

Dizel Yakıt Katkısı Olarak Nanopartikül Kullanımı



Editörler
Mehmet Şen
Alaattin Osman EMİROĞLU



BİDGE Yayınları

Dizel Yakıt Katkısı Olarak Nanopartikül Kullanımı

Editörler: Prof. Dr. Mehmet Şen & Prof. Dr. Alaattin Osman
EMİROĞLU

ISBN: 978-625-372-931-8

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.12.2025

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

DİZEL YAKITLARDA KULLANILAN NANOPARTİKÜL TÜRLERİ VE YAKIT ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ.....	4
---	---

AHMET KESKİN, ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU

DİZEL YAKITLARA NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN YANMA VE MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	27
---	----

MEHMET ŞEN, AHMET KESKİN

DİZEL YAKITLARA NANOPARTİKÜL İLAVESİNİN EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ.....	51
--	----

ALAATTİN OSMAN EMİROĞLU, MEHMET ŞEN

DİZEL YAKITLARDA KULLANILAN NANOPARTİKÜL TÜRLERİ VE YAKIT ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ

**Ahmet KESKİN¹
Alaattin Osman EMİROĞLU²**

Giriş

Nanopartikül katkıları, nano boyutları ve yüksek yüzey alanı nedeniyle yakıt içindeki kimyasal/termal süreçleri ve taşıma özelliklerini doğrudan etkileyebilir. Kullanılan nanopartikül türü, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerini, yanma mekanizmasını ve motor davranışını doğrudan etkilemektedir. Dizel yakıtı nanopartikül ilavesinde yaygın olarak kullanılan metal, metal oksit, karbon esaslı ve hibrit nanopartikül türleri; özellikleri, etki mekanizmaları ve literatürde rapor edilen uygulamalarıyla birlikte ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu kısımda, dizel yakıtlara yakıt katkısı olarak katılan nanopartikül türleri, bunların yakıt ile karıştırılma/dağıtılma yöntemleri, yakıt fizikokimyasal özelliklerine

¹ Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Orcid: 0000-0001-5306-0427

² Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Orcid: 0000-0003-1880-2186

etkileri, etki mekanizmaları, stabilite ve güvenlik/zararlılık sorunları hakkında kapsamlı bir çalışma sunulmuştur.

Nanopartikül Türleri

Nanopartikül katkılarının etkinliği, büyük ölçüde kullanılan nanopartikül türüne bağlıdır. Parçacık boyutu, yoğunluk, kimyasal yapı ve yüzey özellikleri; yanma verimi, emisyon karakteristikleri ve yakıt stabilitesi üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Aşağıda dizel yakıt katkısı olarak en çok çalışılan nanoparçacık sınıfları ile temel özellikleri özetlenmiştir.

Metal oksit nanopartiküller

Metal oksit nanopartikülleri, dizel yakıtı ilave edilen nanopartikül türleri arasında en yaygın kullanılan grubu oluşturmaktadır. Bunun temel nedeni, bu partiküllerin yüksek termal kararlılık, katalitik oksidasyon yeteneği ve oksijen taşıma kapasitesine sahip olmalarıdır.

Seryum Oksit (CeO_2)

Seryum oksit nanopartikülleri, dizel yakıtı ilave edilen en yaygın nanopartiküllerden biridir. Bu nanopartiküller, $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ redoks çifti sayesinde oksijen depolama ve salma yeteneğine sahiptir. Bu özellik, yanma sırasında oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırarak eksik yanmayı azaltmaktadır (Sajith vd., 2010).

Alüminyum Oksit (Al_2O_3)

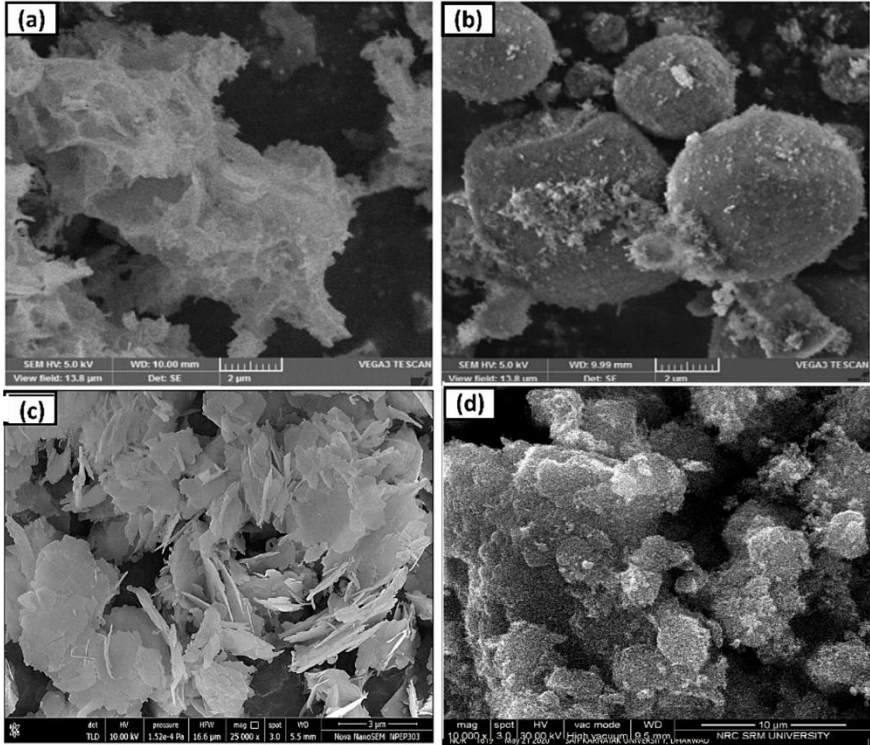
Alüminyum oksit nanopartikülleri, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde yanma odasında ısı transferini iyileştirmektedir. Bu durum, yakıt damlacıklarının daha hızlı buharlaşmasına ve daha homojen yanmaya katkı sağlamaktadır. Al_2O_3 nanopartiküllerinin doğrudan katalitik etkisi sınırlı olmakla

birlikte, fiziksel etkileri nedeniyle motor performansında iyileşmeler sağladığı bildirilmektedir.

Titanyum Dioksit (TiO_2)

Titanyum dioksit nanopartikülleri, oksidatif ve fotokatalitik özellikleriyle bilinir. Dizel yakıtta ilave edildiğinde, yanma sürecinde hidrokarbonların oksidasyonunu kolaylaştırarak tutuşma gecikmesini azaltabilmektedir (Örs vd., 2018).

Ayrıca, TiO_2 katkısının CO ve HC emisyonlarını düşürdüğü rapor edilmiştir (Sarma vd., 2023).



Şekil 1. Bazı nanopartiküllerin SEM fotoğrafları (a) Al_2O_3 (b) CeO_2 (c) ZnO (d) TiO_2 (Ul Haq vd., 2024)

Demir Oksit (Fe_2O_3 / Fe_3O_4)

Demir oksit nanopartikülleri, katalitik aktivite ve manyetik özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Yanma sırasında karbon oksidasyonunu hızlandırarak is oluşumunu azaltabilmektedir. Manyetik özellikleri, potansiyel olarak geri kazanım ve filtrasyon uygulamalarına da olanak sağlamaktadır.

Saf Metal Nanopartikülleri

Saf metal nanopartikülleri, metal oksitlere kıyasla daha yüksek reaktiviteye sahiptir. Ancak oksidasyon eğilimleri ve stabilite problemleri nedeniyle sınırlı kullanıma sahiptirler. Aşağıda dizel yakıt katkısı olarak en çok çalışılan saf metal nanopartikül türleri ve temel özellikleri verilmiştir.

Alüminyum (Al)

Alüminyum nanopartikülleri, yüksek özgül enerji içeriği sayesinde potansiyel bir enerji katkısı sunmaktadır. Ancak oksidasyon ve aglomerasyon eğilimleri nedeniyle dizel yakıt uygulamalarında dikkatli kullanım gerektirmektedir.

Bakır (Cu) ve Gümüş (Ag)

Bakır ve gümüş nanopartikülleri, yüksek termal iletkenlikleri ve katalitik özellikleri sayesinde yanma sürecini hızlandırabilmektedir. Bununla birlikte maliyet ve stabilite sorunları nedeniyle genellikle laboratuvar ölçekli çalışmalarda tercih edilmektedir.

Karbon Esaslı Nanopartiküller

Karbon Nanotüpler

Tek duvarlı ve çok duvarlı karbon nanotüpler, yüksek karbon içeriği ve elektriksel/termal iletkenlikleri sayesinde yanma kinetiğini

etkileyebilmektedir. Karbon nanotüp katkılı dizel yakıtların setan davranışı iyileşmekte ve tutuşma gecikmesi azalmaktadır.

Grafen ve Grafen Oksit

Grafen nanopartikülleri, yüksek yüzey alanları sayesinde yakıt molekülleriyle güçlü etkileşimler kurabilmektedir. Grafen oksit, yüzey fonksiyonel grupları sayesinde dispersiyon açısından avantaj sağlamaktadır.

Seramik ve Diğer Nanopartiküller

Silisyum dioksit (SiO_2) ve zirkonyum oksit (ZrO_2) gibi seramik nanopartiküller, genellikle stabilite ve tribolojik özellikleri iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Yanma üzerindeki etkileri sınırlı olmakla birlikte, yakıt sistemlerinde aşınmayı azaltıcı potansiyel sunmaktadırlar.

Hibrit ve Kompozit Nanopartiküller

Son yıllarda birden fazla nanopartikülün birlikte kullanıldığı hibrit nanopartikül sistemleri üzerine çalışmalar artmıştır. Örneğin Al_2O_3 -bornitrid(bN) veya karbon nanotüp–metal oksit kombinasyonları, katalitik ve termal etkilerin birlikte elde edilmesini sağlamaktadır (Ağbulut ve Sarıdemir, 2024).

Dizel Yakıt ile Nanopartikül Karışım ve Dispersiyon Yöntemleri

Nanopartiküllerin dizel yakıtı homojen ve uzun süreli stabil şekilde dağıtılması, uygulamadaki en büyük zorluklardan biridir. Yetersiz dispersiyon; yakıt sistemlerinde tortu oluşumu, filtre tıkanması ve enjektör hasarı gibi ciddi problemlere yol açabilmektedir. Nanopartiküllerin yüksek yüzey enerjisi ve güçlü van der Waals çekim kuvvetleri, dizel yakıt gibi düşük viskoziteli ve apolar ortamlarda agregasyon ve sedimentasyon problemlerini

beraberinde getirmektedir. Bu nedenle nanopartikül katkılı dizel yakıtların performansı ve güvenilirliği, büyük ölçüde uygulanan karışım ve dispersiyon yöntemlerine bağlıdır.

Dispersiyon stabilitesi aşağıdaki parametrelere bağlıdır:

- Nanopartikül boyutu ve şekli
- Yüzey kimyası ve yüzey yükü
- Dizel yakıtın viskozitesi ve polaritesi
- Kullanılan karıştırma enerjisi
- Yüzey aktif madde (sürfaktan) varlığı

Stabil bir dispersiyon elde etmek için partiküller arası çekim kuvvetlerinin azaltılması ve yakıt–partikül etkileşiminin artırılması gerekmektedir.

Aşağıda, dizel yakıtı nanopartikül ilavesinde kullanılan mekanik, fiziksel ve kimyasal dispersiyon yöntemleri; temel prensipleri, avantaj–dezavantajları ve literatürdeki uygulamalarıyla birlikte ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Mekanik Karıştırma Yöntemleri

Mekanik karıştırma, nanopartiküllerin dizel yakıt içerisinde dağıtılması amacıyla kullanılan en temel yöntemdir. Bu yöntemde manyetik karıştırıcı veya pervaneli karıştırıcılar kullanılarak belirli bir süre boyunca karışım sağlanır (Kesharvani vd., 2023).

Bu yöntem, düşük maliyeti ve kolay uygulanabilirliği nedeniyle ön karışım aşamasında tercih edilmektedir. Ancak mekanik karıştırma, nanopartikül agregalarını parçalayacak yeterli enerji sağlayamadığından uzun süreli stabilite açısından yetersiz kalmaktadır.

Ultrasonik Dispersiyon (Sonikasyon)

Ultrasonik dispersiyon, dizel yakıtı nanopartikül ilavesinde literatürde en yaygın kullanılan yöntemdir. Ultrasonik dalgalar sıvı ortamda kavitasyon kabarcıkları oluşturarak bu kabarcıkların çökmesi sırasında yüksek lokal basınç ve sıcaklık meydana getirir. Bu etki, nanopartikül agregalarının parçalanmasını sağlar (Alsaffar vd., 2023).

Çeşitli çalışmalarda ultrasonik prob veya ultrasonik banyo kullanılarak, 20–40 kHz frekans aralığında ve 30–90 dakika süreyle homojen dispersiyon elde edildiği rapor edilmiştir (Çılğın, 2025). Ancak tek başına sonikasyon, uzun süreli stabilite için genellikle yeterli olmamaktadır.

Yüzey Aktif Maddeler (Surfactant) ile Dispersiyon

Yüzey aktif maddeler, nanopartikül yüzeyine adsorbe olarak elektrostatik itme veya sterik engelleme mekanizmalarıyla agregasyonu önler. Dizel yakıt uygulamalarında genellikle iyonik olmayan aktif maddeler tercih edilmektedir.

Oleik asit, Span 80 ve Tween 80 gibi maddeler, metal oksit nanopartiküllerinin dizel yakıt içerisinde stabil şekilde dağılmasını sağlamaktadır (Baskar vd., 2024). Bununla birlikte aktif madde miktarının iyi optimize edilmesi gerekmektedir. Aşırı kullanım yanma karakteristiklerini olumsuz etkileyebilmektedir.

Sonikasyon ve Yüzey Aktif Madde Kombinasyonu

Literatürde en başarılı dispersiyon yöntemi, ultrasonik dispersiyonun uygun bir sürfaktan ile birlikte kullanılmasıdır (Vellaiyan vd., 2019). Bu kombinasyon hem agregaların fiziksel olarak parçalanmasını hem de yeniden birleşmelerinin engellenmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle hazırlanan nanopartikül

katkılı dizel yakıtların haftalar hatta aylar boyunca stabil kaldığı birçok çalışmada rapor edilmiştir.

Yüksek Basınçlı Homojenizatörler

Yüksek basınçlı homojenizatörler, karışımı dar kanallardan yüksek basınç altında geçirerek güçlü kesme kuvvetleri oluşturur. Bu yöntem, endüstriyel ölçekte homojen ve ince dispersiyonlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak yüksek maliyet ve ekipman gereksinimi nedeniyle laboratuvar çalışmalarında sınırlı kullanıma sahiptir.

Yüzey Fonksiyonelleştirme (Kimyasal Modifikasyon)

Nanopartiküllerin yüzeyinin önceden kimyasal olarak modifiye edilmesi, dizel yakıt ile uyumunu artıran etkili bir yaklaşımdır. Farklı katkılarla fonksiyonelleştirilen nanopartiküller, sürfaktan kullanımına gerek kalmadan uzun süreli stabilite sağlayabilmektedir.

Nanopartiküllerin Yakıtın Fiziksel-Kimyasal Özelliklerine Etkileri

Yakıtın temel fiziksel ve kimyasal özellikleri motor sistemlerinin çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Çünkü bu parametreler yakıtın enjeksiyon, atomizasyon ve yanma süreçlerini doğrudan etkiler. Nanopartikül ilavesi yakıtın yoğunluk, viskozite, depolama/stabilite, ısı değeri (calorific value), parlama noktası ve setan sayısı gibi özelliklerini etkileyebilir. Bu etkiler genellikle dozaja, nanopartikül türüne, kaplama/dağıtım yöntemine bağlıdır.

Yakıt Yoğunluğu ve Viskositesine Etkileri

Dizel yakıtın performansını ve motorla uyumunu belirleyen fiziksel özellikler arasında yoğunluk (kg/m^3) ve viskozite (mm^2/s) en önemli parametrelerdendir. Yakıt yoğunluğu, enjektörün püskürtme

hacmini ve hava–yakıt oranını doğrudan etkilerken; viskozite yakıtın akışkanlık karakterini ve atomizasyon kalitesini belirler (Balaji ve Cheralathan, 2017). Nanopartikül katkıları bu parametrelerde artış veya azalış eğilimleri yaratabilir; ancak etki genellikle katkı tipi, konsantrasyon ve dispersiyon stabilitesine bağlı olarak değişir.

