodizel yakıtına katılması, herhangi bir motor modifikasyonu gerektirmeksizin hem yanma kalitesini hem de emisyon profilini iyileştiren uygulanabilir bir yakıt geliştirme stratejisi olarak öne çıkmaktadır. Elde edilen bulgular, nikel oksit tabanlı nanoparçacıkların alternatif yakıt harmanlarının ötesinde, ticari dizel yakıtlarında da etkin biçimde kullanılabileceğini göstermekte ve bu alanda yapılacak ileri araştırmalar için somut bir veri tabanı sunmaktadır.

Tüm bu bulgulara rağmen, bu çalışmanın belirli sınırlılıkları bulunmaktadır. Deneyler kararlı hal laboratuvar şartlarında gerçekleştirilmiş olup; uzun süreli motor dayanımı, yakıt enjektörlerinde meydana gelebilecek olası tıkanmalar, yanma odası yüzeylerindeki nanoparçacık birikimi, nano-yakıtın uzun vadedeki faz stabilite süresi ve gerçek sürüş koşullarındaki dinamik etkileri bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Ayrıca, yüksek yük koşullarında gözlenen NO_x artışının azaltılmasına yönelik olarak Ni_2O_3 katkılı yakıtların gelecekte EGR, su emülsiyonu veya benzeri NO_x azaltım stratejileriyle birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalarda bu kısıtlılıkların ele alınması, nano-katkılı yakıtların ticari ve endüstriyel boyutta uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır.

Teşekkür

Yazar, bu çalışmaya sağladığı teknik destek ve araştırma altyapısı için Batman Üniversitesi Otomotiv Araştırma Laboratuvarı'na teşekkürlerini sunar.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %9

Kaynaklar

- [1] Renewable energy progress tracker – Data tools, IEA <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewable-energy-progress-tracker> [Accessed September 23, 2025].
- [2] M. Maździel, "Vehicle emission models and traffic simulators: A review", *Energies* 16 (9), 3941, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16093941>.
- [3] C. Fetting, "The European green deal", *ESDN Report*, December 2(9), 53, 2020.
- [4] M. Bexell, K. Jönsson, "Responsibility and the United Nations' sustainable development goals", *Forum for Development Studies*, 44, pp.13–29, 2017. <https://doi.org/10.1080/08039410.2016.1252424>.
- [5] S.J.M. Algayyim, K. Saleh, A.P. Wandel, I.M.R. Fattah, T. Yusaf, H.A. Alrazen, "Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: A review", *Fuel*, 362, 130844, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130844>.
- [6] N. Joy, A. Mariadhas, H. Venugopal, R.R.R. Maria, J. Venugopal, J. Jayaraman, "Exploring the potential of nanoparticles in biofuel production: challenges and

