

Holey Süper Grafen (HSG) Nano-Katkılı Dizel Motor Yağlarının Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Recep Çağrı ORMAN* 

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/01/2026
Düzeltilme: 06/02/2026
Kabul: 19/02/2026

Anahtar Kelimeler

Holey süper grafen
Motor yağı katkı maddeleri
Triboloji
Dizel motorlar

Article Info

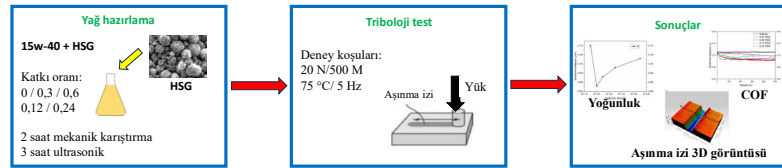
Research article
Received: 14/01/2026
Revision: 06/02/2026
Accepted: 19/02/2026

Keywords

Holey super graphene
Engine oil additives
Tribology
Diesel engines

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

0,03 g/25 mL HSG, 15W-40 dizel motor yağında yaklaşık %20 daha düşük sürtünme sağlamış; yüksek dozlarda performans gerilemiştir. / 0.03 g/25 mL HSG provided about 20% lower friction in 15W-40 diesel engine oil; performance declined at higher dosages.



Şekil A: Grafik Özet /Figure A: Graphical Abstract

Önemli noktalar (Highlights)

- 25 mL baz yağ içinde 0,03-0,24 g HSG aralığı ilave edilmiştir. / The 0.03-0.24 g HSG range has been added in 25 mL base oil.
- En düşük sürtünme katsayısı 0,03 g HSG ilavesinde elde edilmiştir. / The lowest coefficient of friction was obtained with 0.03 g HSG.
- Yoğunluk ölçümleri, HSG ilavesinin fiziksel özelliklere etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. / Density measurements showed a negligible effect of HSG on bulk physical properties.
- Sürtünme iyileşmesi tribofilm oluşumu ve lameller kayma mekanizması ile ilişkilendirilmiştir. / The friction improvement was associated with tribofilm formation and lamellar sliding.

Amaç (Aim): Bu çalışma, HSG nano-katkısının 15W-40 dizel motor yağının tribolojik performansına etkisini deneysel olarak belirlemeyi amaçlamaktadır. / This study aims to experimentally determine the effect of HSG nano-additive on the tribological performance of 15W-40 diesel engine oil.

Özgünlük (Originality): Çalışma, HSG'nin dizel motor yağı içindeki tribolojik davranışını ve konsantrasyon etkisini karşılaştırmalı biçimde özetleyen ilk düzenli değerlendirmelerden biridir. / The study is among the first systematic evaluations summarizing the tribological behavior and concentration-dependent effect of HSG in diesel engine oil.

Bulgular (Results): 0,03 g HSG ilavesi yaklaşık %20 sürtünme iyileşmesi sağlamış; daha yüksek katkı seviyelerinde sürtünme yeniden artmıştır. / Adding 0.03 g HSG provided approximately 20% friction improvement, while friction increased again at higher additive levels.

Conclusion (Sonuç): HSG, düşük konsantrasyonda etkili bir yağ katkısı potansiyeli göstermiş ve optimum etki 0,03 g/25 mL seviyesinde gözlenmiştir. / HSG showed potential as an effective lubricant additive at low concentration, with optimum performance observed at 0.03 g/25 mL.



Holey Süper Grafen (HSG) Nano-Katkılı Dizel Motor Yağlarının Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Recep Çağrı ORMAN*

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 14/01/2026
Düzeltilme: 06/02/2026
Kabul: 19/02/2026

Anahtar Kelimeler

Holey süper grafen
Motor yağı katkı maddeleri
Triboloji
Dizel motorlar

Öz

Bu çalışmada, Holey Süper Grafen (HSG) nano-katkısının dizel motor yağının tribolojik özelliklerinin üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Baz yağ hacmi 25 mL olacak şekilde hazırlanan deneysel yağlara sırasıyla 0,03, 0,06, 0,12 ve 0,24 g HSG ilave edilerek gerçekleştirilen aşınma testleri, katkı oranının sürtünme davranışı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. En düşük sürtünme katsayısı, 25 mL yağa 0,03 g HSG ilavesiyle elde edilmiş ve katkısız yağa kıyasla yaklaşık %20 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Daha yüksek katkı seviyelerinde ise sürtünme katsayısının yeniden arttığı gözlenmiştir. Yoğunluk ölçümleri, HSG ilavesinin yağın fiziksel özellikleri üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar, sürtünmedeki iyileşmenin yoğunluk değişiminden değil, HSG'nin yüzeyde oluşturduğu tribofilm ve lameller kayma mekanizmasından kaynaklandığını işaret etmektedir.