Nanopartiküllerin yakıt yoğunluğu üzerine etkisi genel olarak iki ana faktöre bağlıdır (birincil partikül yoğunluğu ve katkı miktarı):

Nanopartiküller metal veya metal oksit esaslı olduklarından, parçacık yoğunluğu saf dizel yakıtın yoğunluğundan genellikle daha yüksektir, bu nedenle karışıma eklenen nanopartiküller yakıtın toplam yoğunluğunu artırma eğilimindedir (Kannaiyan vd., 2017).

Çeşitli nanopartikül tipleri kullanıldığında, yoğunluk artışı nanoparçacık yoğunluğu ile ilişkilidir; örneğin daha yüksek yoğunluklu seryum oksit veya alüminyum oksit nanopartikülleri, daha düşük yoğunluklu silika nanopartiküllerine kıyasla yakıtın yoğunluğunu daha fazla artırabilir.

Bununla birlikte, bazı çalışmalarda nanopartikül eklemesinin yoğunluk üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı da rapor edilmiştir; örneğin bakır oksit (CuO) ve benzeri nanopartiküllerin ppm düzeylerinde dizel yakıtın yoğunluğunu anlamlı ölçüde değiştirmedeği gözlenmiştir (Ağbulut vd., 2021).

Bu farklılık, nanopartikül yükleme, dispersiyon stabilitesi ve ölçüm tekniklerinin heterojenliğinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak literatürde, hafif artış eğilimi daha yaygın şekilde bildirilse de düşük konsantrasyonlarda bu değişimin pratik motor performansı üzerinde minimal olduğu belirtilmektedir.

Yakıt viskozitesi, atomizasyon kalitesi ve yakıt hattındaki akış karakteristiği için kritik bir parametredir. Nanopartikül katkı

maddelerinin viskozite etkisi üzerine literatürde karışık bulgular mevcuttur:

Bazı çalışmalarda, nanopartiküllerin düşük ppm düzeylerinde dizel yakıt viskozitesini hafifçe düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu olgu, nanopartiküllerin yakıt içerisinde akışkan tabakalar arasında kayganlaştırıcı etki göstermesi ve daha etkin atomizasyon sağlayarak akışkan davranışını iyileştirmesi ile ilişkilendirilmektedir.

Diğer yandan farklı nanoparçacık tiplerinde ya da daha yüksek konsantrasyonlarda viskozitede artış gözlemlenmiştir. Bu artış, nanopartiküllerin yakıt matrisi içerisinde parçacık–parçacık etkileşimleri ve süspansiyonun etkin hacmindeki artış nedeniyle olabilir. Örneğin seryum oksit nanopartiküllerinin ilavesiyle viskozitenin arttığı rapor edilmiştir (Selvan vd., 2014). Fakat bu çalışmaların çoğunda viskozite değişimi, motorun yakıt sistemleri tarafından tolere edilebilecek ölçekte kalmıştır. Ayrıca katkı konsantrasyonu ve sıcaklık gibi çevresel faktörler viskozite üzerindeki etkinin büyüklüğünü belirler; yüksek sıcaklıklarda yakıt viskozitesi genel olarak düşer ve bu etki nanopartikül ilavesiyle de devam edebilir.

Yakıt Isıl Değerine Etkileri

Dizel yakıtın enerji içeriği, motorun üretebileceği güç ve yakıt tüketimi üzerinde doğrudan belirleyici bir parametredir. Yakıtın ısıl değeri, birim kütle başına açığa çıkan toplam kimyasal enerjiyi ifade etmekte olup genellikle üst ısıl değer (HHV) ve alt ısıl değer (LHV) olarak tanımlanmaktadır. Üst ısıl değer, yakıtın tam yanması sonucunda oluşan suyun yoğunlaşması dahil olmak üzere açığa çıkan toplam enerjiyi ifade ederken; alt ısıl değer, suyun buhar fazında kaldığı varsayımıyla hesaplanan enerjiyi temsil etmektedir. Dizel motor uygulamalarında pratikte alt ısıl değer esas

alınmaktadır. Saf dizel yakıtın alt ısııl değeri tipik olarak 42–43 MJ/kg aralığındadır. Yakıtın bileşimi, hidrojen–karbon oranı ve safsızlıklar bu değeri etkileyen temel faktörlerdir.

Nanopartikül katkıların yakıtın alt ve üst ısııl değeri üzerindeki etkileri, motor performansı ve özgül yakıt tüketimi açısından kritik öneme sahiptir. Nanopartiküller, genellikle metal veya metal oksit esaslı olup kendi başlarına yüksek kimyasal enerji içeriğine sahip yakıtlar değildir. Buna rağmen literatürde nanopartikül katkılı dizel yakıtların etkin ısııl değerinin arttığı veya yanma veriminin iyileştiği rapor edilmiştir. Bu durum, nanopartiküllerin doğrudan enerji katkısından ziyade, yanma sürecini iyileştirici etkileriyle ilişkilendirilmektedir.

Nanopartikül katkısının yakıtın ısııl değeri üzerindeki etkisi, aşağıdaki mekanizmalar çerçevesinde değerlendirilmelidir:

Metal oksit nanopartiküller (Al_2O_3 , CeO_2 , TiO_2 gibi) yanıcı değildir ve dolayısıyla yakıtın kimyasal enerji içeriğine doğrudan katkı sağlamazlar. Hatta teorik olarak, yüksek yoğunluklu ancak yanmayan bir fazın yakıtı eklenmesi, birim kütle başına düşen kimyasal enerji miktarını hafifçe azaltabilir. Fakat kullanılan nanopartikül miktarları genellikle ppm seviyesinde olduğundan, bu teorik azalma pratikte ihmal edilebilir düzeydedir.

Literatürde nanopartikül katkılı dizel yakıtların etkin ısııl değerinin arttığı sıklıkla rapor edilmektedir. Bu artış, yakıtın gerçek kimyasal ısııl değerinden ziyade, yanma sırasında açığa çıkan enerjinin daha yüksek oranda mekanik işe dönüştürülmesiyle ilişkilidir. Özellikle seryum oksit (CeO_2) nanopartikülleri, oksijen depolama ve salma kabiliyeti sayesinde yanma sırasında oksidasyonu hızlandırmakta ve eksik yanmayı azaltmaktadır. Bu durum, yakıtın efektif enerji kullanımını artırarak motor performansına olumlu yansımaktadır (Farkade ve Pathre, 2012).

Nanopartiküller, yanma odasında lokal sıcaklık artışlarına neden olarak mikro-patlama benzeri etkiler oluşturabilmektedir. Bu etki, yakıt damlacıklarının daha küçük parçalara ayrılmasını sağlayarak yanma yüzey alanını artırır.

Gelişmiş atomizasyon ve daha homojen hava–yakıt karışımı, yakıtın kimyasal enerjisinin daha büyük bir kısmının açığa çıkmasını sağlayarak görünür ısıl değerde artış algısı oluşturmaktadır.

Bazı çalışmalarda ise yüksek oranlı nanopartikül katkılarında (ağırlıkça yüzde 0,1’den büyük) ölçülen alt ısıl değerde çok sınırlı düşüşler gözlemlenmiştir. Ancak bu katkı oranları pratik motor uygulamaları için önerilmemektedir.

Nanopartikül türü, ısıl değer üzerindeki dolaylı etkiyi belirleyen önemli bir parametredir:

- CeO_2 : Oksijen tamponlama özelliği sayesinde etkin enerji kullanımını artırır.
- Al_2O_3 : Yüksek termal iletkenlik ile yanma hızını artırır.
- TiO_2 : Fotokatalitik ve oksidatif özellikleriyle yanma sürecini iyileştirir.
- Karbon nanotüpler: Yüksek karbon içeriği nedeniyle çok sınırlı da olsa doğrudan enerji katkısı potansiyeline sahiptir.

Sonuç olarak, nanopartiküllerin dizel yakıtı katkıları, doğrudan bir enerji katkısından ziyade, yanma sürecini optimize eden katalitik bir rol üstlenmektedir.

Setan Sayısına Etkileri

Dizel motorlarda yanma süreci, yakıtın püskürtülmesi ile tutuşması arasındaki tutuşma gecikmesi (ignition delay) süresine

büyük ölçüde bağlıdır. Setan sayısı, dizel yakıtın kendiliğinden tutuşma eğilimini ifade eden boyutsuz bir parametre olup, yüksek setan sayılı yakıtlar daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha düzgün yanma karakteristiği sergilemektedir. Modern dizel motorlar için setan sayısının genellikle 48–55 aralığında olması istenmektedir.

Son yıllarda nanopartiküllerin dizel yakıtı katkı maddesi olarak kullanılması, yalnızca yanma verimi ve emisyonlar açısından değil, aynı zamanda yakıtın setan sayısı üzerindeki dolaylı etkileri açısından da yoğun şekilde araştırılmaktadır. Nanopartiküller, doğrudan kimyasal setan artırıcılar (örn. 2-etil hekzil nitrat) gibi davranmamakla birlikte, yanma sürecini hızlandırıcı ve oksidasyonu kolaylaştırıcı etkileri sayesinde etkin (görünür) setan sayısında artış meydana getirebilmektedir. Bu durum, özellikle metal ve metal oksit nanopartikülleri için literatürde sıklıkla rapor edilmiştir.

Nanopartikül katkılarının setan sayısı üzerindeki etkisi, doğrudan kimyasal bir artıştan ziyade, yanma kinetiği ve tutuşma davranışı üzerindeki dolaylı etkiler yoluyla gerçekleşmektedir.

Nanopartiküller, yanma odasında lokal sıcaklık artışlarına ve daha hızlı radikal oluşumuna neden olarak tutuşma gecikmesini kısaltabilmektedir. Özellikle metal oksit nanopartiküller, oksijen taşıma ve serbest bırakma yetenekleri sayesinde düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmaktadır. Bu etki, motor testlerinde setan sayısının artmış gibi davranmasına, yani görünür setan sayısının yükselmesine neden olmaktadır.

CeO_2 , Fe_2O_3 ve TiO_2 gibi nanopartiküller, katalitik yüzeyleri sayesinde yakıt moleküllerinin oksidasyonunu kolaylaştırmaktadır. Bu durum, ön-alev reaksiyonlarının hızlanmasına ve daha erken tutuşmaya yol açmaktadır.

Nanopartiküllerin varlığı, yakıt damlacıklarının ısı transferini hızlandırarak mikro-patlama benzeri etkiler

oluşturabilmektedir. Daha iyi atomizasyon, yakıtın hava ile daha hızlı karışmasını sağlayarak tutuşma gecikmesini azaltır. Bu mekanizma dolaylı olarak setan sayısının artmış gibi algılanmasına neden olmaktadır.

Nanopartikül türü, setan sayısı üzerindeki etkiyi belirleyen temel parametrelerden biridir:

- CeO_2 : Oksijen depolama–salma özelliği sayesinde en belirgin tutuşma iyileştirmesini sağlar.
- Al_2O_3 : Yüksek termal iletkenlik ile erken tutuşmayı destekler.
- TiO_2 : Oksidatif reaksiyonları hızlandırarak tutuşma gecikmesini azaltır.
- Karbon nanotüpler: Sınırlı da olsa doğrudan enerji ve karbon katkısı ile setan davranışını iyileştirebilir.

Nanopartikül Yakıt Karışımlarında Stabilite ve Sedimentasyon Durumu

Nanopartikül katkılı dizel yakıtların pratik uygulamalarını sınırlayan en temel sorunlardan biri, karışımın stabilitesi ve zamanla meydana gelen sedimentasyon eğilimidir. Nanopartiküller, yüksek özgül yüzey alanları ve yüzey enerjileri nedeniyle termodinamik olarak kararsız sistemler oluşturma eğilimindedir. Dizel yakıt gibi düşük viskoziteli ve apolar ortamlarda bu kararsızlık, agregasyon ve çökme (sedimentasyon) şeklinde kendini göstermektedir. Karışım stabilitesinin yetersiz olması; yakıt filtresi tıkanması, enjektör aşınması ve düzensiz yanma gibi ciddi motor problemlerine yol açabilmektedir. Bu nedenle nanopartikül katkılı dizel yakıtların güvenli ve sürdürülebilir şekilde kullanılabilmesi, stabilite ve sedimentasyon davranışlarının ayrıntılı biçimde anlaşılmasını zorunlu kılmaktadır (Mukherjee vd., 2022).

Stabilite Kavramı ve Tanımı

Nanopartikül katkılı dizel yakıtlarda stabilite, nanopartiküllerin belirli bir süre boyunca homojen şekilde dağılmış halde kalabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Bu süre; uygulamaya bağlı olarak saatler, günler veya aylar mertebesinde değerlendirilmektedir.

Stabil bir süspansiyon sisteminde:

- Parçacıklar arasında kalıcı agregasyon oluşmaz
- Çökelme hızı minimumdur
- Yakıtın fiziksel özellikleri (yoğunluk, viskozite) zamanla değişmez

Bu koşulların sağlanamaması durumunda sedimentasyon kaçınılmaz hale gelmektedir.

Sedimentasyon Mekanizmaları

Nanopartiküller arasındaki van der Waals çekim kuvvetleri, elektrostatik itmelerden baskın hale geldiğinde agregasyon meydana gelir. Agregalar büyüdükçe etkin parçacık çapı artar ve çökelme eğilimi hızlanır. Parçacık boyutu ve yoğunluk farkı sedimentasyon üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

Stabilite ve Sedimentasyonu Etkileyen Faktörler

Daha küçük nanopartiküller daha yavaş çöker. Küresel olmayan parçacıklar daha kararlı süspansiyonlar oluşturabilir. Metal oksit nanopartiküller yüksek çökelme eğilimi gösterir

Dizel yakıtın düşük viskozitesi, nanopartiküllerin askıda kalmasını zorlaştırmaktadır. Ayrıca dizelin apolar yapısı, elektrostatik stabiliteyi sınırlamaktadır.

Düşük ppm seviyelerinde stabilite daha kolay sağlanırken, konsantrasyon arttıkça parçacık–parçacık etkileşimleri artmakta ve sedimentasyon hızlanmaktadır.

Stabiliteyi Artırmaya Yönelik Yaklaşımlar

Ultrasonik sonikasyon, nanopartikül agregalarını fiziksel olarak parçalayarak başlangıç dispersiyonunu iyileştirir. Ancak tek başına uzun süreli stabilite için yeterli değildir.

Oleik asit, Span 80 ve Tween 80 gibi sürfaktanlar, nanopartikül yüzeyinde elektrostatik engelleme oluşturarak agregasyonu önlemektedir.

Sürfaktan kullanımının avantajları:

- Sedimentasyon süresini uzatır
- Homojenlik sağlar

Dezavantajları:

- Yanma karakteristiğini değiştirebilir
- Fazla kullanım tortu oluşturabilir

Nanopartiküllerin yüzeyinin önceden kimyasal olarak modifiye edilmesi, dizel yakıt ile uyumunu artıran en etkili yöntemlerden biridir.

Literatürde en başarılı stabilite, sonikasyon + sürfaktan + uygun konsantrasyon kombinasyonu ile elde edilmiştir. Bu yaklaşım, haftalar hatta aylar boyunca stabil karışımlar elde edilmesini mümkün kılmaktadır.

Sonuç olarak dizel yakıtı nanopartikül ilavesinde stabilite ve sedimentasyonun sistemin uygulanabilirliğini belirleyen temel faktörler olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Yetersiz stabilite,

nanopartikül katkılarının potansiyel faydalarını ortadan kaldıracıdır. En etkili yaklaşım, uygun nanopartikül seçimi, kontrollü konsantrasyon ve hibrit dispersiyon–stabilizasyon yöntemlerinin birlikte uygulanmasıdır.