- future directions – a comprehensive review", *Recent Patents on Mechanical Engineering* 18(2), 114–128, 2025. <https://doi.org/10.2174/0122127976287172240228162047>.
- [7] 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(1), 372–377, 2019. doi: 10.28948/ngumuh.517141.
- [8] S. Campili, M. Acharya, S.V. Channapattana, A.A. Pawar, S.V. Gawali, J. Hole, "The effect of nickel oxide nano-additives in azadirachta indica biodiesel-diesel blend on engine performance and emission characteristics by varying compression ratio", *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 40(2), e13514, 2021. <https://doi.org/10.1002/ep.13514>.
- [9] M. Sarno, E. Ponticorvo, D. Scarpa, "Novel Pt-Ni/NiO/Ni₂O₃ based electrodes for electrocatalytic biodiesel production from waste palm oil", *Materials Today: Proceedings*, 20, 69–73, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.012>.
- [10] N.-D. Jaji, H.L. Lee, M.H. Hussin, H.M. Akil, M.R. Zakaria, M.B.H. Othman, "Advanced nickel nanoparticles technology: From synthesis to applications", *Nanotechnology Reviews*, 9(1), 1456–1480, 2020. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0109>.
- [11] S.D. VijayaKumar, J. Zakaria, N. Ridzuan, "The role of Gemini surfactant and SiO₂/SnO/Ni₂O₃ nanoparticles as flow improver of Malaysian crude oil", *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 34(7), 384–390, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2021.03.009>.
- [12] C. Srinidhi, A. Madhusudhan, S.V. Channapattana, "Effect of NiO nanoparticles on performance and emission characteristics at various injection timings using biodiesel-diesel blends", *Fuel*, 235, 185–193, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.067>.
- [13] T. Hassan, M.M. Rahman, A.R. Adib, R.M. Meraz, M.A. Rahman, M.S.H.K. Tushar, "Effect of Ni and Al nanoadditives on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel-castor oil biodiesel-n-butanol blends", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100531, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100531>.
- [14] A. Keskin, M. Gürü, D. Altıparmak, "Biodiesel production from tall oil with synthesized Mn and Ni based additives: effects of the additives on fuel consumption and emissions", *Fuel*, 86 (7-8), 1139–1143, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.10.021>.
- [15] C. Srinidhi, A. Madhusudhan, "A diesel engine performance investigation fuelled with nickel oxide nano fuel-methyl ester", *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (2), 676–681, 2017.
- [16] A.T. Navinprasad, R. Prakash, J. Yoganandh, B. Meenakshipriya, K. Ramakrishnan, "Experimental investigation of nickel oxide nanomaterials with n-pentane diesel blends in compression ignition engine", In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, p.012126, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1070/1/012126>.
- [17] N. S. Sarvestani, M.H.A. Fard, M. Tabasizadeh, H. Nayebzadeh, P. Arora, P. Verma, T.C. Van, M. Jafari, T.A. Bodisco, Z. Ristovski, "Synthesis and evaluation of catalytic activity of NiFe₂O₄ nanoparticles in a diesel engine: An experimental investigation and Multi-Criteria Decision Making approach", *Journal of Cleaner Production*, 365, 132818, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132818>.
- [18] C. Özgür, "Influence of NiFe₂O₄ and Zn_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ nanoparticles on exhaust emissions of 4 stroke-6 cylinders turbocharged diesel engine", *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(1), 42–49, 2021. <https://doi.org/10.18245/ijaet.781493>.
- [19] S. Mandizadeh, O. Amiri, M. Salavati-Niasari, "Effects of the NiFe₂O₄ nano additive on the performance and emission characteristics of diesel engines: ultrasonic green synthesis by T3 hormone", *RSC Advances*, 11(44), 27701–27713, 2021. <https://doi.org/10.1039/D1RA04581D>.
- [20] A.S. Avci, S.F. Yavaşoğlu, "Performance, combustion, emission and optimization characteristics of biodiesel-n-butanol blends enriched with Ni₂O₃ nanoparticles in a diesel engine", *Scientific Reports*, 16, 5608, 2026. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-36115-y>.
- [21] Seda Fahriye Yavaşoğlu, "Impact of nickel (III) oxide nanoparticles on engine performance and emissions using biodiesel and n-butanol fuel blends in a diesel engine", Master Thesis, Batman University, Türkiye, 2026.
- [22] V.V. Kannan, B. Kanabar, J. Gowrishankar, A. Khatibi, S. Kamangar, A.I.A. Arabi, P. Thomai, J. Lozanović, "Artificial intelligence based prediction and multi-objective RSM optimization of tectona grandis biodiesel with elaeocarpus ganitrus", *Scientific Reports*, 15, 3833, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-87640-1>.
- [23] M.A. Kallioğlu, "Yanıt yüzey metodolojisi ile n-bütanol katkılı dizel karışımlarında Al₂O₃ nanoparçacık konsantrasyonunun optimizasyonu: Performans ve emisyon analizi", *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15, 1-10, 2026. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1800801>.
- [24] A. Bintravalli Suresh, M.P. G. C., S. Basanna Prakash, G. Thippeshnaik, O. David Samuel, "Optimizing engine performance and emission properties with Garcinia indica biodiesel: a holistic RSM-TLBO-DFA strategy", *Biofuels*, 16(5), 471–488, 2025. <https://doi.org/10.1080/17597269.2024.2437609>.
- [25] Nickel(III)Oxide (Ni₂O₃) Nanopowder/Nanoparticles, Purity: 99.95+ %, Size: 40 nm, *Nanografi Advanced Materials*. <https://shop.nanografi.com/nanoparticles/nickel-iii->