Investigation of the Effect of Holey Super Graphene (HSG) Nano-Additive on the Tribological Performance of Diesel Engine Oils

Article Info

Research article
Received: 14/01/2026
Revision: 06/02/2026
Accepted: 19/02/2026

Keywords

Holey super graphene
Engine oil additives
Tribology
Diesel engines

Abstract

In this study, the effect of Holey Super Graphene (HSG) nano-additive on the tribological performance of a diesel engine oil was experimentally investigated. Wear tests were conducted using lubricants prepared with a constant base oil volume of 25 mL, into which HSG was added in amounts of 0.03, 0.06, 0.12, and 0.24 g. The results clearly demonstrate that the additive concentration exerts a pronounced influence on frictional behavior. The lowest coefficient of friction was achieved with the addition of 0.03 g HSG to 25 mL of oil, corresponding to an improvement of approximately 20% compared to the neat oil. At higher additive contents, however, the coefficient of friction was observed to increase again. Density measurements revealed that the incorporation of HSG has a negligible effect on the bulk physical properties of the oil. The results indicate that the improvement in friction is not due to density changes, but rather to the tribofilm and lamellar sliding mechanism created by HSG on the surface.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlarda enerji verimliliğinin artırılması ve emisyonların azaltılması, günümüz otomotiv ve enerji sektörlerinin stratejik öncelikleri arasında yer almakta olup, motor içerisinde gerçekleşen enerji dönüşümünün yaklaşık %10-20'si sürtünme kayıplarından kaynaklanmaktadır [1-4]. Bu kayıpların büyük bölümü piston-segman-silindir gömleği, krank mili-yatak ve valf mekanizması gibi yüksek temas basıncı (10-100

MPa), yüksek sıcaklık (150-500 °C) ve değişken kayma hızlarının (0,1-10 m/s) bir arada bulunduğu kritik tribolojik bölgelerde meydana gelmektedir [5,6]. Modern motorlarda güç yoğunluğunun sürekli artırılması, turboşarj ve direkt enjeksiyon gibi teknolojilerin yaygınlaşması, düşük viskoziteli yağların (0W-20, 5W-30 gibi) tercih edilmesi ve start-stop sistemlerinin sık kullanımı, yağ filmi kalınlığının daha sık olarak kritik eşiklerin ($\lambda < 1$) altına düşmesine ve sınır ile karışık yağlama rejimlerinin baskın hâle gelmesine yol açmaktadır

[7–9]. Bu durum, sürtünme katsayısında ani yükselmeler ($\mu > 0,1$), mikro-kaynaklanma, adeziv ve abrasiv aşınma mekanizmalarının tetiklenmesi ve sonuç olarak hem yakıt tüketiminin %5-10 oranında artması hem de CO₂, NO_x ve partikül emisyonlarının yükselmesi anlamına gelmektedir [10,11]. Ayrıca, aşınma kaynaklı yüzey hasarları motor bileşenlerinin çalışma ömrünü %20-50 kısaltmakta, bakım-onarım maliyetlerini yılda milyarlarca dolar seviyesinde artırmakta ve çevresel sürdürülebilirlik hedeflerini zorlaştırmaktadır [12,13].

Motor yağları, hidrodinamik, elastohidrodinamik (EHD), karışık ve sınır yağlama rejimleri arasında dinamik geçişler sergileyen karmaşık bir tribolojik sistem içinde çalışmaktadır. Özellikle üst ölü nokta (ÜÖN) civarında piston segmanı-silindir gömleği temas bölgesinde yağ filmi kalınlığı 100 nm'nin altına inebilmekte; bu da metal asperitlerin doğrudan temas ettiği sınır yağlama koşullarını ortaya çıkarmakta ve yerel sıcaklık yükselmelerine (flash temperature) neden olmaktadır [14,15]. Tek silindirli motorlarda bu geçişler daha belirgin ve şiddetlidir; çünkü her yanma olayı tek bir silindirde gerçekleştiğinden ani basınç (tepe silindir basıncı > 200 bar) ve sıcaklık dalgalanmaları daha yoğundur, yağ filmi bütünlüğü daha kolay bozulmakta ve scuffing (yüzey çizilmesi) gibi arızalar daha sık gözlenmektedir [16,17]. Benzinli motorların yüksek devir (6000-8000 rpm) ve düşük tork karakteristiği hidrodinamik sistemi desteklerken, dizel motorların düşük devir (2000-4000 rpm) ve yüksek tork yapısı sınır rejimi baskın kılmakta; bu farklılık viskozite sınıflarını ve tribolojik davranışları doğrudan etkilemektedir [18]. Bu nedenle tek silindirli motorlar, nano-katkılı yağların gerçek çalışma koşullarındaki davranışını değerlendirmek için oldukça değerli bir deney platformu sunmakta olup, laboratuvar testlerinde (pin-on-disc, four-ball) elde edilen sonuçların motor simülasyonu ile doğrulanması triboloji araştırmalarının vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir [19].

Geleneksel motor yağlarında uzun yıllardır kullanılan çinko dialkilditiyofosfat (ZDDP), molibden dialkilditiokarbamat (MoDTC) ve organik sürtünme modifikatörleri, belirli koşullarda etkili tribofilm oluşturabilse de yüksek sıcaklık (>150 °C), düşük hız-yüksek yük ve uzun süreli sınır yağlama rejimlerinde etkinliklerini önemli ölçüde kaybetmekte; ayrıca fosfor ve kükürt içeriklerinden dolayı katalitik dönüştürücü zehirlenmesi, egzoz gazı emisyonlarının artması ve çevresel düzenlemelere (örneğin Euro 6/7 standartları) uymama gibi sorunlara yol açmaktadır [20–23]. Bu sınırlamalar, yeni nesil “düşük SAPS”

(sülfatlanmış kül, fosfor ve kükürt) ve “ashless” katkı sistemlerine olan ihtiyacı artırmakta olup, organik katkıların yerini alabilecek inorganik nano malzemelere yönelik araştırmaları hızlandırmaktadır [24–26].