Nanopartikül İlavesinin Yanma Mekanizmalarına Etkileri

Dizel motorlarda yanma süreci, karmaşık fiziksel ve kimyasal olayların eşzamanlı olarak gerçekleştiği çok fazlı bir sistemdir. Yakıt püskürtülmesi, atomizasyon, buharlaşma, hava-yakıt karışımı ve kimyasal reaksiyonlar yanma karakteristiğini belirleyen temel adımlardır.

Nanopartiküllerin dizel yakıtta ilavesi, bu süreçlerin her birine doğrudan veya dolaylı olarak etki etmektedir. Yüksek özgül yüzey alanı, katalitik aktivite ve termofiziksel özellikler, nanopartiküllerin yanma mekanizmalarını klasik yakıt katkılarından farklı bir boyuta taşımasını sağlamaktadır.

Yakıt Atomizasyonu ve Damlacık Dinamiği Üzerine Etkiler

Yakıt atomizasyonu, dizel motor yanmasının ilk ve en kritik aşamalarından biridir. Nanopartikül ilavesi, yakıtın yoğunluk ve viskozite değerlerinde küçük değişimlere yol açarak püskürtme karakteristiğini etkilemektedir. Özellikle düşük konsantrasyonlarda nanopartikül katkısı, püskürtme sırasında daha ince damlacıkların oluşmasına katkı sağlayabilmektedir.

Nanopartiküllerin damlacık içinde homojen dağılması, yüzey gerilimi üzerinde lokal değişimler oluşturarak damlacık parçalanmasını kolaylaştırmaktadır.

Nanopartikül içeren yakıt damlacıklarında, parçacıkların ısıyı absorbe etme ve lokal sıcaklık artışı oluşturma kabiliyeti, mikro-patlama olgusunu tetikleyebilmektedir. Bu durum,

damlacıkların daha küçük alt damlacıklara ayrılmasına neden olarak hava-yakıt karışımını iyileştirmektedir.

Buharlaştırma ve Isı Transferi Mekanizmaları

Nanopartiküller, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde yakıt damlacıkları içinde ısı transferini hızlandırmaktadır. Bu özellik, yakıtın buharlaştırma süresini kısaltmakta ve tutuşmaya hazır karışımın daha hızlı oluşmasını sağlamaktadır. Metal oksit nanopartiküller damlacık içerisindeki ısı dağılımını homojenleştirmekte ve buharlaştırma hızını artırmaktadır.

Tutuşma Gecikmesi Üzerine Etkiler

Tutuşma gecikmesi, dizel yanmasının kimyasal ve fiziksel kontrolünü yansıtan temel bir parametredir. Nanopartikül katkılı yakıtlarda tutuşma gecikmesinin genellikle azaldığı gözlemlenmektedir.

Bu etkinin temel nedenleri şunlardır:

- Nanopartiküllerin katalitik oksidasyon etkisi
- Lokal sıcaklık artışı
- Reaktif radikal oluşumunun hızlanması

Özellikle CeO_2 ve Fe_2O_3 gibi metal oksit nanopartikülleri, oksijen depolama kapasiteleri sayesinde düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmaktadır.

Kimyasal Reaksiyon Kinetiği ve Katalitik Etkiler

Nanopartiküller, yanma sırasında katalizör gibi davranarak hidrokarbon zincirlerinin parçalanmasını ve oksidasyonunu hızlandırmaktadır. CeO_2 nanopartiküllerinde görülen $\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ redoks mekanizması, oksijen transferini kolaylaştırarak CO ve HC oksidasyonunu teşvik etmektedir

Yanma sırasında oluşan $\text{OH}\cdot$, $\text{H}\cdot$ ve $\text{O}\cdot$ gibi radikaller, alev yayılımını belirleyen anahtar türlerdir. Nanopartiküllerin yüksek yüzey alanı, bu radikallerin oluşumunu ve reaksiyonlara katılımını artırabilmektedir.

Alev Yayılımı ve Yanma Hızı

Nanopartikül ilavesi, alev hızının artmasına ve daha kararlı bir yanma sürecinin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Artan alev hızı, yanmanın daha kısa krank açısı aralığında tamamlanmasını sağlayarak termal verimi artırmaktadır.

Karbon nanotüp ve grafen gibi karbon esaslı nanopartiküller, yüksek ısı iletkenlikleri sayesinde alev çekirdeğinin daha hızlı büyümesine katkıda bulunmaktadır.

Isı Yayılım Hızı

Nanopartikül katkılı yakıtlarda, maksimum ısı açığa çıkma oranı daha erken krank açılarındaki gerçekleşmektedir. Bu durum, yanma fazının daha kontrollü ve verimli olmasını sağlamaktadır.

Yanma Mekanizmaları Üzerindeki Olumsuz Etkiler ve Sınırlamalar

Her ne kadar nanopartikül katkıları yanma mekanizmalarını iyileştirse de bazı potansiyel olumsuzluklar da rapor edilmiştir:

- Aglomerasyon ve düzensiz yanma
- Enjektör tıkanması riski
- Aşırı katalitik aktiviteye bağlı NO_x artışı

Bu nedenle nanopartikül türü ve konsantrasyonunun dikkatle optimize edilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde ele alınan çalışmalar, dizel yakıta nanopartikül ilavesinin yanma mekanizmalarını çok yönlü olarak iyileştirdiğini

ortaya koymaktadır. Nanopartiküller; atomizasyon, buharlaşma, tutuşma gecikmesi ve reaksiyon kinetiği üzerinde etkili olarak daha verimli ve temiz bir yanma süreci sağlamaktadır.

Kaynaklar

Ağbulut, Ü., & Sarıdemir, S. (2024). Synergistic effects of hybrid nanoparticles along with conventional fuel on engine performance, combustion, and environmental characteristics. *Energy*, 292, 130267.

Ağbulut, Ü., Sarıdemir, S., Rajak, U., Polat, F., Afzal, A., & Verma, T. N. (2021). Effects of high-dosage copper oxide nanoparticles addition in diesel fuel on engine characteristics. *Energy*, 229, 120611.

Alsaffar, R. M., Al-Dabbagh, B. M., & Jawad, H. K. (2023). Preparation of black carbon nanoparticles from two sources of oil residues with direct and indirect ultrasonic process. *Journal of Applied Sciences and Nanotechnology*, 3(3), 10-19.

Balaji, G. and Cheralathan, M. (2017). Influence of alumina oxide nanoparticles on the performance and emissions in a methyl ester of neem oil fuelled direct injection diesel engine. *Thermal Science*, 21(1 Part B), 499-510.

Baskar, S., Majid, M., Raman, A., Babu, L. G., Selvaraj, M., Sambandam, P., & Deepak, J. R. (2024). Development of synthesized fuels based on diesel by incorporating zinc oxide nanoparticles, surfactant and ethyl acetate. *Results in Engineering*, 24, 103633.

Çılğın, E. (2025). Synergistic effects of SWCNT and MgO nanoparticle additives on engine performance and emissions: a laboratory analysis approach. *Biofuels*, 1-21.

Farkade, H. S., & Pathre, A. P. (2012). Experimental investigation of methanol, ethanol and butanol blends with gasoline on SI engine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(4), 205-215.

Kannaiyan, K., Anoop, K., & Sadr, R. (2017). Effect of nanoparticles on the fuel properties and spray performance of aviation turbine fuel. *ASME. J. Energy Resour. Technol*, 139(3): 032201. <https://doi.org/10.1115/1.4034858>

Kesharvani, S., Chhabra, M., Dwivedi, G., Verma, T. N., & Pugazhendhi, A. (2023). Execution and emission characteristics of automotive compression ignition engine powered by cerium oxide nanoparticles doped water diesel emulsion fuel. *Fule*, 349, 128670.

Mukherjee, S., Chakrabarty, S., Mishra, P. C., & Chaudhuri, P. (2022). Stability and sedimentation characteristics of water based Al_2O_3 and TiO_2 nanofluids. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems*, 238(1-2), 17-30.

Örs, I., Sarikoç, S., Atabani, A. E., Ünalán, S. E. B. A., & Akansu, S. O. (2018). The effects on performance, combustion and emission characteristics of DICl engine fuelled with TiO_2 nanoparticles addition in diesel/biodiesel/n-butanol blends. *Fuel*, 234, 177-188.

Sajith, V., Sobhan, C. B., & Peterson, G. P. (2010). Experimental investigations on the effects of cerium oxide nanoparticle fuel additives on biodiesel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2, 581407.

Sarma, C. J., Sharma, P., Bora, B. J., Bora, D. K., Senthilkumar, N., Balakrishnan, D., & Ayesha, A. I. (2023). Improving the combustion and emission performance of a diesel engine powered with mahua biodiesel and TiO_2 nanoparticles additive. *Alexandria Engineering Journal*, 72, 387-398.

Selvan, V. A. M., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2014). Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives in diesterol blends on the performance, combustion

and emission characteristics of a variable compression ratio engine. Fuel, 130, 160-167.

ul Haq, M., Jafry, A. T., Ali, M., Ajab, H., Abbas, N., Sajjad, U., & Hamid, K. (2024). Influence of nano additives on Diesel-Biodiesel fuel blends in diesel engine: A spray, performance, and emissions study. Energy Conversion and Management: X, 23, 100574.

Vellaiyan, S., Subbiah, A., & Chockalingam, P. (2019). Multi-response optimization to improve the performance and emissions level of a diesel engine fueled with ZnO incorporated water emulsified soybean biodiesel/diesel fuel blends. Fuel, 237, 1013-1020.

DİZEL YAKITLARA NANOPARTİKÜL İLVESİNİN YANMA VE MOTOR PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Mehmet ŞEN¹
Ahmet KESKİN²

Giriş

Dizel motorlar yüksek termal verimlilikleri, dayanıklılıkları ve yüksek sıkıştırma oranları ile yakıt ekonomileri sayesinde günümüzde taşımacılık ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dizel yanmasının temel mekanizmalarının anlaşılması, motor performansının artırılması ve yanma sürecinin daha kontrollü hale getirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Dizel motorlarında yanma, yakıtın yüksek basınç altında silindir içine püskürtülmesi ve sıkıştırılmış sıcak hava ile temas etmesi sonucu kendiliğinden tutuşması esasına dayanır. Yakıtın atomizasyon kalitesi, silindir içi sıcaklık ve basınç seviyesi, enjeksiyon zamanlaması ve hava–yakıt karışımının homojenliği gibi

¹ Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Orcid: 0000-0002-0769-0521

² Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Orcid: 0000-0001-5306-0427

yanmanın karakterleri önemli temel parametrelerdir (Şahin ve Durgun, 2008). Dizel motorlarda gerçekleşen yanma, püskürtme sonrasında tutuşma gecikmesi, kontrolsüz yanma, kontrollü yanma ve art yanma olmak üzere dört fazdan oluşan karmaşık bir süreçtir. Bu fazları etkileyen yakıt özellikleri, püskürtme niteliği, türbülans, karışım oluşumu ve ısı transferi gibi parametreler, silindir içi basınç gelişimi ve motor performans parametrelerini belirlemektedir. (Şen, 2019).

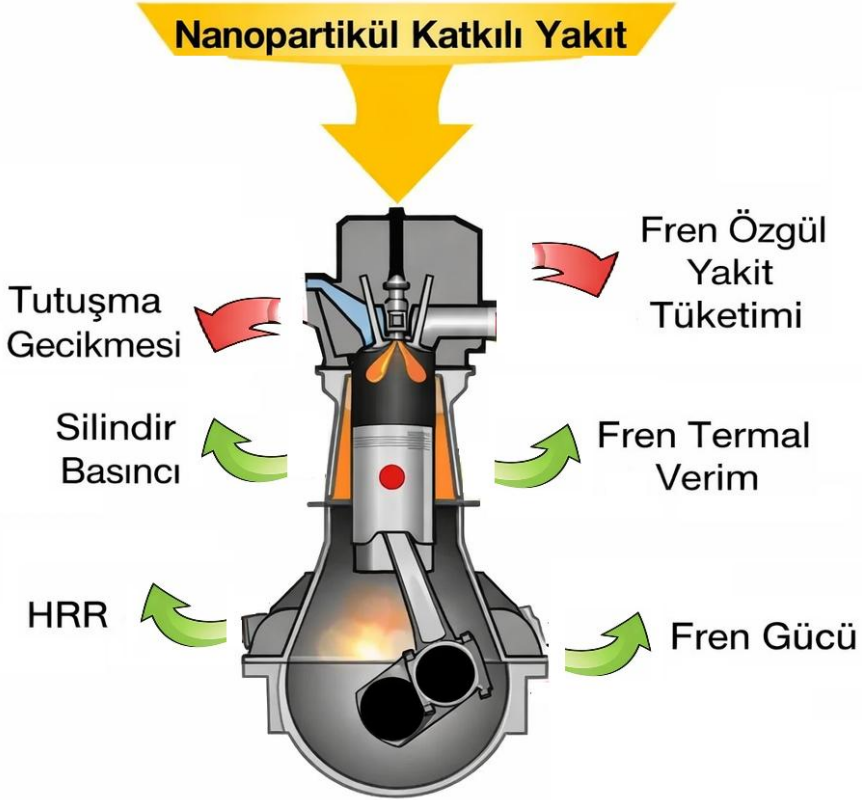
Yanma sürecinin etkinliği büyük ölçüde yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Yakıtın viskozitesi, setan sayısı, uçuculuğu ve atomizasyon kabiliyeti; yanma ve motor performansı ve emisyonları doğrudan etkilemektedir (Çelik, 2018). Özellikle püskürtülen yakıtın iyi atomize olması ve homojen dağılması, hava–yakıt karışımının iyileşmesini sağlayarak daha hızlı ve kararlı bir yanma sürecine olanak tanımaktadır (Yücesu vd., 2015). Enjeksiyon basıncının artırılması da benzer şekilde atomizasyonu iyileştirerek yanma hızını ve motor verimini artırmaktadır (Anı vd., 2021).

Bununla birlikte, klasik yöntemlerle yanma iyileştirmeleri belirli sınırlara sahiptir. Bu nedenle, yakıtın doğrudan özelliklerini değiştirebilen katkı maddeleri, dizel yanmasının optimizasyonunda önemli bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Yakıt katkı maddeleri, dizel motorlarında yanma kalitesini ve motor performansını artırmak amacıyla uzun süredir kullanılmaktadır. Son yıllarda nanoteknolojinin gelişmesiyle birlikte, nano boyutlu katkı maddeleri geleneksel katkılara kıyasla çok daha yüksek özgül yüzey alanları ve reaktivite sunmaları nedeniyle dikkat çekmektedir (Çakmak, 2024). Nanoparçacıklar, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek yanma sürecine hem katalitik hem de termofiziksel katkılar sağlamaktadır.

Literatürdeki çalışmalar, nanoparçacık katkılarının dizel yanmasının kinetiğini iyileştirdiğini, daha kısa ateşleme gecikmeleri

ve daha yüksek ısı yayılım hızları sağladığını ortaya koymaktadır (Singh vd., 2019; Koivisto vd., 2015). Yakıtın viskozitesinin düşmesi ve atomizasyon kabiliyetinin artması, damlacık boyutunun küçülmesine ve yanmanın daha homojen gerçekleşmesine zemin hazırlamaktadır (Salmani vd., 2015). Şekil 1’de dizel yakıtı nanopartikül ilavesinin yanma ve performansa etkileri gösterilmiştir.



Şekil 1. Nanopartikül ilavesinin yanma ve performansa etkileri

Metal oksit nanoparçacıkları (Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , B_2O_3 , MgO gibi) ve karbon bazlı nanoyapılar, dizel yanmasında atomizasyonu iyileştirmekte, tutuşma gecikmesini kısaltmakta ve ısı yayılım hızını artırmaktadır (Çakmak, 2023; Çakmak ve Özcan, 2022; Nouri vd., 2021; Çılğın ve Deviren, 2024). Bu katkılar

sayesinde yanma daha erken başlamakta, silindir içi basınç daha hızlı yükselmekte ve yanma süresi kısalmaktadır.