- oxide-ni2o3-nanopowder-nanoparticles-purity-99-95-size-40-nm/ [Accessed September 24, 2025].
- [26] A.İ. Vaizoğullar, "Facile preparation and characterization of NiO/Ni₂O₃-decorated nanoballs and mixed phase CdS nano rods (CdS&NiO/Ni₂O₃) for effective photocatalytic decomposition of Congo red under visible light irradiation", *Journal of Dispersion Science and Technology*, 42(9), 1408–1418, 2021.
<https://doi.org/10.1080/01932691.2020.1814804>.
- [27] T.D. Kumar, S.S. Hussain, D.K. Ramesha, "Effect of a zinc oxide nanoparticle fuel additive on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with cotton seed biodiesel blends", *Materials Today: Proceedings*, 26, 2374–2378, 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.509>.
- [28] M. Mehregan, M. Moghiman, "Effects of nano-additives on pollutants emission and engine performance in a urea-SCR equipped diesel engine fueled with blended-biodiesel", *Fuel*, 222, 402–406, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.172>.
- [29] 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*, 16(9), 1020–1035, 2025.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2480501>.
- [30] P. Mohammadi, A.M. Nikbakht, M. Tabatabaei, K. Farhadi, "A novel diesel fuel additive to improve fuel properties and to reduce emissions.", *International Journal of Automotive Engineering*, 2(3), 156–162, 2012.
- [31] R.A. Yetter, G.A. Risha, S.F. Son, "Metal particle combustion and nanotechnology", *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2), 1819–1838, 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.08.013>.
- [32] R.H. Vali, H.S. Pali, M.M. Ahmed, A.K. Singh, A. Kumar, A. Sharma, "Predictive modelling through RSM for diesel engine using Al₂O₃ nanoparticles fuel blends", *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 4935–4956, 2024.
<https://doi.org/10.1007/s13762-023-05317-6>
- [33] J.P. Holman, "Experimental methods for engineers", *McGraw-Hill Companies*, 8th ed, 2021.
- [34] L.T. De Luca, L. Galfetti, F. Severini, L. Meda, G. Marra, A.B. Vorozhtsov, V.S. Sedoi, V.A. Babuk, "Burning of nano-aluminized composite rocket propellants", *Combustion Explosion and Shock Waves*, 41(6), 680–692, 2005.
<https://doi.org/10.1007/s10573-005-0080-5>.
- [35] H. Venu, V.D. Raju, S. Lingesan, M.E.M. Soudagar, "Influence of Al₂O₃ nano additives in ternary fuel (diesel-biodiesel-ethanol) blends operated in a single cylinder diesel engine: Performance, combustion and emission characteristics", *Energy*, 215, 119091, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119091>.
- [36] V. Hariram, S. Seralathan, M. Rajasekaran, M.D. Kumar, S. Padmanabhan, "Effect of metallic nano-additives on combustion performance and emissions of DI CI engine fuelled with palmkernel methyl ester", *International Journal of Vehicle Structures & Systems* 9(2), 103, 2017. <https://doi.org/10.4273/ijvss.9.2.08>.
- [37] M. Opuz, A. Uyumaz, M. Babagiray, H. Solmaz, A. Calam, F. Aksoy, "The effects of metallic fuel addition into canola oil biodiesel on combustion, engine performance and exhaust emissions", *Journal of the Energy Institute*, 111, 101390, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101390>.
- [38] D.C. Rakopoulos, C.D. Rakopoulos, D.T. Hountalas, E.C. Kakaras, E.G. Giakoumis, R.G. Papagiannakis, "Investigation of the performance and emissions of bus engine operating on butanol/diesel fuel blends", *Fuel*, 89(10), 2781–2790, 2010.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.047>.
- [39] A. Mostafa, M. Mourad, A. Mustafa, I. Youssef, "Influence of aluminum oxide nanoparticles addition with diesel fuel on emissions and performance of engine generator set using response surface methodology", *Energy Conversion and Management: X*, 19, 100389, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100389>.