Son on yılda nano boyutlu katı yağlayıcıların (hBN, MoS₂, WS₂, grafen ve türevleri) motor yağlarına düşük konsantrasyonlarda (%0,01-0,5 kütle) eklenmesiyle elde edilen tribolojik iyileşmeler dikkat çekici düzeydedir [25,27,28]. Bu malzemeler; lamellar kristal yapıları sayesinde düşük kayma direnci (shear strength < 25 MPa), yüksek yüzey alanı (>200 m²/g) ile mikro-asperit doldurma (mending) etkisi, tribokimyasal reaksiyonlarla sürekli yenilenen koruyucu film oluşturma ve 500-900 °C'ye varan termal kararlılık gibi çoklu mekanizmalarla çalışmaktadır [27,29,30]. Özellikle hekzagonal bor nitrür (hBN) borik asit türevli camsı tribofilm oluşturma yeteneğiyle, grafen ise olağanüstü mekanik dayanımı (Young modülü ~1 TPa), düşük sürtünme katsayısı ($\mu < 0,01$) ve yüzey yenileme (self-repairing) etkisi ile öne çıkmaktadır [31,32]. Grafen bazlı katkıların motor yağlarında kullanımı, sürtünmeyi %40-80, aşınmayı %30-50 oranında azaltmakta; ayrıca termal iletkenliği artırarak yağ bozunmasını geciktirmekte ve yakıt verimliliğini %2-5 iyileştirmektedir [33–36].

Ancak klasik grafenin hidrofobik yapısı nedeniyle baz yağ içindeki dispersiyon stabilitesi sınırlı kalmakta, aglomerasyon ve çökeltme sorunları ortaya çıkabilmekte olup, bu durum uzun süreli kullanımda performans düşüşüne yol açmaktadır [31,37]. Bu problemi aşmak üzere geliştirilen Holey Süper Grafen (HSG), grafen levhalarında kontrollü olarak oluşturulan nano-gözenekler (çap: 1-10 nm) sayesinde yüzey alanını 1000 m²/g'nin üzerine çıkarmakta, hidrofilik ve hidrofobik karakterini dengelemekte ve yağ fazındaki dispersiyon stabilitesini dramatik ölçüde iyileştirmektedir [38,39]. HSG'nin sentezi genellikle Hummers metodu ile elde edilen grafen oksitten başlayarak kimyasal aşındırma (örneğin H₂O₂ ile oksidatif delik açma), termal indirgeme veya lazer ablasyon gibi yöntemlerle gerçekleştirilmekte; bu süreçler gözenek boyutunu ve yoğunluğunu hassas şekilde kontrol etme imkânı sunmaktadır [40,41]. Grafen ailesi içinde yer alan ‘holey’ (gözenekli) grafen yapıları, grafen tabakasının taban düzleminde oluşturulan in-plane gözenekler nedeniyle ‘graphene nanomesh’ olarak da tanımlanmaktadır. Bu kristal yapı, grafene kıyasla erişilebilir yüzey alanını ve kenar yoğunluğunu artırarak yüzey etkileşimini güçlendirebilmekte; ayrıca gözenekli yapı sayesinde tabakaların yeniden istifleme

(restacking) eğilimi azalabildiğinden, yağ ortamında daha etkin ve kararlı bir dağılıma ve sınır yağlama koşullarında daha kararlı koruyucu tabaka oluşumuna katkı sunabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan Holey Super Graphene (HSG) terimi, bu tür gözenekli grafen türevlerini ifade eden ürün adı olup, beklenen tribolojik katkı; grafenin lameller kayma özelliği ile birlikte, gözenek-kenar yapısının sağladığı artmış aktif yüzey etkileşimi üzerinden açıklanmaktadır [41,42]. Ayrıca, HSG'nin yüksek gözeneklilik oranı (%20-50) termal iletkenliği artırırken, mekanik dayanımı koruma altına almakta ve sürtünme sırasında oluşan ısıyı daha etkili dağıtmaktadır [43,44].

Literatürde HSG'nin süperkapasitör, batarya, su arıtma ve katalizör uygulamaları yoğun olarak araştırılmış olsa da [41,45–47], motor yağı gibi yüksek sıcaklık, yüksek kayma gerilimi ve değişken yük içeren tribolojik sistemlerdeki davranışı neredeyse hiç çalışılmamıştır [39,44]. Mevcut grafen çalışmaları genellikle klasik grafen veya grafen oksit üzerine odaklanmakta olup, HSG'nin gözenekli yapısının sağladığı ekstra avantajlar (örneğin dispersiyon iyileşmesi ve film stabilitesi) tribolojik bağlamda yeterince değerlendirilmemiştir [44,48]. Özellikle benzinli ve dizel motor yağlarında HSG'nin konsantrasyona bağlı performansı, yakıt türüne göre farklılaşması ve gerçek motor yüzeylerindeki aşınma mekanizmaları üzerine karşılaştırmalı bir araştırma literatürde büyük bir boşluk olarak durmaktadır.

Bu çalışmada ticari bir 15W-40 dizel motor yağına, farklı konsantrasyonlarda (%0,02-0,2 kütle oranında) Holey Süper Grafen (HSG) nano-katkısı eklenmiştir. Hazırlanan katkılı yağların tribolojik performansı, gerçek bir tek silindirli motorun silindir gömleği yüzeyleri üzerinde test edilmiştir. Sürtünme katsayısı, aşınma hacmi ve yüzey pürüzlülüğü ELMETRICS 3D optik profilometre ile nicel olarak ölçülmüş, aşınma mekanizmaları ise SEM ve EDS analizleri ile detaylı şekilde incelenmiştir. Bu çalışma ile HSG nano-katkısının dizel motor yağlarındaki tribolojik etkisi ilk kez karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Samples)

Bu çalışmada kullanılacak tribolojik test numuneleri, tek silindirli dizel motorlardan temin edilen blok malzemelerden temin edilmiştir. Numuneler, aşınma deneylerinde karşılaştırılabilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edilebilmesi

amacıyla $30 \times 30 \times 5$ mm boyutlarında olacak şekilde hassas kesim cihazı ile hazırlanmıştır. Kesim işlemi sonrasında yüzeylerde oluşabilecek mekanik düzensizliklerin giderilmesi ve tüm numunelerde standart bir başlangıç yüzeyi elde edilmesi için çok kademeli bir yüzey hazırlama prosedürü uygulanmıştır.