Alüminyum oksit (Al_2O_3) nanoparçacıkları, dizel–biyodizel karışımlarında kullanıldığında yanma hızını artırarak motor performansında iyileşmeler sağlamaktadır. Benzer şekilde titanyum dioksit (TiO_2) nanoparçacıkları, silindir içi gaz basıncını ve net ısı yayılım hızını artırmakta; tutuşma gecikmesi ve toplam yanma süresini kısaltmaktadır. Bor oksit (B_2O_3) nanoparçacıkları, yakıtın termofiziksel özelliklerini değiştirerek yanma karakteristiğini etkilemekte; belirli konsantrasyonlarda motor verimliliğinde artış sağlamaktadır (Çakmak ve Özcan, 2022). Demir oksit (Fe_2O_3) ve Al_2O_3 nanoparçacıklarının birlikte kullanıldığı hibrit katkı sistemlerini silindir içi basınç ve termal verimi iyileştirmektedir (Nouri vd., 2021).

Karbon nanotüpler gibi karbon bazlı nanomalzemeler, yüksek termal iletkenlikleri sayesinde yakıt damlacıkları içinde ısının daha hızlı yayılmasını sağlamakta ve mikro patlama etkisini tetikleyerek ikincil atomizasyona katkıda bulunmaktadır. Bu mekanizma, yanma başlangıcının öne çekilmesine ve ısı yayılım hızının artmasına yol açmaktadır (Solmaz vd., 2023; Gavhane vd., 2020).

Dizel yanmasının temellerinin doğru anlaşılması, motor performansının artırılması açısından kritik öneme sahiptir. Nanoparçacık katkı maddeleri, yakıtın yanma özelliklerini iyileştirerek daha hızlı, daha kararlı ve daha verimli bir yanma süreci sağlamaktadır. Silindir içi basınç gelişimi, ısı yayılım hızı ve efektif verim üzerindeki olumlu etkiler, nanoparçacık katkılarının dizel motor teknolojilerinde güçlü bir araştırma ve uygulama alanı sunduğunu göstermektedir.

Nanoparçacıkların Fizikokimyasal Özellikleri

Dizel motorlar yüksek verim ve düşük yakıt tüketiminin yanında, yakıtın tam olarak yanmaması, heterojen hava-yakıt karışımı ve sınırlı ısı transferi gibi nedenlerle yüksek yakıt tüketimi ve zararlı emisyon oluşumu ile sonuçlanabilmektedir. Bu durum, çevresel etkilerin azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması amacıyla dizel yakıtların fizikokimyasal özelliklerinin iyileştirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, nanoparçacık bazlı yakıt katkı maddeleri, yanma verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi ve etkili bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır.

Nanoparçacıkların dizel yakıtı ilavesiyle elde edilen nanoyakıtlar, yakıtın viskozitesi, yoğunluğu, ısı iletkenliği, oksidatif kararlılığı, kinematik viskozitesi ve soğukta akış özellikleri gibi temel fizikokimyasal parametrelerinde belirgin değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişimler, yakıtın püskürtme sırasında daha ince damlacıklar hâlinde atomize olmasını, hava ile daha homojen bir karışım oluşturmalarını ve yanma odasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonların daha etkin bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, tutuşma gecikmesi kısaltmakta, ısı yayılım hızı artmakta ve yanma süreci daha kararlı hâle gelmektedir (Gad vd., 2021).

Literatürde yapılan deneysel çalışmalar, nanoparçacık türüne bağlı olarak elde edilen fizikokimyasal iyileşmelerin yanma verimliliğine doğrudan yansıdığını göstermektedir. Murugesan vd. (2025), ZnO, Al₂O₃, TiO₂, MgO ve çok duvarlı karbon nanotüplerin dizel yakıtı ilavesiyle elde edilen nanoyakıtları incelemiş; ZnO ve TiO₂ nanoparçacıklarının özgül yakıt tüketimini sırasıyla %6,3 ve %5,9 oranında azalttığını, MgO nanoparçacıklarının ise fren termal verimini %8,3 oranında artırdığını rapor etmiştir. Aynı çalışmada, CO ve HC emisyonlarında önemli azalmalar sağlanırken, artan yanma sıcaklıklarına bağlı olarak NO_x emisyonlarında sınırlı artışlar

gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, nanoparçacıkların yakıtın fizikokimyasal özelliklerini değiştirerek yanma verimliliğini artırdığını açıkça ortaya koymaktadır.

Nanoparçacıkların yakıt özellikleri üzerindeki etkileri yalnızca performans parametreleriyle sınırlı değildir. Çakmak ve Özcan (2022), bor oksit nanoparçacıklarının dizel–biyodizel karışımlarında yakıtın soğukta akış özelliklerini iyileştirdiğini, ancak kinematik viskoziteyi artırdığını bildirmiştir. Buna rağmen, motor testlerinde özgül yakıt tüketiminde azalma ve efektif verimde artış elde edilmesi, nanoparçacıkların yanma sürecini optimize edici rolünü ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Hasannuddin vd.(2018), farklı metal oksit nanoparçacıklarının yakıtın yoğunluğunu, viskozitesini ve oksidatif termokinetiğini değiştirerek yanma karakteristiklerini iyileştirdiğini, ancak stabilite süresi üzerinde dikkat edilmesi gereken etkiler oluşturduğunu belirtmiştir.

Nanoparçacıkların yüksek ısı iletkenliği, yanma odasında gerçekleşen ısı transfer mekanizmalarını da doğrudan etkilemektedir. Nouri vd. (2021), Fe_2O_3 ve Al_2O_3 nanoparçacıkları içeren yakıtlarla yapılan deneylerde silindir içi basınç ve ısı yayılım hızında anlamlı artışlar elde edildiğini rapor etmiştir. Bu artışlar, yakıtın daha hızlı ve etkin yanmasına bağlı olarak enerji dönüşüm veriminin yükseldiğini göstermektedir. D’Silva vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada da TiO_2 nanoparçacıklarının yakıtın kalorifik değerini ve viskozitesini iyileştirerek maksimum yük koşullarında özgül yakıt tüketimini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir.

Yakıtın atomizasyon ve tutuşma özellikleri üzerindeki etkiler, nanoparçacık katkılarının yanma verimliliği açısından en kritik avantajlarından biridir. Yakıta ilave edilen nanoparçacık oranının artmasıyla birlikte viskozite azalmakta, setan sayısı yükselmekte ve bunun sonucu tutuşma gecikmesi kısalmaktadır. Bu

iyileşmeler, silindir içi basınç ve ısı yayılım hızında artış sağlarken, emisyonlarda belirgin azalmalarla sonuçlanmıştır (Selvan vd., 2014).

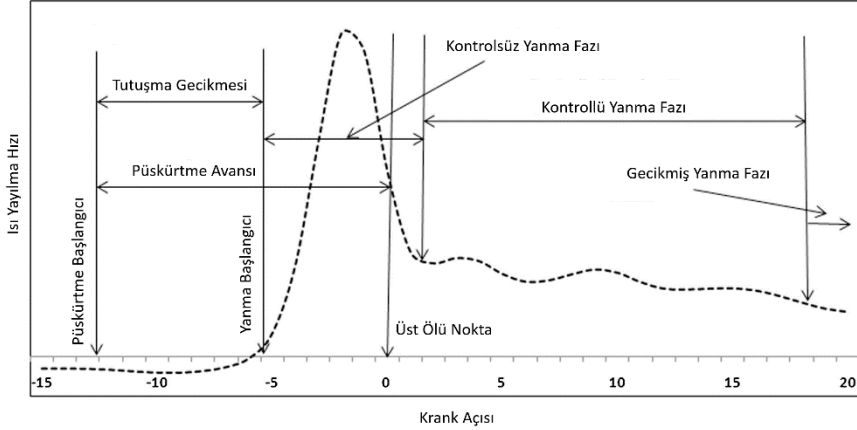
Bunun yanı sıra, TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_3O_4 ve CeO_2 gibi nanoparçacıkların oksidatif ve katalitik özellikleri, yanma sırasında moleküler etkileşimleri güçlendirmekte ve daha kararlı bir alev yapısı oluşturmaktadır (Pullagura vd., 2022). Alümina nanoparçacıkları özelinde yapılan çalışmalar, bu katkıların buharlaşma hızını artırarak ateşleme gecikmesini kısalttığını ve daha yüksek ısı yayılım hızları sağladığını ortaya koymuştur (Attia vd., 2014).

Dizel yakıtı ilave edilen nanoparçacıklar; yakıtın viskozitesi, yoğunluğu, ısı iletkenliği, kararlılığı ve atomizasyon özelliklerinde meydana getirdikleri fizikokimyasal değişimler sayesinde yanma verimliliğini belirgin biçimde artırmaktadır. Nanoparçacık türü, boyutu, konsantrasyonu ve yakıt içindeki dağılım homojenliği, elde edilen iyileşmelerin düzeyini belirleyen temel parametrelerdir. Bu yönüyle nanoparçacık bazlı dizel yakıt katkıları, daha verimli, daha düşük emisyonlu ve sürdürülebilir motor teknolojilerinin geliştirilmesinde stratejik bir rol üstlenmektedir.

Nanoparçacıkların Tutuşma Gecikmesi ve Isı Yayılma Hızına Etkisi

Tutuşma gecikmesi (ignition delay), dizel motorlarda yakıtın silindire püskürtüldüğü an ile yanmanın başladığı an arasında geçen süreyi ifade etmekte olup, yanma sürecinin en kritik parametrelerinden biridir. Şekil 2’de ısı yayılım hızı eğrisi üzerinde püskürtme ve yanma parametrelerinin tespit edilmesi gösterilmiştir. Bu süre; motor performansı, basınç artış hızı, yanma gürültüsü, dizel vuruntusu ve egzoz emisyonları üzerinde doğrudan etkili olmaktadır (Gümüş ve Binark, 2023). Tutuşma gecikmesinin optimum düzeyde

kısaltılması hedeflenirken, gecikmenin uzaması silindir içinde fazla yakıt birikmesine ve ani, kontrolsüz yanmaya; gecikmenin aşırı kısalması ise yakıtın yeterince buharlaşamaması ve hava ile homojen karışamaması nedeniyle yanma verimliliğinin düşmesine neden olabilmektedir.



Şekil 2. Enjeksiyon ve yanma parametrelerinin belirlenmesi (Şen, 2019)

Son yıllarda yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, dizel yakıtı ilave edilen nanoparçacıkların genel olarak tutuşma gecikmesini azalttığını ve yanma sürecini hızlandığını göstermektedir. Bu etki temelde kimyasal (katalitik) ve fiziksel (termal ve atomizasyon temelli) olmak üzere iki ana mekanizma ile açıklanmaktadır. Metal oksit nanoparçacıklar, yüksek özgül yüzey alanları ve oksidasyon–redüksiyon yetenekleri sayesinde yanma reaksiyonlarını katalize etmektedir. Özellikle seryum oksit (CeO_2) nanoparçacıkları, $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ redoks döngüsü aracılığıyla düşük sıcaklık oksidasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta ve yanma başlangıcında kritik rol oynayan serbest radikallerin ($\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{O}$) oluşumunu teşvik etmektedir (Seminko vd., 2021). Bu durum, kimyasal tutuşma gecikmesinin kısalmasına yol açmaktadır.

Benzer şekilde Al_2O_3 , TiO_2 ve Fe_3O_4 nanoparçacıkları da yakıtın kimyasal reaktivitesini artırarak daha erken alev oluşumunu desteklemektedir (Shams ve Moghiman, 2018). Deneysel bulgular, nanoparçacık katkılı yakıtlarda tutuşma sıcaklığının düştüğünü ve yanma başlangıcının öne çekildiğini ortaya koymaktadır. Bu gelişmeler, silindir içi basınç artışının daha erken gerçekleşmesine ve yanma fazlamasının daha kontrollü hale gelmesine katkı sağlamaktadır.

Nanokatıkların tutuşma gecikmesini azaltan ikinci temel mekanizma, yakıtın termofiziksel özellikleri üzerindeki etkileridir. Yüksek termal iletkenliğe sahip metal oksit nanoparçacıkları ile karbon bazlı nanomalzemeler (karbon nanotüpler ve grafen türevleri), püskürtülen yakıt damlacıkları içinde ısının daha hızlı yayılmasını sağlayarak buharlaşma sürecini hızlandırmaktadır (Balaji ve Cheralathan, 2017; Selvan vd., 2014).

Tutuşma gecikmesindeki bu kısalma, yanma sürecinin enerjetik karakterini doğrudan etkileyerek ısı yayılım hızı (heat release rate) profilinin değişmesine neden olmaktadır. Isı yayılım hızı, yanma sırasında açığa çıkan enerjinin zamana bağlı dağılımını tanımlayan temel bir parametre olup, motor gücü, yanma stabilitesi ve emisyon oluşum mekanizmaları üzerinde belirleyici rol oynamaktadır. Nano katkılı yakıtlarda, yanmanın daha erken başlaması nedeniyle ısı yayılım hızı eğrisi daha erken bir krank açısında maksimum değerine ulaşmakta ve yanma süreci daha kısa sürede tamamlanmaktadır (Sarıdemir ve Ağbulut, 2024).

Nouri vd., Fe_2O_3 ve Al_2O_3 nanoparçacıklarının dizel yakıta ilavesiyle maksimum yanma basıncında yaklaşık %4, ısı yayılım hızında ise %15'e varan artışlar rapor etmişlerdir (Nouri vd., 2021). Benzer şekilde, TiO_2 nanoparçacıkları ile yapılan deneylerde, tutuşma gecikmesinin ve toplam yanma süresinin kısaldığı; net ısı yayılım hızının ve silindir içi basıncın arttığı rapor edilmiştir

(Çakmak, 2023). Özellikle 150 ppm TiO_2 içeren yakıtlarla özgül yakıt tüketiminde %3,21 azalma ve efektif verimde %3,67 artış elde edilmesi, ısı yayılım hızı artışının motor verimliliğine doğrudan yansıdığını göstermektedir.

Bor oksit ve alüminyum oksit nanoparçacıkları ile yapılan çalışmalarda da benzer eğilimler gözlenmiştir. Çakmak ve Özcan (2022), B_2O_3 katkılı yakıtlarda ısı yayılım hızı artışıyla birlikte özgül yakıt tüketiminin azaldığını ve efektif verimin arttığını belirtirken, yüksek yanma sıcaklıklarına bağlı olarak NO ve is emisyonlarında artış rapor etmiştir. Al_2O_3 nanoparçacıkları üzerine yapılan diğer çalışmada ise ısı yayılım hızı ve yanma hızındaki artışa paralel olarak CO, HC ve is emisyonlarında azalma, buna karşılık NO_x emisyonlarında belirgin artışlar gözlenmiştir (Çakmak, 2024). Aynı çalışmada, Al_2O_3 nanoparçacıkları ile birlikte antioksidan katkıların kullanılması durumunda NO_x emisyonlarının baskılanabildiği ve ısı yayılım hızı artışının daha dengeli bir yanma süreciyle kontrol edilebildiği ortaya konmuştur.

Metal oksit nanoparçacıklarının yanı sıra SiO_2 , ZnO ve CeO_2 gibi farklı nanomateriyallerin de tutuşma gecikmesi ve ısı yayılım hızı üzerinde olumlu etkileri olduğu literatürde geniş biçimde rapor edilmektedir. SiO_2 nanoparçacıkları ile zenginleştirilmiş dizel–biyodizel–alkol karışımlarında ısı yayılım hızının optimize edildiği ve fren termal veriminin %8,8 oranında arttığı belirtilmiştir (Ramachander vd., 2022). ZnO nanokatıllarının ise daha kısa tutuşma gecikmesi ve daha yüksek ısı yayılımı sağladığı, bunun nanoparçacıkların yüksek reaktivitesi ve geniş yüzey alanı ile ilişkili olduğu ifade edilmiştir (Gavhane vd., 2020). CeO_2 nanoparçacıklarının oksijen depolama kapasitesi sayesinde daha homojen bir yanma ortamı oluşturduğu ve ısı yayılım hızını artırarak motor verimliliğini yükselttiği de rapor edilmiştir (Çelik ve Uslu, 2023).