İlk aşamada, numune yüzeyleri 120 grit ile başlayan ve sırayla 240, 400, 600, 800, 1200 ve 2000 grit SiC zımpara kağıtları ile ilerleyen bir zımparalama sürecine tabi tutulmuştur. Bu işlemde her bir grit aşamasında yüzeyin tamamen önceki çizik izlerinden arındırılması sağlanmış; yüzey morfolojisindeki değişim düzenli olarak kontrol edilerek gerekli geçişler yapılmıştır. Yüzey hazırlığı tamamlandıktan sonra, numunelerde zımparadan kalan izler, metal talaşları ve olası yağ bazlı kalıntıların bulunmaması için, numuneler alkol bazlı bir çözelti içinde 10 dakika süreyle ultrasonik banyoda temizlenmiştir. Temizleme işleminin ardından numuneler oda sıcaklığında basınçlı hava ile kurutulmuştur.

2.2. HSG Katkılı Motor Yağların Hazırlanması (Preparation of HSG-Additive Engine Oils)

Yağ olarak, dizel motorlar için 15W-40 sınıfında ticari motor yağı kullanılmıştır. HSG'nin yüksek yüzey alanı, gözenekli yapısı ve düşük kayma gerilimine sahip olması nedeniyle, yağlayıcı film kararlılığını artırma etkisi incelenmiştir. HSG katkılı yağlar, 25 mL baz yağ içinde sırasıyla 0,03 g, 0,06 g, 0,12 g ve 0,24 g HSG içerecek şekilde dört farklı konsantrasyonda hazırlanmıştır. Bu aralık, düşük katkı seviyelerinde HSG'nin yağ filmi kalınlığı ve sürtünme davranışı üzerindeki etkisini, yüksek seviyelerde ise yüzey etkileşimleri ve dispersiyon kararlılığını gözlemlemek amacıyla seçilmiştir. HSG nano-katkısı NanoGrafı'den hazır toz olarak temin edilmiştir. Nano-katkılı yağlar iki-aşamalı bir dispersiyon yöntemi ile hazırlanmıştır. Belirlenen miktardaki nano-katkı yağ fazına ilave edildikten sonra, parçacıkların yağ ile ön dispersiyon sağlamak ve makro-aglomeraları parçalamak amacıyla 200-400 dev/dk aralığında 2 saat mekanik karıştırma uygulanmıştır. Bunu takiben karışımlar 3 saat ultrasonik işlemde geçirilerek aglomerasyonun azaltılması ve daha homojen bir süspansiyon elde edilmesi hedeflenmiştir. Harici bir yüzey aktif madde ilave edilmemiştir; böylece surfactant kaynaklı reolojik ve tribokimyasal etkiler ayrı bir değişken oluşturmadan, nano-katkı türü ve miktarı tribolojik performansa etkisi değerlendirilebilmiştir. Tüm tribolojik testler karışımlar hazırlandıktan sonra

bekletilmeden olarak gerçekleştirilmiş ve deney öncesi kısa süreli homojenleştirme yapılmıştır.

2.3. Triboloji Deneyleri (Tribology Experiments)

HSG katkılı motor yağlarının tribolojik performansını değerlendirmek amacıyla aşınma deneyleri, Anton Paar Tribometer THT cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir katkılı yağ formülasyonu için hazırlanan numuneler, sabit çalışma koşullarında test edilmiştir. Deneylerde uygulanan normal yük 20 N, kayma mesafesi ise 500 m, reciprocating lineer mod, sinüs profil, 10 mm genlik, 5 Hz frekans, 15.71 cm/s maksimum kayma hızı, 20 N yük, 500 m toplam mesafe ve test sıcaklığı: 75 °C olarak belirlenmiştir. Kayma hızı ve yük değerleri, tek silindirik motorlarda görülen sınır ve karışık yağlama koşullarını laboratuvar ortamında temsil edebilecek şekilde seçilmiştir.

2.4. Yüzey Analizleri (Surface Analyses)

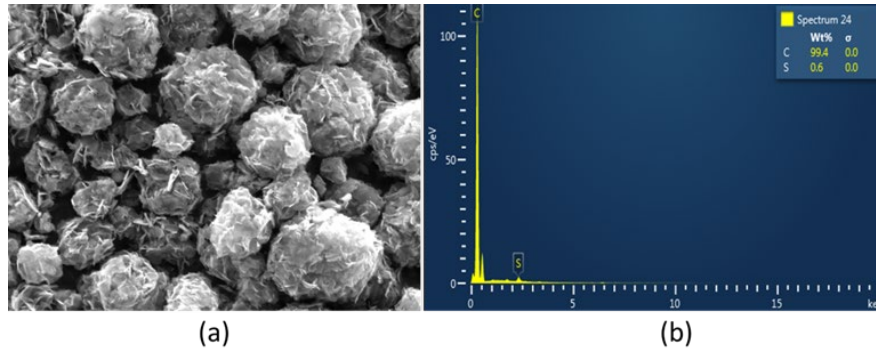
Aşınma deneylerinden elde edilen numune yüzeyleri, hem makroskobik hem de mikroskobik aşınma mekanizmalarını belirlemek amacıyla çok yönlü karakterizasyon yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. İlk aşamada, numunelerin aşınma izlerinin genel görünümünü incelemek için optik mikroskop görüntüleri alınmış ve aşınma izi

genişliği, yüzey süreksizlikleri ve makro düzeydeki deformasyonlar kaydedilmiştir. Optik incelemeden sonra, aşınma izlerini daha ayrıntılı değerlendirmek amacıyla yüzeyler Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM, Jeol) ile analiz edilmiştir. SEM incelemelerinde yüzeyde oluşan mikro çatlaklar, delaminasyon bölgeleri, abrazyon çizikleri, tribo film tabakaları ve olası oksidasyon izleri detaylı olarak incelenmiştir. Aşınmanın nicel olarak belirlenmesi için numuneler 3D optik profilometre ile analiz edilmiştir. Bu analiz kapsamında aşınma izi derinliği, genişliği ve aşınma hacmi hesaplanmış; ayrıca yüzey pürüzlülüğü parametreleri (Sa, Sq, Sz vb.) üç boyutlu topografik haritalar üzerinden elde edilmiştir. Profilometri sonuçları, tribolojik veriler ile ilişkilendirilerek katkının yüzey koruma performansı bütüncül şekilde değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Holey Super Graphene (HSG) Nano-katkı Karakterizasyon (Holey Super Graphene (HSG) nano-additive characterization)

Holey Super Graphene (HSG) nano-katkı SEM morfoloji görüntüleri ve EDS kimyasal bileşim analizi şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Holey Super Graphene (HSG) nano-katkı, (a) SEM görüntüsü, (b) EDS analizi (Holey Super Graphene (HSG) nano-additive, (a) SEM image, (b) EDS analysis)

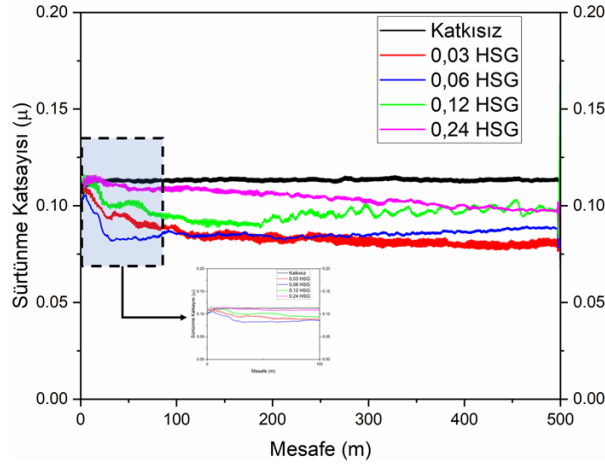
Şekil 1’de SEM görüntüsünde, HSG’nin tipik karbon-tabanlı tabakalı yapıların kıvrımlı ve buruşuk yüzey morfolojisi ile aglomere kümeler halinde bulunduğu; parçacık yüzeylerinde yer yer boşlukluve gözenekli doku ve düzensiz topografyanın görüldüğü anlaşılmaktadır. Bu morfolojik özellikler, yüksek kenar yoğunluğu ve yüzey topografyası ile uyumlu bir niteliksel işaret sunmaktadır. Ayrıca, noktasal EDS analizinde katkı malzemesinin neredeyse tamamen karbon esaslı olduğu açıkça doğrulanmıştır (C $\approx$ 99,4 wt.%). Sinyalde yalnızca iz düzeyde S ($\approx$ 0,6 wt.%) tespit edilmiştir; bu, işleme kaynaklı çok düşük seviyeli kalıntılar veya yüzey adsorpsiyonu ile ilişkili olup

malzemenin karbon bazlı karakterini değiştirmemektedir. Dolayısıyla, katkı malzemesinin kompozisyonu ve karbon esaslı yapısı doğrudan ölçümle desteklenmiş; yağ performansına ilişkin yorumlarımızın temel dayanağı olan tribofilm oluşumu ve sürtünme arayüzünde karbon-tabanlı transfer tabakası mekanizması güçlendirilmiştir.

3.2. Sürtünme Katsayısı Sonuçları (Coefficient Of Friction Results)

Şekil 2’de verilen sürtünme katsayısı (COF)-mesafe eğrileri, HSG nano-katkısının temel yağa farklı konsantrasyonlarda ilave edilmesinin tribolojik

davranış üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymaktadır. Katkısız yağ (siyah eğri) tüm test boyunca en yüksek COF değerini sergilemiş ve yaklaşık 0,105-0,115 aralığında nispeten kararlı bir seyir göstermiştir. Bu davranış, katkısız yağın sınır yağlama koşullarında yüzeyler arasında yeterli bir koruyucu film oluşturamadığını ve metal-metal temasının daha yoğun gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 2. Katkısız yağ ile (0,3-0,24) HSG nano-katkılı yağın sürtünme katsayısı değerleri (Coefficient of friction values of (0.3-0.24) HSG nano-additive oil and without additive oil)