Biyodizel içeren yakıtlarda doğal olarak daha uzun olan tutuşma gecikmesinin, nanokatıklar sayesinde önemli ölçüde telafi edilebildiği literatürde vurgulanmaktadır (Venu ve Appavu, 2020). Biyodizelin oksijen içeren yapısı ile nanoparçacıkların katalitik etkisinin birleşmesi, düşük sıcaklık bölgelerinde dahi ısı yayılımının artmasına olanak tanımaktadır (Çakmak ve Özcan, 2022).

Dizel yakıtı ilave edilen nanoparçacıkların tutuşma gecikmesini azaltarak yanma başlangıcını öne çektiği ve ısı yayılım hızını artırarak yanma sürecini hızlandırdığı literatürde güçlü biçimde ortaya konmuştur. Bu gelişmeler motor performansı ve termal verimlilik açısından önemli avantajlar sunarken, artan yanma sıcaklıklarına bağlı NO_x emisyonları dikkatle yönetilmelidir. Bu nedenle, nanokatı türü ve dozajının motor çalışma koşulları, EGR oranı ve hedeflenen performans-emisyon dengesi dikkate alınarak optimize edilmesi gerekmektedir. Nanoteknoloji tabanlı yakıt katkıları, dizel motorların geçiş döneminde daha verimli ve çevre dostu çalışması için yüksek potansiyel sunmaktadır (Renish ve Selvam, 2025).

Nanoparçacıkların Motor Performansına Etkileri

Dizel motorlar, yüksek dayanıklılıkları, yakıt ekonomileri ve geniş uygulama alanları nedeniyle taşımacılık ve endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, artan çevresel kaygılar ve yakıt tüketiminin azaltılmasına yönelik gereksinimler, dizel yakıtların performansını artıracak yeni katkı teknolojilerine olan ilgiyi artırmıştır. Bu bağlamda, dizel yakıtı ilave edilen nanoparçacıklar, yanma sürecini iyileştirerek güç çıkışı, termal verimlilik ve yakıt tüketimi gibi temel motor performansı parametreleri üzerinde önemli etkiler sunan yenilikçi katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır.

Nanoparçacık katkılarının motor performansı üzerindeki etkisi temel olarak yanma karakteristiklerinin iyileştirilmesiyle ilişkilidir. Yüksek özgül yüzey alanı ve katalitik özelliklere sahip nanoparçacıklar, yakıtın atomizasyonunu ve hava–yakıt karışımının homojenliğini artırarak yanma verimini yükseltmektedir. Bu durum, motorun daha kısa ateşleme gecikmesiyle çalışmasına, yanma hızının artmasına ve daha yüksek silindir basınçları elde edilmesine olanak tanımaktadır. Sonuç olarak, güç çıkışında artış, özgül yakıt tüketiminde azalma ve genel verimlilikte iyileşme gözlemlenmektedir.

Literatürde yapılan çok sayıda deneysel çalışmada, nanoparçacık ilavesinin motor performansını anlamlı düzeyde iyileştirdiği rapor edilmiştir. Fayad vd. (2022), nanoparçacık katkılı dizel ve biyodizel karışımlarının, yakıtın oksidasyon özelliklerini geliştirerek motor verimliliğini artırdığını ve güç çıkışını yükselttiğini bildirmiştir. Benzer şekilde, Gümüş vd. (2016), Al_2O_3 nanoparçacıklarının dizel yakıtta eklenmesiyle güç çıkışında artış, yakıt tüketiminde azalma ve motor verimliliğinde iyileşme sağlandığını göstermiştir. Özcanlı vd. (2022) ise demir oksit nanoparçacıklarının katalitik etkisi sayesinde yanma sürecinin optimize edildiğini ve güç, yakıt tüketimi ile termal verimlilik parametrelerinde önemli kazanımlar elde edildiğini rapor etmiştir.

Titanyum dioksit (TiO_2) nanoparçacıkları üzerine yapılan çalışmalar da motor performansı açısından dikkat çekici sonuçlar sunmaktadır. Rezaei (2023), TiO_2 nanoparçacıklarının dizel motorlarda yakıt tüketimini önemli ölçüde azalttığını ve emisyonları düşürdüğünü belirtmiştir. Aktaş vd. (2024), TiO_2 katkılı yakıtların saf dizele kıyasla fren termal verimliliğinde %15,12 artış ve özgül yakıt tüketiminde %13,36 azalma sağladığını ortaya koymuştur. Çakmak (2023) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada ise, 150 ppm TiO_2 nanoparçacığı içeren biyoyakıt–dizel karışımıyla

alışan sabit bir dizel motorda, özgül yakıt tkretiminin %3,21 azaldığı ve efektif verimin ortalama %3,67 oranında arttığı rapor edilmiştir. Ayrıca, silindir basıncı ve net ısı yayılım hızındaki artışlar, gındaki iyileşmeyi destekleyen bulgular olarak değerlendirilmiştir.

Farklı metal oksit nanoparçacıklarının karşılaştırıldığıalışmalarda da benzer eğilimler gözlemlenmiştir. Nouri vd. (2021), Fe₂O₃ katkılı yakıtların fren gücünde %7,40 ve termal verimlilikte %14 iyileşme sunduğunu bildirmiştir. Al₂O₃ nanoparçacıkları ise özgül yakıt tkretimini %9 oranında azaltmıştır. Benzer şekilde, MnO₂ nanoparçacıklarının kullanıldığıalışmalarda fren ortalama efektif basınç ve fren termal verimlilikte sırasıyla %2,70 ve %8,85 artış, özgül yakıt tkretiminde ise %14,29 azalma elde edilmiştir (Rajpoot vd., 2024).

Nanoparçacık türüne bağlı performans kazanımları, ZnO ve CeO₂ gibi farklı metal oksitlerle yapılanalışmalarda da doğrulanmıştır. Altaee (2022), ZnO nanoparçacık katkısı ile motor performansında %34,28'e varan artış ve fren termal verimlilikte %62'ye ulaşan iyileşmeler rapor etmiştir. Bu sonuçlar, nanoparçacık katkılarının motor performansı üzerindeki etkisinin, kullanılan nanoparçacığın kimyasal yapısı ve dozajına doğrudan bağlı olduğunu göstermektedir.

Yakıt tkretimi açısından değerlendirildiğinde, nanoparçacık katkılarının belirgin avantajlar sunduğu görülmektedir. D'Silva vd. (2015), TiO₂ nanoparçacıkları içeren dizel yakıtla maksimum yükte fren özgül yakıt tkretiminde %22 azalma elde edildiğini bildirmiştir.

Nanoparacıklarda Sınırlamalar, Zorluklar ve Araştırma İhtiyaçları

Dizel motorlarda yanma verimliliğinin artırılması ve egzoz emisyonlarının azaltılması, sürdürülebilir ve evre dostu enerji

teknolojilerine yönelik artan talepler doğrultusunda son yıllarda yoğun biçimde araştırılmaktadır. Bu bağlamda, dizel yakıtı ilave edilen nanoparçacıklar, yanma sürecini iyileştirme potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Nanoparçacık katkıları, yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirerek atomizasyonu, tutuşma karakteristiklerini ve ısı yayılım süreçlerini optimize edebilmekte; böylece motor performansı ve emisyonlar üzerinde olumlu etkiler sunabilmektedir. Ancak, mevcut literatür nanoparçacık katkılarının yanma odaklı avantajlarının yanı sıra, önemli sınırlamalar, uygulama zorlukları ve henüz tam olarak giderilememiş araştırma ihtiyaçları barındırdığını da ortaya koymaktadır.

Nanoparçacık kullanımına ilişkin temel sınırlamalardan biri, yanma sürecinde bazı emisyon bileşenlerinin artış gösterebilmesidir. Özellikle NO_x emisyonları, nanoparçacık katkılarının neden olduğu yüksek yanma sıcaklıkları ve artan oksijen erişilebilirliği nedeniyle artış eğilimi gösterebilmektedir.

Nanoparçacıkların yanma sürecindeki dağılım kararlılığı da önemli bir teknik sınırlama olarak öne çıkmaktadır. Yanma öncesinde ve sırasında meydana gelen aglomerasyon ve çökme eğilimleri, yakıt–hava karışımının homojenliğini bozabilmekte ve yanma verimini olumsuz etkileyebilmektedir. Chen vd. (2014), metal bazlı katkıların dizel yakıtlarında farklı performans sergilediğini belirtmiş; bu durumun nanoparçacık–yakıt etkileşimlerinin karmaşıklığını artırdığına dikkat çekmiştir. Dolayısıyla, nanoparçacıkların stabil dispersiyonunun sağlanması ve yanma süresince bu kararlılığın korunması, çözülmesi gereken temel araştırma konularından biridir.

Nanoparçacık katkılarının yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkileri de tam olarak netlik kazanmamıştır. Al_2O_3 , TiO_2 ve B_2O_3 gibi farklı nanoparçacık türlerinin yakıtın viskozite, yoğunluk, setan sayısı ve soğukta akış özellikleri

üzerindeki etkileri, motor performansı ve yanma karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir (Balaji ve Cheralathan, 2017; Nassir ve Shahad, 2018). Örneğin, bor oksit nanoparçacıklarının soğukta akış özelliklerini iyileştirirken kinematik viskoziteyi artırdığı, bunun da püskürtme ve atomizasyon süreçlerinde sorunlara yol açabileceği belirtilmiştir (Çakmak ve Ozcan, 2022). Bu tür karşıt etkiler, nanoparçacık katkılarının yanma odaklı faydalarının yakıt özellikleriyle birlikte değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır.

Yanma karakteristikleri açısından yapılan deneysel çalışmalarda, TiO_2 ve Al_2O_3 gibi nanoparçacıkların silindir içi basınç ve net ısı yayılım oranını artırdığı, tutuşma gecikmesi ve yanma süresini kısalttığı rapor edilmiştir (Nouri vd., 2021). Ancak, bu iyileşmelerin çoğu durumda NO ve NO_x emisyonlarında %30'a varan artışlarla birlikte gerçekleştiği görülmektedir (Çakmak, 2023). Bu durum, nanoparçacık katkılarının yanma odaklı etkilerinin, özellikle katkı konsantrasyonu ve motor yükü gibi parametrelerle birlikte optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

Ekonomik sürdürülebilirlik de nanoparçacık katkılarının yaygın uygulanabilirliğini sınırlayan önemli bir faktördür. Çakmak ve Ozcan (2022), B_2O_3 nanoparçacıklarının teknik açıdan bazı avantajlar sunmasına rağmen, nanoparçacık maliyetleri nedeniyle birim efektif güç başına yakıt maliyetinin %116 oranında arttığını bildirmiştir. Bu durum, nanoparçacık katkılarının yanma odaklı faydalarının, maliyet-etkinlik analizleriyle birlikte değerlendirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

Nanoparçacık katkılarının yanma sürecindeki etkileri, motor çalışma parametrelerine de güçlü biçimde bağlıdır. Polat (2022), Al_2O_3 nanoparçacıklarının metanol ile birlikte kullanıldığı bir çalışmada, sıkıştırma oranının artmasıyla özgül yakıt tüketimi ve NO_x emisyonlarının arttığını; minimum NO_x değerinin düşük sıkıştırma oranlarında elde edildiğini göstermiştir. Bu bulgular,

nanoparçacık katkılarının yanma odaklı etkilerinin motor parametreleriyle birlikte optimize edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Bununla birlikte, nanoparçacık katkılarının motorlarda uzun süreli kullanımıyla ilgili veri eksikliği önemli bir araştırma boşluğu oluşturmaktadır. Mevcut çalışmaların büyük bölümü kısa süreli deneylere dayalı olup, nanoparçacıkların enjektörlerde, yanma odasında ve egzoz sistemlerinde birikim, aşınma ve tıkanma gibi potansiyel etkileri yeterince incelenmemiştir (Tziourtzioumis ve Stamatelos, 2019). Ayrıca, nanoparçacıkların çevresel etkileri ve insan sağlığı üzerindeki olası riskleri de henüz kapsamlı biçimde değerlendirilmemiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, dizel yakıtta ilave edilen nanoparçacıkların motor performansı üzerinde güç çıkışı, verimlilik ve yakıt tüketimi açısından önemli iyileştirmeler sağladığı açıkça görülmektedir. Nanoparçacıkların katalitik ve fiziksel özellikleri sayesinde yanma sürecinin optimize edilmesi, motorun daha verimli çalışmasına ve yakıtın daha etkin kullanılmasına olanak tanımaktadır. Ancak, bu olumlu etkilerin nanoparçacık türü, konsantrasyonu, motor yükü ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Dizel yakıtta ilave edilen nanoparçacıkların yanma odaklı etkileri, önemli performans ve emisyon avantajları sunmakla birlikte; NO_x artışı, dağılım kararsızlığı, yakıt özelliklerindeki olumsuz değişimler, ekonomik sürdürülebilirlik sorunları ve uzun vadeli etkiler gibi çeşitli sınırlamalar ve zorluklar içermektedir. Bu nedenle, gelecekteki araştırmaların nanoparçacık türü, konsantrasyonu, hibrit katkı sistemleri, motor çalışma parametreleri ve uzun süreli kullanım etkilerini bütüncül bir yaklaşımla ele alması büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki mevcut bulgular, bu alanda önemli ilerlemeler sağlandığını göstermekte; ancak yanma odaklı, optimize

edilmiş ve sürdürülebilir nanoparçacık katkı sistemlerinin geliştirilmesi için daha kapsamlı ve çok disiplinli çalışmalara ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynakça

Ağbulut, Ü., & Sarıdemir, S. (2024). Synergistic effects of hybrid nanoparticles along with conventional fuel on engine performance, combustion, and environmental characteristics. *Energy*, 292, 130267.

Aktaş, F., Zincirci, O., & Koca, S. (2024). Investigation of the Effect of TiO₂ Nanoparticles on Engine Performance and Emission Characteristics in Diesel Engines. *International Journal of Automotive Science And Technology*, 8(2), 242–251. <https://doi.org/10.30939/ijastech..1478380>

Altaee, T. M. (2022). Improvement of Diesel Fuel Engine Performance by Nanoparticles Additives. *Journal of Engineering*, 28(4), 77–90. <https://doi.org/10.31026/j.eng.2022.04.06>

Anı, N. C., Tüccar, G., & Avcu, A. (2021). Numerical Investigation of Effects of Different Injection Pressure on Diesel Engine Performance and NO_x Emission. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(1), 71–78. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.933813>

Attia, A. M., El-Seesy, A. I., El-Batsh, H. M., & Shehata, M. S. (2014). Effects of alumina nanoparticles additives into jojoba methyl ester-diesel mixture on diesel engine performance. ASME Int Mech Eng Congr Expo. *American society of mechanical engineers*.

Balaji, G. and Cheralathan, M. (2017). Influence of alumina oxide nanoparticles on the performance and emissions in a methyl ester of neem oil fuelled direct injection diesel engine. *Thermal Science*, 21(1 Part B), 499-510. <https://doi.org/10.2298/tsci151010165b>

Chen, Y., Zhao, H., Zhang, S., & Zhang, G. (2014). Experimental investigations on the effects of multi-composite naphthenates fuel additives on diesel. *Advanced Materials Research*,

Çakmak, A. (2023). The exploitation of titanium dioxide nanoparticles for improving the performance and emissions of biofuel-diesel blend-fuelled stationary diesel engine. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 685-704. <https://doi.org/10.17482/uumfd.1294787>

Çakmak, A. (2024). Al₂O₃ nanoparçacıklarının ve çeşitli antioksidan katkı maddelerinin dizel motor karakteristiklerine etkilerinin araştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, . <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1284143>

Çakmak, A., & Ozcan, H. (2022). Bor oksit nanoparçacıklarının dizel yakıt katkısı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Bor Dergisi*, . <https://doi.org/10.30728/boron.1021667>

Çelik, M., (2018). Dizel Motorlarda Performans ve Egzoz Emisyonlarının n-hexadecane Katkı Maddesi ile İyileştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, . <https://doi.org/10.2339/politeknik.382994>

Çelik, M., & Uslu, S. (2023). Experimental investigation of diesel engine running on diesel fuel supplemented with CeO₂ metal nanoparticles. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 246-262.

Çılğın, E., & Deviren, H. (2024). Dizel Motorlarda Yakıt Katkı Maddeleri Olarak Nanopartiküllerin Kullanımının Araştırılması. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 40(1), 75-91.

D'silva, R., Binu, K., & Bhat, T. (2015). Performance and Emission Characteristics of a C.I. Engine Fuelled with Diesel and TiO₂ Nanoparticles as Fuel Additive. *Materials Today: Proceedings*, 2(4-5), 3728–3735. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.162>

Fayad, M. A., Abed, A. M., Omran, S. H., Jaber, A. A., Radhi, A. A., Dhahad, H. A., & Yusaf, T. (2022). Influence of renewable fuels and nanoparticles additives on engine performance and soot nanoparticles characteristics.

Gavhane, R., Kate, A., Pawar, A., Safaei, M., Soudagar, M., Mujtaba, M., & Shahapurkar, K. (2020). Effect of zinc oxide nano-additives and soybean biodiesel at varying loads and compression ratios on vcr diesel engine characteristics. *Symmetry*, 12(6), 1042. <https://doi.org/10.3390/sym12061042>

Gümüş, M., & Binark, A. K. (2023). Dizel Motorlarında Tutuşma Gecikmesini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi. *Cihannüma Teknoloji Fen ve Mühendislik Bilimleri Akademi Dergisi*, 2(1), 10-43.

Gümüş, S., Özcan, H., Özbey, M., & Topaloğlu, B. (2016). Aluminum oxide and copper oxide nanodiesel fuel properties and usage in a compression ignition engine. *Fuel*, 163, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.048>

Hasannuddin, A., Yahya, W., Sarah, S., Ithnin, A., Syahrullail, S., Sidik, N., Kassim, K. A., Ahmad, Y., Hirofumi, N., Ahmad, M., Sugeng, D., Zuber, M., & Ramlan, N. (2018). Nano-additives incorporated water in diesel emulsion fuel: Fuel properties, performance and emission characteristics assessment. *Energy Conversion and Management*, 169, 291–314. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.070>

Koivisto, E., Ladommatos, N., & Gold, M. (2015). Compression ignition and exhaust gas emissions of fuel molecules which can be produced from lignocellulosic biomass: levulinates, valeric esters, and ketones. *Energy & Fuels*, 29(9), 5875-5884. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01314>

Murugesan, E., Dhairiyasamy, R., Dixit, S., & Singh, S. (2025). The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 106070–106070. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106070>

Nassir, A. and Shahad, H. (2018). Experimental study of a diesel engine performance fueled with different types of nano-fuel. *Journal of University of Babylon for Engineering Sciences*, 26(7), 36-57. <https://doi.org/10.29196/jubes.v26i7.1485>

Nouri, M., Isfahani, A. H. M., Shirneshan, A., & Nouri, M. D. (2021). Effects of Fe_2O_3 and Al_2O_3 nanoparticle-diesel fuel blends on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23(8), 2265–2284. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02134-8>

Özcanlı, M., Tosun, E., & Çalık, A. (2022). Influences of iron oxide nanomaterial and hydrogen addition into sunflower biodiesel/diesel powered diesel engine performance and emissions. *Macromolecular Symposia*, 404(1). <https://doi.org/10.1002/masy.202100410>

Polat, F. (2022). Experimental evaluation of the impacts of diesel-nanoparticles-waste tire pyrolysis oil ternary blends on the combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 847-858.

Pullagura, G., Bikkavolu, J., Srinivas, V., Chebattina, K., & Kuchipudi, V. (2022). Comparative study of TiO_2 nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for combustion, performance, and emission improvements. *International Journal of Heat and Technology*, 40(5), 1249-1257. <https://doi.org/10.18280/ijht.400517>

Rajpoot, A. S., Chelladurai, H., Choudhary, T., Pachori, H., Sinha, A. A., & Khan, A. A. (2024). An Experimental Study of the Impact of Manganese Dioxide (MnO_2) Blended Fuel on the Performance and Emission Characteristics of a Diesel Engine. *Green Energy and Technology*, 593–602. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1868-9_59

Ramachander, J., Gugulothu, S. K., & Sastry, G. R. K. (2022). Performance and emission reduction characteristics of metal based SiO_2 nanoparticle additives blended with ternary fuel (Diesel-MME-Pentanol) on CRDI diesel engine. *Silicon*, 14(5), 2249-2263.

Renish, R. R., & Selvam, M. A. J. (2025). Nanotechnology-driven Fuel Additives for Improved Performance, Optimized Combustion, and Reduced Emissions. *J. Environ. Nanotechnol*, 14(3), 253-264.

Rezaei, R. (2023). Experimental investigation on the effect of TiO_2 nanoparticles emulsion in water on emissions and performance characteristics of di diesel engine. *Power Engineering and Engineering Thermophysics*, 2(1), 1-14. <https://doi.org/10.56578/peet020101>

Salmani, M., Rehman, S., Zaidi, K., & Hasan, A. (2015). Study of ignition characteristics of microemulsion of coconut oil under off diesel engine conditions. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 18(3), 318-324. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.12.002>

Selvan, V. A. M., Anand, R. B., & Udayakumar, M. (2014). Effect of cerium oxide nanoparticles and carbon nanotubes as fuel-borne additives in diesterol blends on the performance, combustion and emission characteristics of a variable compression ratio engine. *Fuel*, 130, 160-167.

Seminko, V., Maksimchuk, P., Grygorova, G., Okrushko, E., Avrunin, O., Semenets, V., & Malyukin, Y. (2021). Mechanism and dynamics of fast redox cycling in cerium oxide nanoparticles at high oxidant concentration. *The Journal of Physical Chemistry C*, 125(8), 4743-4749.

Shams, Z., & Moghiman, M. (2018). Effect of metal oxide nanoparticles on the ignition characteristics of diesel fuel droplets: an experimental study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(2), 75.

Singh, A., Patle, R., Das, M., Sanodiya, R., Stanley, N., & Malkhani, P. (2019). Role of nanoparticles as performance and emission improver of compression ignition engine fuels: an overview. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 10(2). <https://doi.org/10.5829/ijee.2019.10.02.06>

Solmaz, H., Sürer, E., İpci, D., Calam, A., Yılmaz, E., İpci, D., Suerer, E., & Yılmaz, E. (2023). Dizel-biyodizel karışımına karbon nanotüp katkısının motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 1055–1064. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.741177>

Şahin, Z., & Durgun, O. (2008). Multi-zone combustion modeling for the prediction of diesel engine cycles and engine performance parameters. *Applied Thermal Engineering*, 28(17-18), 2245–2256. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.01.002>

Şen, M. (2019). The effect of the injection pressure on single cylinder diesel engine fueled with propanol–diesel blend. *Fuel*, 254, 115617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115617>

Tziourtzioumis, D. and Stamatelos, A. (2019). Diesel-injection equipment parts deterioration after prolonged use of

biodiesel. *Energies*, 12(10), 1953.
<https://doi.org/10.3390/en12101953>

Venu, H., & Appavu, P. (2020). Al₂O₃ nano additives blended Polanga biodiesel as a potential alternative fuel for existing unmodified DI diesel engine. *Fuel*, 279, 118518.

Yücesu, H. S., Solmaz, H., Çelik, M., & Çelik, M. (2015). Pamuk Metil Esterine n-Heptan Katkısının Motor Performans ve Yanma Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3).
<https://doi.org/10.17341/gummfd.56992>

DİZEL YAKITLARA NANOPARTİKÜL İLVESİNİN EGZOZ EMİSYONLARI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

**Alaattin Osman EMİROĞLU¹
Mehmet ŞEN²**

Giriş

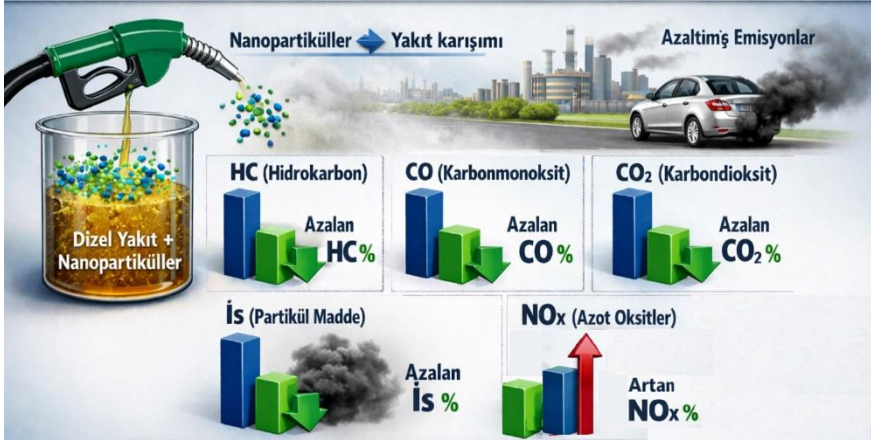
Dizel motorlar dünya genelinde ulaşım ve taşımacılık sektöründe yaygın olarak kullanıldığından dolayı dizel egzoz gazları insan sağlığı ve hava kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Nanoteknolojinin enerji ve yakıt alanına uygulamalarının yaygınlaşması, yakıt içerisinde düşük konsantrasyonlarda ilave edilen nanoparçacıkların yanma sürecini iyileştireceğini, yakıt verimliliğini artırabileceğini ve zararlı egzoz emisyonlarını azaltabileceğini göstermiştir.

Nanoparçacık katkılarının yanma kinetiğı, partikül morfolojisi ve gaz emisyon profillerine yön vermektedir. Yapılan çalışmalarda partikül madde (PM), karbon monoksit (CO) ve

¹ Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Makine Mühendisliğı, Orcid: 0000-0003-1880-2186

² Prof.Dr., Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri, Orcid: 0000-0002-0769-0521

hidrokarbon (HC) emisyonlarında azalma; fakat azot oksit (NO_x) emisyonunda genellikle artış veya nadiren azalma gözlenmiştir. Şekil 1’de nanopartikül kullanımının emisyon üzerine etkileri gösterilmiştir.



Şekil 1. Nanopartikül ilavesinin etkileri

Nanoparçacıkların yakıt içine dağılımı, yüzey alanı/reaktif merkez sayısında önemli artış sağlar. Nano boyuttaki parçacıklar yakıt damlacıklarının buharlaşmasını, alev stabilitesini ve lokal ısı iletkenliğini etkileyerek yanma zamanlamasını, yanma hızı ve eksiksiz yanmayı etkiler. Ayrıca bazı seryum oksit (CeO_2), titanyum oksit (TiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) gibi metal oksit nanoparçacıklar oksidasyon katalizörleri gibi davranarak yanmayı hızlandırır. Organik metalik katkılar ise radikal zincirlerini etkileyerek yanmanın karakterini değiştirir. Bu fizikokimyasal mekanizmalar, yaygın olarak gözlemlenen emisyon eğilimlerinin ($\text{PM}\downarrow$, $\text{CO}\downarrow$, $\text{HC}\downarrow$; NO_x değişken/ $\uparrow$) temelini oluşturur (Dobrzyńska vd., 2022).

Nanopartikül İlavesinin İS Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Dizel motorlardan kaynaklanan is (soot) emisyonları, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de insan sağlığı açısından en kritik egzoz kirleticileri arasında yer almaktadır. İs partikülleri; büyük oranda elementel karbon çekirdeği, yüzeye adsorbe olmuş organik bileşikler ve iz miktarda metalik bileşenlerden oluşmakta olup, atmosferde uzun süre askıda kalabilen ve solunum yoluyla akciğerlerin derin bölgelerine kadar ulaşabilen bir yapıya sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle dizel is emisyonları kaynaklı hastalıklar, iklim değişikliği ve görüş mesafesi azalması gibi çok boyutlu problemlerin merkezinde bulunmaktadır (Ekhtor vd., 2021).

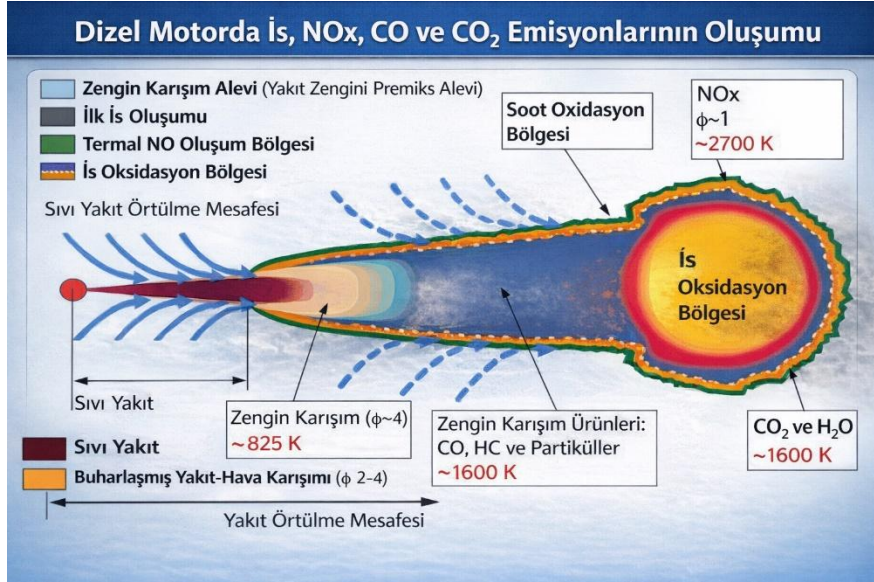
Geleneksel olarak is emisyonlarının kontrolü; motor içi iyileştirmeler, yanma optimizasyonu ve motor sonrası sistemler örneğin dizel partikül filtresi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bununla birlikte, son yıllarda yakıtın doğrudan modifiye edilmesi yoluyla is oluşumunun daha yanma aşamasında baskılanması fikri giderek önem kazanmıştır. Bu kapsamda, dizel yakıtlara ilave edilen nanopartiküller, yüksek yüzey alanları ve katalitik özellikleri sayesinde is oluşum ve oksidasyon süreçlerini etkileyen yenilikçi katkı maddeleri olarak öne çıkmaktadır (Promhuad vd., 2022).

Dizel Motorlarda İs Oluşumunun Temel Mekanizmaları

Dizel motorlarda is oluşumu, heterojen yanma karakteri nedeniyle karmaşık kimyasal ve fiziksel süreçlerin bir sonucudur. Yakıt püskürtme sonrası oluşan lokal yakıtça zengin bölgelerde, hidrokarbon molekülleri yüksek sıcaklık etkisiyle pirolize uğrar. Bu süreçte asetilen, benzen ve daha karmaşık polisiklik aromatik hidrokarbonlar gibi is öncül türleri meydana gelir. Polisiklik aromatik hidrokarbonlar bileşikleri, is çekirdeğinin oluşumunda kritik rol oynar (Sánchez vd., 2022).

İs oluşumu genellikle üç ana evrede incelenir: nükleasyon, yüzey büyümesi ve aglomerasyon. Nükleasyon aşamasında moleküler boyuttaki polisiklik aromatik hidrokarbonlar türleri

birleşerek ilk karbon çekirdeklerini oluşturur. Bunu takiben, yüzey büyümesiyle is partiküllerinin boyutu artar ve yüksek sıcaklık–düşük oksijen koşullarında koagülasyon yoluyla daha büyük aglomeralar meydana gelir (Tao vd., 2004).



Şekil 2. Dizel Motorda Is Emisyon Oluşumu (Maurya, 2017)

Yanma sürecinin ilerleyen aşamalarında ve egzoz stroku sırasında, oluşan is partikülleri oksijen ve hidroksil (OH) radikalleri ile reaksiyona girerek kısmen oksitlenir. Ancak oksijen yetersizliği ve kısa rezidans süresi, bu oksidasyonun genellikle tamamlanmasını engeller. Dolayısıyla, egzozdan atmosfere önemli miktarda is partikülü salınır.

Nanopartiküllerin Is Oluşumuna Etki Prensipleri

Nanopartiküller, dizel yakıt içerisinde homojen olarak dağıldıklarında yanma sürecinin mikro ölçekte katalitik oksidasyon, yanma homojenliğinin artırılması ve is oksidasyon kinetiğinin hızlandırılması ile yeniden şekillenmesine katkı sağlar.