Buna karşılık, 0,03 g HSG içeren yağ (kırmızı eğri), tüm formülasyonlar arasında en düşük sürtünme katsayısı değerine ulaşmış ve test boyunca yaklaşık 0,085-0,090 seviyesinde oldukça stabil bir tribolojik performans sergilemiştir. Bu sonuç, düşük konsantrasyonda HSG ilavesinin yüzey üzerinde etkili bir lameller koruyucu tabaka oluşturduğunu, böylece kayma direncini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Bu nedenle 0,03 g HSG katkısı optimum tribolojik performansı temsil etmektedir. 0,06 g HSG içeren yağ (mavi eğri), katkısız yağa kıyasla anlamlı bir iyileşme göstermiş olmakla birlikte, 0,03 g seviyesine göre daha yüksek COF değerleri sergilemiştir. Bu eğrinin yaklaşık 0,090–0,095 aralığında dengelendiği görülmektedir. Sürtünmedeki bu artışın test sırasında bilye ucu ile karşı yüzey arasında HSG parçacıklarının üç boyutlu (3D) aşınma bileşenlerini artırması olası bir mekanizmadır. HSG parçacıkları, lameller yapıları sayesinde kayma yönünde düşük direnç sağlarken, konsantrasyon arttıkça daha fazla parçacığın temas bölgesinde birikmesi, yüzeyde yalnızca kayma değil aynı zamanda mikro ölçekte yuvarlanma hareketleri, yerel gerilme artışları ve aşındırıcı yüzey etkileşimlerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Bu üç boyutlu aşınma bileşenleri, tribofilm bütünlüğünü bozarak sürtünme katsayısının yükselmesine katkıda bulunmuş olabilir. 0,12 g HSG içeren yağ (yeşil eğri) sürtünme

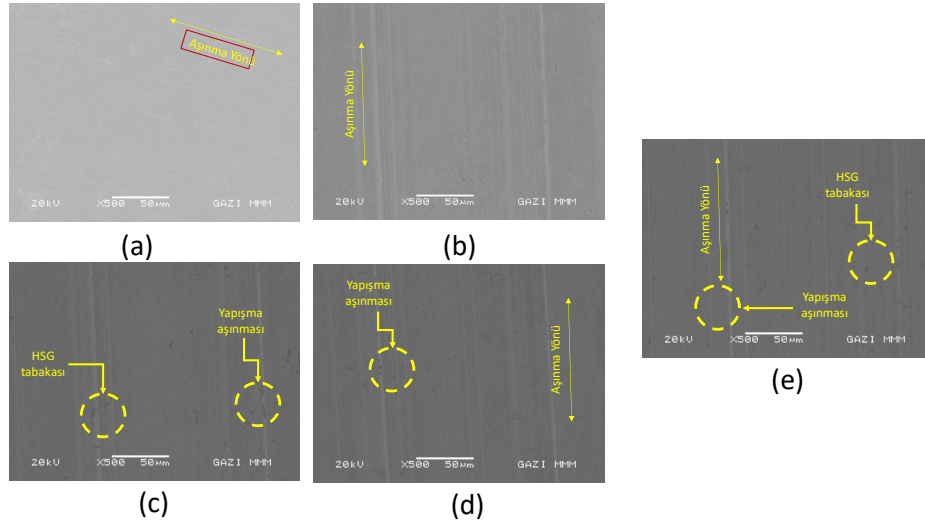
katsayısının daha da yükseldiği bir davranış sergilemiş ve yaklaşık 0,095-0,100 seviyelerinde seyretmiştir. Bu sonuç, artan partikül konsantrasyonunun yağ filmi içerisinde ideal dağılımı bozarak yüzeyde düzensiz bir film oluşumuna neden olabileceğini düşündürmektedir. En yüksek katkı oranı olan 0,24 g HSG (Pembe eğri) ise test boyunca en yüksek COF değerlerinden birini göstermiş ve yaklaşık 0,100-0,105 aralığında, katkısız yağdan dahi zaman zaman daha kötü bir performans sergilemiştir. Yüksek partikül konsantrasyonlarında görülen bu olumsuzluk, aglomerasyonun belirginleşmesi ve yüzey üzerinde kesintisiz bir tribofilm oluşumunu engellemesiyle açıklanabilir. Ayrıca deneylerin yağ ortamında ve nispeten düşük sıcaklık koşullarında yürütülmesi, HSG'nin yüzeye tribokimyasal film oluşumunu sınırlamış olabilir. Düşük sıcaklık, katı yağlayıcıların yüzeyle etkileşimini zayıflatarak, özellikle yüksek konsantrasyonlarda sürekli bir koruyucu tabakanın oluşmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, 0,12 g ve 0,24 g HSG içeren numunelerde yüzey filmindeki süreksizlikler aracılığıyla sürtünme katsayısının artmasına neden olmuş ve aşınma davranışını olumsuz etkilemiştir. Genel olarak, elde edilen bulgular HSG'nin belirli bir konsantrasyon aralığında tribolojik performansı artırdığını, ancak dozaj arttıkça dispersiyon kararlılığının bozulması nedeniyle aşınma davranışının olumsuz etkilenebileceğini göstermektedir. Bu bağlamda 0,03 g HSG katkısı optimum sürtünme azaltıcı etkiyi sağlamış ve HSG'nin yağlayıcı sistemlerde düşük dozlarda daha etkili bir katkı maddesi olduğunu ortaya koymuştur.

3.3. Yüzey Morfolojisi (Surface morphology)

Şekil 3'te sunulan SEM aşınma izi morfolojisi, farklı HSG konsantrasyonlarının dizel motor yüzeyde oluşturduğu aşınma izleri ve yüzey-topografya etkileşimini açık biçimde ortaya koyarak tribolojik performanstaki değişimin mikroyapısal temellerini göstermektedir. Şekil 2'de verilen SEM görüntüleri, katkısız yağdan başlayarak artan HSG oranlarının yüzey davranışını nasıl değiştirdiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Katkısız dizel yağı ile test edilen numune (Şekil 3a), aşınma yönüne paralel ilerleyen çizik izleri, yağ filminin yük taşıyamadığını ve taban malzeme ile Al₂O₃ bilye temasının kesintisiz sürdüğünü göstermektedir. Bu belirgin oluk yapısı, sınır yağlama koşullarında koruyucu bir tribofilmin oluşmadığını ve aşınmanın baştan sona iki-boyutlu abrazyon aşınma mekanizmasıyla ilerlediğini düşündürmektedir. Buna karşılık, 0,03 HSG (Şekil 3b) katkısı ile elde edilen numune yüzey, ilk duruma göre daha bütünlük ve tribolojik hasar