Metal ve metal oksit nanopartiküller, is karbonunun oksidasyonu için gerekli aktivasyon enerjisini düşürerek reaksiyon hızını artırır. Bu durum, özellikle CeO_2 , Fe_2O_3 ve bakır oksit (CuO) gibi oksijen transfer kabiliyeti yüksek nanopartiküller için belirgindir. Bu partiküller, yanma sırasında oksijen taşıyıcı görevi görerek is yüzeyinde lokal oksidasyon bölgeleri oluşturur (Li vd., 2016).

Nanopartikül ilavesi, yakıt damlacıklarının termofiziksel özelliklerini değiştirerek daha hızlı buharlaşma ve daha iyi atomizasyon sağlar. Sonuç olarak, yanma odasında yakıt–hava karışımı daha homojen hale gelir ve is oluşumuna yol açan lokal zengin karışım bölgeleri azalır. Nanopartiküller, is oksidasyonunun daha düşük sıcaklıklarda başlamasına olanak tanır. Bu etki, özellikle yanma sonrası fazında ve egzoz hattında is miktarının belirgin şekilde azalmasına katkı sağlar (Khaskheli vd., 2022).

Nanopartikül Türlerinin Is Emisyonları Üzerindeki Etkileri

Seryum oksit nanopartikülleri, oksijen depolama–salma kapasitesi sayesinde:

- Yanma sırasında geçici oksijen kaynağı sağlar,
- Is oksidasyonunu hızlandırır,
- Dizel partikül filtresi rejenerasyon sıcaklığını düşürür.

Bu özellikleri nedeniyle literatürde en yaygın incelenen nanopartikül katkılarından (Luo vd., 2023).

Demir oksit (Fe_2O_3) katkıları:

- Karbon oksidasyon reaksiyonlarını katalize eder,
- Yanma sıcaklığına bağlı olarak is oluşumunu baskılar,

- Özellikle orta ve yüksek yük koşullarında is emisyonlarında belirgin azalma sağlar (Resitoglu vd., 2017).

Grafen ve karbon nanotüpler gibi yapılar:

- Isı transferini iyileştirir,
- Yakıt atomizasyonunu etkiler (Ağbulut vd., 2022).

Ancak bazı durumlarda, uygun dispersiyon sağlanamazsa is çekirdeği oluşumunu teşvik edebileceği de rapor edilmiştir. Bu nedenle dozaj ve stabilite kritik öneme sahiptir.

Özet olarak, dizel yakıtlara nanopartikül ilavesi, özellikle CeO_2 ve bazı karbon bazlı nanomalzemeler, is emisyonlarını azaltma potansiyeline sahiptir ve birçok deneysel çalışma bunu doğrulamaktadır. Ancak etkiler motor çalışma koşullarına, yakıt matrisi ve katkı partikül özelliklerine güçlü şekilde bağlıdır.

Nanopartikül İlavesinin Karbon Monoksit (CO) Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Dizel motorlardan kaynaklanan CO emisyonu, yanmanın tam olmaması sonucu oluşan önemli bir kirletici sınıftır. İçten yanmalı motorlardaki CO, egzoz gazı arıtma teknolojilerinde katalitik oksidasyonla ya da yanma verimliliğinin artırılmasıyla azaltılmaya çalışılır. Son yıllarda yakıt katkıları arasında nanopartiküller (metal oksitler, metalik nanoyapılar, karbon nanotüpler/graphene, vb.) yakıtın atomizasyonu, yanma sürecinin katalitik olarak desteklenmesi ve yakıt fiziko-kimyasal özelliklerinin iyileştirilmesi yoluyla emisyonları iyileştirme potansiyeli nedeniyle yoğun ilgi görmüştür. Ancak bazı çalışmalar, yakıt-viskozitesindeki artış veya stabilite sorunları gibi uygulama hataları durumunda CO/HC artışı gözlemişlerdir; dolayısıyla uygulama yöntemi önemlidir.

Nanopartikül katkılarının CO emisyonlarını azaltmadaki ana mekanizmaları üç başlık altında toplanabilir:

1. **İyileştirilmiş yakıt atomizasyonu ve sıcaklık dağılımı:** İnce ve homojen dağılmış nanopartiküller yakıt damlacıklarının daha küçük ve daha homojen olmasını sağlar; bu da daha iyi buharlaşma ve hava-yakıt karışımı ile daha eksiksiz yanma (düşük CO) doğurur. Birçok çalışma Al_2O_3 , CeO_2 ve karbon nanotüpler katkılarında daha iyi atomizasyon gözlemi bildirmiştir (Dessie vd., 2025).
2. **Katalitik/oksidatif etkinlik:** Özellikle bazı metal oksitler (CeO_2 , Fe_2O_3 , MnO_2 vb.) yüzeylerinde $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ dönüşümünü kolaylaştıran redoks/katalitik aktiviteler gösterir. Seryum oksitin ($\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$) redoks döngüsü, CO oksidasyonuna katkıda bulunmasıyla sıkça rapor edilmiştir. Bu nedenle CeO_2 ve benzeri katalitik nanopartiküller CO emisyonlarını doğrudan azaltabilir (Anish vd., 2025).
3. **Yanma kinetiği değiştirme:** Nanopartiküller yanma sıcaklıklarını ve lokal alev hızlarını değiştirebilir; daha yüksek yerel sıcaklıklar genellikle daha eksiksiz yanma (düşük CO) sağlar (Tamrat vd., 2024).

Bu mekanizmaların hangisinin baskın olduğu, kullanılan nanopartikülün kimyası, yüzey özellikleri, dağılım yöntemi ve motor koşullarına göre değişir.

Nanopartikül Türlerinin CO Üzerindeki Deneysel Bulguları

Seryum oksit yakıt katkıları literatürde en sık çalışanlardan biridir. CeO_2 , yakıt içerisinde az miktarlarda (ör. ppm düzeyleri) dağıtıldığında hem yakıtın fiziksel özelliklerini iyileştirip atomizasyonu destekleyebilir hem de yüksek sıcaklıklarda katalitik oksidasyon yoluyla CO'yu CO_2 'ye dönüştürebilir. Birden çok çalışma, biyodizel-dizel karışımlarında CeO_2 eklemesinin CO emisyonlarını anlamlı derecede azalttığını rapor etmiştir (Pan vd., 2021).

Alüminyum oksit nanopartikülleri yakıtın termal ve atomizasyon özelliklerini iyileştirme yoluyla CO seviyelerini düşürme eğilimindedir. Laboratuvar deneyleri genellikle düşük ila orta konsantrasyonlarda Al_2O_3 'ün CO ve partikül maddeyi azalttığını göstermiştir (Yeneneh & Sufe, 2025). Al_2O_3 'ün katalitik etkisi CeO_2 kadar belirgin olmasa da mekanik/atomizasyonel katkısı güçlüdür.

Demir oksit nanopartiküllerinin yakıt katkısı olarak kullanılması son yıllarda artmıştır. Bazı çalışmalar Fe_2O_3 ilavesinin CO'yu düşürdüğünü ama sonuçların yakıt türüne ve partikül dispersiyonuna göre değiştiğini bildirmiştir. Yeni çalışmalar, Fe_2O_3 ilavesiyle CO'da belirgin azalmalar gösterirken, partikül boyutu/konsantrasyon ilişkisinin kritik olduğunu vurgulamaktadır (Şener vd., 2025).

Titanyum oksit (TiO_2) ve çinko oksit (ZnO) gibi metal oksit nanopartikülleri de CO emisyonlarını azaltmak için denenmiştir. Bazı derleme ve deneysel çalışmalarda ZnO ve TiO_2 katkılarının CO'yu yaklaşık %10–25 oranında azaltabildiği raporlanmıştır (Murugesan vd., 2025).

Karbon bazlı nanomalzemeler genellikle iyi iletkenlik ve yüksek yüzey alanı sayesinde yakıtın yanma davranışını olumlu etkiler. Karbon nanotüp veya grafen ilavelerinde CO emisyonlarında düşüş raporlanmıştır. Karbon nanotüplerin, yakıt içinde iyi dağıldıklarında CO'yu azaltmada etkili olduğu tekrar eden bir bulgudur.

Literatürdeki çalışmalar farklı motor tipleri, yakıt karışımları ve nanopartikül konsantrasyonları kullandığı için karşılaştırma zordur; yine de bazı ortak temalar öne çıkar:

- **Genel eğilim:** Metal oksit ve karbon bazlı nanopartikül katkıları çoğunlukla CO emisyonlarını azaltmaktadır (çoğu

çalışma %10–%50 aralığında azalma bildirmektedir), fakat oranın büyüklüğü çalışma koşullarına bağlıdır (Dessie vd., 2025).

- **Konsantrasyon bağımlılığı:** Çok düşük konsantrasyonlarda (ör. birkaç ppm) etkiler sınırlı olabilir; optimal aralık genellikle 20–200 ppm arasında rapor edilmiştir, fakat bu aralık nanopartikül tipine göre değişir.

Genel literatür konsensüsü, uygun seçilmiş ve iyi dağıtılmış nanopartikül katkılarının dizel yakıtlarında CO emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Metal oksitler (özellikle CeO_2 , Fe_2O_3) ve karbon bazlı nanopartiküller (karbon nanotüp, grafen) en çok çalışılanlardır ve önemli CO düşüşleri bildirilmiştir. Ancak etki büyüklüğü ve yönü nanopartikül tipi, konsantrasyon, yakıt karışımı ve motor koşullarına çok bağımlıdır.

Nanopartikül İlavesinin Hidrokarbon (HC) Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Dizel motorlarda HC emisyonları, yanmamış veya kısmen yanmış hidrokarbonların egzozu atılmasıyla ortaya çıkan ve hava kalitesi ile insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan bir parametredir. Son yıllarda yakıt formülasyonunda nanopartikül katkılarının kullanımı, yanma kinetiğini ve yakıt-fizikokimyasını değiştirerek performans ve emisyon profillerini iyileştirme potansiyeli nedeniyle yoğun araştırma konusu olmuştur. Nanopartiküller; oksijen depolama/aktarım yetenekleri, katalitik yüzey etkinlikleri, ısı iletkenliği ve yakıt atomizasyonu üzerindeki etkileri aracılığıyla HC emisyonlarını azaltabilir (Hoang vd., 2022).

Nanopartikül katkılarının HC emisyonları üzerindeki etkileri birkaç ana mekanizmaya indirgenebilir:

1. **Oksidasyon katalizi:** Bazı metal oksit nanopartiküller (ör. CeO_2 , ZnO) yanma sonrası dönemlerinde yüzeyde adsorbe olmuş hidrokarbonları oksitleyebilir veya yanma sırasında

radikal havuzunu etkileyerek HC miktarını azaltabilir. Bu mekanizma özellikle CeO₂ için güçlü biçimde rapor edilmiştir (Tamrat vd., 2025).

2. **Yanma iyileştirmesi — Termo-fiziksel etkiler:** Nanopartiküller yakıtın ısı kapasitesini, ısı iletimini ve damlacık buharlaşmasını etkileyerek daha homojen ve hızlı yanma sağlamaya yardımcı olabilir; daha etkin yanma, HC üretimini azaltır. Karbon nanotüp ve grafen oksit gibi karbon-tabanlı nanopartiküller atomizasyon ve alev stabilizasyonu üzerinde olumlu etkiler bildirmiştir (Elkelawy vd., 2023).
3. **Radikal havuz modülasyonu:** Metal oksitlerin yüzeyinde gerçekleşen redoks döngüleri (ör. Ce³⁺/Ce⁴⁺) yanma radikal yoğunluğunu değiştirebilir; bu sayede HC oksidasyonu desteklenir (Tamrat vd., 2025).
4. **Katalitik ve egzoz sonrası etki:** Yakıt içine karıştırılan nanopartiküller doğrudan yanma odasında çalışarak HC'yi azaltabildiği gibi, egzoz sistemindeki katalitik dönüşüm etkinliğini de değiştirebilir — bazı çalışmalarda nanopartikül kaplı katalizörler kullanılmıştır (Kasgun vd., 2021).

Bu mekanizmalar birbirleriyle etkileşir; örneğin küçük partikül boyutu yüzey alanını artırarak katalitik etkiyi yükseltirken, aynı zamanda dispersiyon/kararlılık problemleri yaratabilir.

Nanopartikül Türleri ve HC Üzerindeki Deneysel Bulguları

Seryum oksit nanopartikülleri, yakıt katkısı literatüründe HC azaltımı ile en çok ilişkilendirilen maddelerden biridir. CeO₂'nin redoks özellikleri (Ce³⁺ ↔ Ce⁴⁺) ve oksijen depolama kapasitesi, yanma sırasında eksik oksijenli bölgelerde hidrokarbonların daha etkin oksidasyonuna katkı sağlar. Deneysel çalışmalar, CeO₂ ilavesinin CO ve HC emisyonlarını düşürdüğünü, bununla birlikte yanma sıcaklığındaki artışa bağlı olarak NO_x'te artış gösterebileceğini raporlamıştır. Özellikle nano boyut küçüldükçe

katalitik etki artmış ve HC azalma oranları yükselmiştir (Tamrat vd., 2025).

TiO₂, Al₂O₃ ve ZnO gibi metal oksit nanopartiküller de yanma davranışını iyileştirebilir. TiO₂, fotokatalitik özelliklerinden ziyade yakıt içindeki termal/yüzey etkileriyle HC ve partikül emisyonlarını azaltmada rol oynadığı çalışmalarda bildirilmiştir. Genel eğilim metal oksit eklenmesinin HC'da düşüşe yol açtığıdır, fakat düşüş oranı partikül konsantrasyonu, morfoloji ve yüzey modifikasyonlarına bağlıdır (Kasgun vd., 2021).

Karbon nanotüp ve grafen oksit gibi karbon esaslı nanopartiküller yakıtın fiziksel özelliklerini (viskozite, yüzey gerilimi) değiştirerek yakıt damlacıklarının daha iyi atomize olmasını sağlar. Birçok deneysel çalışma, karbon nanotüp ve grafen oksit ilavesinin yanmayı daha homojen hale getirerek HC emisyonlarında azalma sağladığını raporlamıştır (Elkelawy vd., 2023).

Ferrosen gibi organometalik bileşikler, yakıt içine eklendiğinde alev stabilizasyonu ve kömürleşmenin azaltılması yoluyla HC'de ciddi düşüşler gösterebilir; bazı çalışmalarda ferrosen eklenmesi HC'de %5 civarında azalma bildirilmiştir (Dobrzyńska vd., 2022).

Aşağıda literatürde sıkça tekrarlanan gözlemler özetlenmiştir:

- **HC azalması genel eğilimi:** Metal oksit (CeO₂, ZnO, TiO₂) ve bazı karbon-tabanlı nanopartiküller yakıt içine eklendiğinde HC emisyonlarında belirgin azalma raporlanmıştır; özellikle CeO₂ çalışmalarında tekrarlı ve tutarlı HC düşüşleri bildirilmiştir (Tamrat vd., 2025).
- **Miktar ve etkinlik arasında optimum vardır:** Her nanopartikül için HC azaltım etkinliği, doz artışıyla lineer

artmaz; optimum aralık ve aglomerasyon eşiği vardır (Murugesan vd., 2025).

Literatür genel sonucu, dizel yakıtlara eklenen uygun seçilmiş ve uygun şekilde disperse edilmiş nanopartiküllerin HC emisyonlarını azaltma potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir; CeO₂ ve belirli metal oksitler en kuvvetli desteklenen örnekler arasındadır.