izlerinin oldukça sınırlı kaldığı bir görünüm sunmaktadır. Çizik izlerinin daralması, kenarlarının yuvarlaklaşması ve deformasyon bölgelerinin ortadan kalkması, grafen esaslı nanopartiküllerin yüzeyde düşük kayma dirençli bir tabaka oluşturarak asperite temasını kayda değer biçimde azalttığını göstermektedir. Ancak katkı oranı 0,06 (Şekil 3c) seviyesine ulaştığında bu iyileştirici etki kısmen zayıfladığı gözlenmektedir, çiziklerin çevresinde biriken parçacık kümeleri ve yüzeyi yer yer bozan mikro-çöküntüler, nanopartiküllerin tam homojen dağılmayıp aglomerasyon eğilimine girdiğini düşündürmektedir. Bu durum, tribofilmin sürekliliğini kısmen kaybetmesine ve iki-boyutlu aşınmanın yanında yer yer üç-boyutlu aşınma bileşenlerinin devreye girmesine yol açmaktadır. HSG oranının 0,12'e (Şekil 3d) çıkarılması ise yüzeyde daha belirgin malzeme çıkıntıları, düzensiz yırtılma izleri ve keskin kenarlı aşınma çizgileri oluşturarak aglomerasyon etkisinin güçlendiğini,

yükün sınırlı bölgelerde toplanarak yüzeyin daha düzensiz bir şekilde yıprandığını göstermektedir. Bu bozulmuş morfoloji, aşınmanın artık ağırlıklı olarak kontrolsüz üç-boyutlu abradif aşınma ile ilerlediğini ve tribofilmin yüksek katkı oranında kararsızlaştığını işaret eder. En yüksek katkı seviyesi olan 0,24 HSG'de (Şekil 3e) ise yüzey, parçacık kümeleri, kırılma alanları ve derinleşmiş çiziklerle belirgin biçimde en şiddetli aşınma izlerini göstermektedir. Bu yoğun kümelenme davranışı grafen tabakalarının yağ içerisinde dağılma kabiliyetini tamamen kaybettiğini, aşınmanın üç boyutlu etkisi altında ilerleyerek hem derin hem de süreksiz izler oluşturduğunu düşündürmektedir. Genel olarak, SEM görüntüleri katkısız yağda maksimum hasarın, 0,03 HSG'de en düşük aşınmanın, daha yüksek oranlarda ise aglomerasyonun baskınlaşmasıyla birlikte aşınmanın yeniden arttığını açık biçimde göstermektedir.

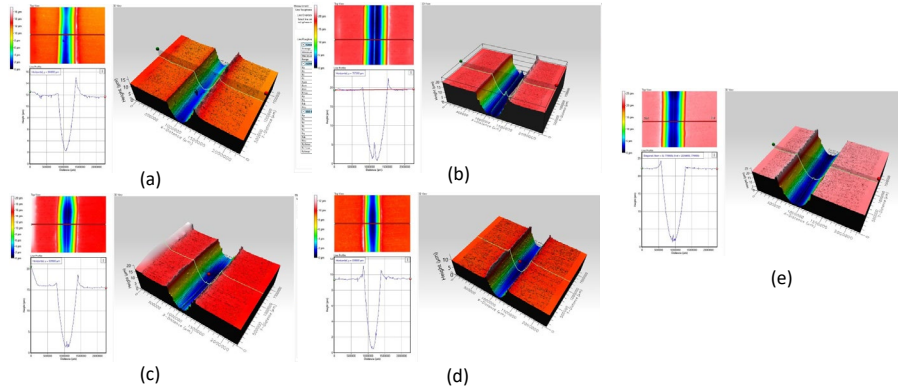


Şekil 3. HSG nano-katkısının farklı konsantrasyonlarında elde edilen aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri: (a) katkısız yağ, (b) 0,03 HSG katkılı, (c) 0,06 HSG katkılı, (d) 0,12 HSG katkılı ve (e) 0,24 HSG katkılı numuneler (SEM images of wear surfaces obtained at different concentrations of HSG nano-additive: (a) non additive oil, (b) 0.03% HSG additive, (c) 0.06% HSG additive, (d) 0.12% HSG additive, and (e) 0.24% HSG additive samples.)

3.4. Tribolojik Performansın Analizi (Tribological Performance Analysis)

Şekil 4'de verilen 3D profilometre yüzey topografyası, HSG nano-katkısının farklı katkı oranlarında aşınma yüzeyinde meydana gelen makro ve mikro-ölçekli geometrik değişimleri üç boyutlu olarak verilmiştir. Katkısız dizel yağıyla aşınma testi uygulanmış numunenin topografyası (Şekil 4a), aşınma izinin hem genişlik hem de derinlik bakımından oldukça belirgin olduğunu göstermekte; koyu mavi bölgenin geniş alanlara yayılması, yüzeyde yaklaşık 7-9 μm civarında bir çökmenin meydana geldiğini işaret etmektedir. Line profile eğrisi, merkeze doğru keskin bir V-şekilli

oyuk oluştuğunu ve taban derinliğinin 3-4 μm seviyelerine kadar indiğini göstermektedir. Bu durum, sınır yağlama koşullarında koruyucu tribofilmin oluşmadığını, taban malzeme ile Al_2O_3 bilye temasının sürekli hâkim olduğunu ve plastisiteye bağlı malzeme yığılmalarının yüzeyde belirginleştiğini göstermektedir. Elde edilen bu topografya, katkısız yağın düşük yük taşıma kapasitesini ve en yüksek sürtünme katsayısı ile aşınma hacmini üretme eğilimini mikroyapısal olarak doğrulamaktadır. HSG katkısının 0,03 olduğu numunenin topografyası (Şekil 4b), katkısız duruma kıyasla belirgin bir iyileşmeye işaret etmektedir.