Nanopartikül İlavesinin Azot Oksit (NO_x) Emisyonları Üzerindeki Etkisi

Dizel motorları yüksek termodinamik verim ve tork sağladıkları için ulaşım ve ağır hizmet uygulamalarında geniş biçimde kullanılmaktadır; ancak yüksek yanma sıcaklık ve basınçları NO_x oluşumuna elverişlidir. Geleneksel emisyon azaltma stratejileri (EGR, SCR, oksidasyon katalizörleri vb.) maliyet/karmaşıklık açısından sınırlamalar içerir. Bu sebeple yakıta doğrudan düşük konsantrasyonlarda nanopartikül ilavesi gibi yaklaşımlar, hem motor içi koşulları hem de egzoz kimyasını modifiye ederek emisyonları etkileyebilecek ilginç bir alternatif sunar. Farklı nanoparçacık türlerinin yakıtla karıştırılmasının NO_x üzerindeki etkisi en tartışmalı konulardan biridir. Literatürde bazı nanoparçacıkların NO_x'ta azalma sağladığı, bazılarının ise yanmanın iyileşmesiyle NO_x artışına yol açtığı ya da etkilerin çalışma koşullarına/partikül türüne bağlı olarak değiştiği raporlanmıştır (Fayad vd., 2023).

Nanoparçacık katkılarının NO_x'te artışa neden olduğu bildiren çalışmalarda daha hızlı/iyileşmiş yanma ve katkıların yanma başlangıcını öne çekmesi sonucu maksimum sıcaklıkların yükselmesi gösterilmektedir.

NO_x terimi genellikle NO ve NO₂'yi kapsar; dizel silindirlerinde üç temel mekanizma ile oluşur:

1. **Termal NO (Zeldovich mekanizması):** Yüksek sıcaklıklarda ($\approx >1800$ K) N_2 ve O atomları arasında kinetik olarak hızlanan reaksiyonlar sonucu NO oluşur. Yanma sıcaklığının artması termal NO'yu yükseltir.
2. **Frenkel/Prompt NO (Fenomenolojik):** Yakıt kökenli azot içeren radikaller ile havadaki azotun etkileşimi sonucu erken oluşan NO türleri. Dizelde genelde daha düşüktür.
3. **Yakıt-bağlantılı NO_x :** Yakıtın içindeki azot bileşenlerinden kaynaklanan NO_x ; biyodizellerde veya diğer azot içeren katkılarda artış olabilir.

Nanopartiküllerin yakıt/yanma süreçlerine etkileri bu mekanizmaların her birini dolaylı/katkılı olarak etkileyebilir: yanma sıcaklığını, alev yayılım hızını, oksidasyon hızını ve lokal oksijen aktivitesini değiştirirler; dolayısıyla NO_x parametreleri de değişir.

Nanoparçacık ilaveleri temel olarak birkaç mekanizma üzerinden etki eder:

- **Katalitik etki:** Metal oksit nanopartiküller (ör. CeO_2 , MnO_2 , CuO , ZnO) yüzeylerinde oksijen depolama/transfer kapasitesi veya yüzey reaksiyonları aracılığıyla yakıt parçalanmasını, hidrokarbon oksidasyonunu ve partikül oksidasyonunu hızlandırabilir. Bu durum yanmanın daha tam olmasını sağlayabilir.
- **Termal iletkenlik ve sıvı termodinamik etkiler:** Nanopartiküller yakıtın ısı iletim özelliklerini değiştirerek yakıt damlacık ısınmasını ve buharlaşmasını etkileyebilir; daha küçük damlacıklar/ağır buharlaşma, daha hızlı yanma demektir.
- **Alev ve alev yayılım etkileri (radikal sağlama):** Karbon bazlı nanomalzemeler (karbon nanotüp, grafen türevleri) yüzeylerinde hidrokarbonların adsorpsiyonu ve radikallerin oluşumunu kolaylaştırabilir, böylece alev kimyasını değiştirebilir.
- **Oksijen depolama/çeşitlendirme kapasitesi (OSC):** Özellikle CeO_2 gibi malzemelerde OSC olarak adlandırılan

özellik, lokal oksijen aktivitesini düzenleyerek yanma sırasında oksidasyon reaksiyonlarını etkiler. Bu durum, NO_x 'i artırabilecek/düşürebilecek sonuçlar doğurur (şartlara bağlı).

Bu mekanizmalar sıklıkla birbiriyle etkileşim halindedir; bu nedenle her bir nanoparçacık-tipi için deneysel sonuçlar farklı eğilimler gösterebilir.

Nanopartikül Türleri ve NO_x Üzerindeki Deneysel Bulguları

CeO_2 nanopartiküllerinin egzoz emisyonlarındaki NO_x üzerindeki etkileri çalışmaya göre değişkenlik gösterir. Bazı çalışmalarda CeO_2 ilavesi NO_x 'ta düşüş sağlarken (oksidasyon katalizi ve daha etkin yakıt oksidasyonu nedeniyle), diğer çalışmalarda yanmanın daha tam olması sonucu NO_x artışı raporlanmıştır. Örneğin, bazı deneysel çalışmalar CeO_2 ilavesiyle CO ve UHC düşerken NO_x artışları göstermiştir; buna karşılık başka çalışmalar NO_x azalması bildirmiştir— bunun arkasında nanoparçacık yükü, yakıt/biyo-karışım, motor yükü ve hız gibi parametreler yatmaktadır.

Al_2O_3 nanopartiküllerinin ilavesi birçok çalışmada NO_x 'ta azalma sağladığı rapor edilmiştir; bazı çalışmalar NO_x 'ta kısmi azalma, bazılarında ise küçük artış bildirmiştir. Al_2O_3 'un etkisi büyük ölçüde partikül boyutu, ilave oranı ve yakıt/biyo-bileşimi ile ilişkilidir.

TiO_2 'nin çoğu çalışmada yanma verimliliğini artırdığına ve NO_x 'da artışa neden olduğuna sıklıkla rastlanmıştır. Bunun nedeni daha yüksek alev sıcaklıkları ve daha tam yanmadır; ancak bazı formülasyon ve yükleme seviyelerinde NO_x 'ta azalma raporlayan çalışmalar da mevcuttur. TiO_2 'nin fotokatalitik ve yüzey-oksidasyon özellikleri yanma dinamiklerini karmaşıktırmaktadır (Ghanati vd., 2023).

ZnO ve bazı diğ er metal oksitler is ve CO'yu azaltma eğilimindedir; ZnO'nun bazı çalışmalarda NO_x azaltıcı etkiler g sterdiğı bildirilmiştir. Bununla birlikte Mn veya Ni gibi diğ er metallerin eklenmesi bazen NO_x artışına yol açmıştır. Metal türünün katalitik etkinliğı önemlidir (Fayad vd., 2023).

Karbon nanotüpler ve grafen türevleri yakıtın ısı iletkenliğini ve damlacık buharlaşmasını etkileyerek daha iyi yanma sağlayarak NO_x'da artışa (yanma sıcaklığındaki artış nedeniyle) yol açabilir. Ancak, katı karbon nanomalzemelerin yakıt içinde dağılımı zor olduğundan çalışma sonuçları değişkendir ve ilave yüzey işleme/dispersiyon teknikleri gerekir (Elkelawy vd., 2023).

Literatürde görülen çelişkili sonuçların ardında birkaç ana faktör vardır:

1. **Yanma sıcaklığı ve zamanlama:** Nanopartiküller yanmayı daha tam hale getirdiğı için alev sıcaklığı ve lokal oksijen serbestliğı artabilir; bu durum termal NO artışına neden olur. Öte yandan bazı nanopartiküller lokal radikal dengelerini değiştirerek veya geçici olarak oksijen depolayarak NO_x üretimini sınırlandırabilir.
2. **Katalitik oksidasyon vs. alev katalizi:** CeO₂ gibi yüksek oksijen depolama kapasitesine sahip materyaller yanma sonrası egzoz kimyasını değiştirip NO_x'ın dönüşümünü destekleyebilir; ancak aynı malzeme yakma aşamasında sıcaklık artışı dolayısıyla NO_x'ı da artırabilir. Dolayısıyla zamanlama (yanma içi vs. egzoz sonrası) kritiktir.
3. **Dağılım/dispersion ve agregasyon:** Aglomerasyon durumunda nanomalzeme etkinliğı azalır veya farklı termal davranış gösterir; iyi disperse edilmiş nanoparçacıklar daha belirgin etkiler verir.
4. **Yük ve motor çalışma koşulları:** Düşük yüklerde ve düşük sıcaklıklarda nanopartikül etkileri farklı; yüksek yüklerde farklı. Bir çalışmada belirli bir nanopartikül yakıt ilavesi

yüksek yüke NO_x azaltımı sağlarken orta yükte artışa neden olmuştur.

5. **Yakıt tipi (fosil dizel vs. biyodizel karışımları):** Biyodizellerin oksijen içeriği ve farklı kimyası nanopartikül etkilerini değiştirebilir; örneğin CeO₂, bazı biyodizel karışımlarında NO_x'ı azaltma eğilimi göstermiştir.

Nanopartikül katkıları dizel yakıtların yanma karakteristiğini ve egzoz emisyonlarını değiştirebilen güçlü araçlardır. Bununla birlikte NO_x üzerindeki etkileri evrensel değildir: bazı nanopartiküller ve koşullar NO_x'ı azaltırken, diğerleri daha tam yanma sonucu NO_x'ı artırabilir. Literatürde CeO₂, Al₂O₃, ZnO gibi bazı metal oksitlerin NO_x'ı düşürebildiğine dair raporlar bulunurken; TiO₂ ve karbon bazlı malzemeler sıklıkla NO_x artışı ile ilişkilendirilmiştir.

Dizel yakıtlara nanoparçacık ilavesi, uygun nanoparçacık seçimi ve işlem parametreleri altında motor verimliliğini artırma ve is, karbon monoksit ve hidrokarbon emisyonlarını düşürme potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, NO_x üzerindeki etkiler karışık olup genelde artış eğilimi göstermektedir. Nanoparçacıkların egzoz kimyası ve toksikolojisi konusundaki belirsizlikler, geniş çaplı saha uygulaması öncesi çözülmelidir. Gelecekteki çalışmaların standardize edilmiş protokoller ve çok disiplinli yaklaşımlar ile sağlık/çevre risklerini de eşzamanlı olarak değerlendirmesi gerekmektedir.

Kaynakça

Ağbulut, Ü., Elibol, E., Demirci, T., Sarıdemir, S., Gürel, A. E., Rajak, U., & Verma, T. N. (2022). Synthesis of graphene oxide nanoparticles and the influences of their usage as fuel additives on CI engine behaviors. *Energy*, 244, 122603.

Anish, M., Majid, M., Thentral, T. T., Raaza, A., Kumar, A., Deepak, J. R., & Jayaprabakar, J. (2025). Effect of cerium oxide nanocatalyst on performance emissions and noise of diesel biodiesel blends in a variable compression ratio engine. *Scientific Reports*, 15(1), 40823.

Dessie, D., Yeshanew, E. S., Nallamothu, R. B., & Gashaw, G. (2025). Experimental investigation of Al_2O_3 and CeO_2 nanoparticle additives in diesel-cottonseed biodiesel (CSOME) blends for performance and emission mitigation in a CI engine. *Scientific Reports*, 15(1), 42747.

Dobrzyńska, E., Szewczyńska, M., Puchałka, B., Szczotka, A., & Woodburn, J. (2022). The Effect of Nano-Additives on Diesel Engine Exhaust Emissions. *Polish Journal of Environmental Studies*, 31(1).

Elkelawy, M., El Shenawy, E. S. A., Bastawissi, H. A. E., & Shams, M. M. (2023). Impact of carbon nanotubes and graphene oxide nanomaterials on the performance and emissions of diesel engine fueled with diesel/biodiesel blend. *Processes*, 11(11), 3204.

Ekhtor, O. C., Orish, F. C., Nnadi, E. O., Ogaji, D. S., Isuman, S., & Orisakwe, O. E. (2024). Impact of black soot emissions on public health in Niger Delta, Nigeria: understanding the severity of the problem. *Inhalation Toxicology*, 36(5), 314-326.

Fayad, M. A., Sobhi, M., Chaichan, M. T., Badawy, T., Abdul-Lateef, W. E., Dhahad, H. A., & Al-Amiery, A. A. (2023). Reducing soot nanoparticles and NO_x emissions in CRDI diesel

engine by incorporating TiO_2 nano-additives into biodiesel blends and using high rate of EGR. *Energies*, 16(9), 3921.

Ghanati, S. G., Doğan, B., & Yeşilyurt, M. K. The effects of the usage of silicon dioxide (SiO_2) and titanium dioxide (TiO_2) as nano-sized fuel additives on the engine characteristics in diesel engines: a review. *Biofuels*. 2023; 15 (2); 229-243.

Hoang, A. T., Le, M. X., Nižetić, S., Huang, Z., Ağbulut, Ü., Veza, I., & Nguyen, X. P. (2022). Understanding behaviors of compression ignition engine running on metal nanoparticle additives-included fuels: A control comparison between biodiesel and diesel fuel. *Fuel*, 326, 124981.

Kaskun Ergani, S., Kocaman, A., & Akinay, Y. (2021). $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ nanoparticles-coated TiO_2 catalyst on the exhaust pollutants of a diesel engine. *Applied Nanoscience*, 11(12), 2759-2766.

Khaskheli, A. A., Xu, L., & Liu, D. (2022). Manganese oxide-based catalysts for soot oxidation: a review on the recent advances and future directions. *Energy & fuels*, 36(14), 7362-7381.

Li, H., Li, K., Wang, H., Zhu, X., Wei, Y., Yan, D., ... & Zhai, K. (2016). Soot combustion over $\text{Ce}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{2-\delta}$ and $\text{CeO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$ catalysts: Roles of solid solution and interfacial interactions in the mixed oxides. *Applied Surface Science*, 390, 513-525.

Luo, J., Zhang, H., Liu, Z., Zhang, Z., Pan, Y., Liang, X., & Jiang, C. (2023). A review of regeneration mechanism and methods for reducing soot emissions from diesel particulate filter in diesel engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(37), 86556-86597.

Maurya, R. K. (2017). Low temperature combustion engines. In *Characteristics and Control of Low Temperature Combustion*

Engines: Employing Gasoline, Ethanol and Methanol (pp. 31-133). Cham: Springer International Publishing.

Murugesan, E., Dhairiyasamy, R., Dixit, S., & Singh, S. (2025). The impact of nanoparticle-diesel blends on fuel properties, combustion efficiency, and emissions. *Case Studies in Thermal Engineering*, 69, 106070.

Pan, S., Wei, J., Tao, C., Lv, G., Qian, Y., Liu, Q., & Han, W. (2021). Discussion on the combustion, performance and emissions of a dual fuel diesel engine fuelled with methanol-based CeO₂ nanofluids. *Fuel*, 302, 121096.

Promhuad, P., Sawatmongkhon, B., Theinnoi, K., Wongchang, T., Chollacoop, N., Sukjit, E., & Tsolakis, A. (2024). Effect of metal oxides (CeO₂, ZnO, TiO₂, and Al₂O₃) as the support for silver-supported catalysts on the catalytic oxidation of diesel particulate matter. *ACS omega*, 9(17), 19282-19294.

Resitoglu, I. A., Altinisik, K., Keskin, A., Yildirimcan, S., Ocakoglu, K., & Omar, M. A. (2017). Development of Fe₂O₃ based catalysts to control pollutant emissions in diesel engines. *Fuel*, 208, 111-116.

Sánchez, N., Millera, Á., Bilbao, R., & Alzueta, M.. (2013). Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), soot and light gases formed in the pyrolysis of acetylene at different temperatures: Effect of fuel concentration. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.10.027>

Şener, R., Uslu, S., & Savaş, A. (2025). The role of magnetic maghemite (Fe₂O₃) nanoparticles for the improvement of 2nd generation biodiesel/diesel Blends: RSM based multi-objective optimization. *Renewable Energy*, 123211.

Tamrat, S., Ancha, V. R., Gopal, R., Nallamotheu, R. B., & Seifu, Y. (2024). Emission and performance analysis of diesel engine

running with CeO₂ nanoparticle additive blended into castor oil biodiesel as a substitute fuel. Scientific Reports, 14(1), 7634.

Tao, F., Golovitchev, V., & Chomiak, J. (2004). A phenomenological model for the prediction of soot formation in diesel spray combustion. Combustion and Flame. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2003.11.001>

Yeneneh, K., & Sufe, G. (2025). Enhancing Diesel Engine Performance and Emissions Using Alumina Nanoparticle-Blended Waste Plastic Oil Biodiesel: An Experimental and Predictive Approach. Industrial & Engineering Chemistry Research.