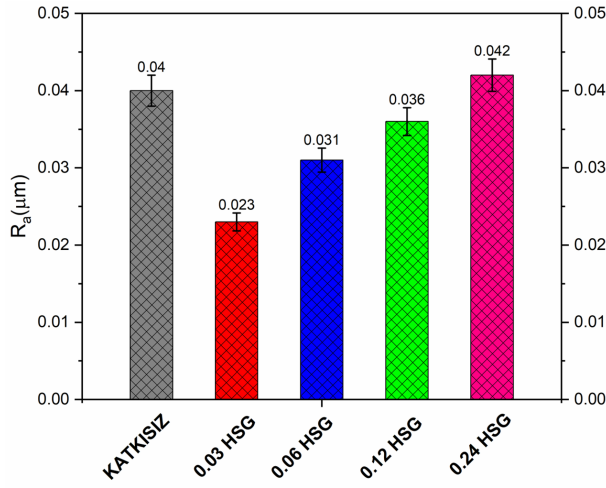


Şekil 4. HSG nano-katkısının farklı konsantrasyonlarında elde edilen aşınma yüzeylerinin 3D profilometre görüntüleri: (a) katkısız yağ, (b) 0,03 HSG katkılı, (c) 0,06 HSG katkılı, (d) 0,12 HSG katkılı ve (e) 0,24 HSG katkılı numuneler (3D profilometer images of wear surfaces obtained at different concentrations of HSG nano-additive: (a) non additive oil, (b) 0.03% HSG additive, (c) 0.06% HSG additive, (d) 0.12% HSG additive, and (e) 0.24% HSG additive samples.)

Aşınma izinin daralması, koyu mavi bandın incilmesi ve maksimum oyuk derinliğinin 5-6 μm seviyelerine düşmesi, HSG nanopartiküllerinin yüzey üzerinde kararlı bir tribofilmin tabakası oluşturarak taban malzeme ile bilye temasını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Profil tabanının daha yuvarlak olması ve malzeme yığılmalarının belirgin şekilde azalması, yüzeyin kayma yükünü daha homojen dağıttığını ve plastik deformasyonun sınırlı kaldığını ortaya koymaktadır. Bu katkı oranında yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin düşmesi, asperite yüksekliklerinin kontrol altına alındığını gösterirken, numunenin çalışmadaki en düşük sürtünme katsayısını üretmesi, bu topografik iyileşme ile tam bir uyum içindedir. HSG oranının 0,06'e yükseltilmesiyle elde edilen yüzey topografyası (Şekil 4c), optimum davranıştan uzaklaşmaya başladığını göstermektedir. Aşınma izinin hem genişlediği hem de 8-10 μm seviyelerine ulaşarak derinleştiği görülmekte; koyu mavi bandın belirginleşmesi, tribofilmin bu katkı seviyesinde bütünlüğünü koruyamadığını göstermektedir. Profil tabanının sivrileşmesi ve yüzey pürüzlülüğü parametrelerinin artması, nanoparçacıkların bu konsantrasyonda tam dağılmayarak aglomerasyon eğilimi gösterdiğini ve yüzeyde üç-boyutlu aşınma mekanizmasının devreye girdiğini ortaya koymaktadır. Bu davranış, sürtünme katsayısı ve aşınma hacmindeki artış ile tamamen örtüşmektedir. 0,12 HSG katkılı numunenin yüzeyi (Şekil 4d), aşınma kanalının daha dar görünmesine karşın derinliğin yaklaşık 9-10 μm değerlerine yükselmesiyle dikkat çekmektedir. Bu durum, yükün daha küçük bir temas alanına yoğunlaşmasına ve aglomerasyon kaynaklı lokal gerilmelerin artmasına bağlanabilir. Taban geometrisinin sivri hâle gelmesi ve malzeme

yığılmalarının çoğalması, tribofilmin bu katkı seviyesinde kararsızlaştığını, yüzeyde daha düzensiz bir topografya oluştuğunu ve aşınmanın şiddetlendiğini göstermektedir. En yüksek katkı oranı olan 0,24 HSG için elde edilen 3D topografi (Şekil 4e), aşınmanın tüm katkılı numuneler içinde en şiddetli hâline ulaştığını göstermektedir. Aşınma izinin genişlemesi ve yaklaşık 12-13 μm seviyelerine ulaşan derinliği, yüzeyde tribofilmin tamamen çöktüğünü ve aglomerasyon kaynaklı üç cisimli abrazyonun baskın olduğunu ortaya koymaktadır. Aşınma kanalının kenarlarında yoğun malzeme yığılması ve taban geometrisinin son derece sivri hâle gelmesi, plastik deformasyonun arttığını ve yüzey yük dağılımının kararsız hâle geldiğini ifade etmektedir. Bu bozulmuş topografya, en yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma hacmini üreten 0,24 katkı oranıyla tamamen örtüşmektedir.

Aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 5'de verilmiştir. Katkısız yağ ile test edilen yüzeyin Ra değeri 0,040 μm olarak ölçülmüş ve bu değer yağın sınır yağlama koşullarında koruyucu film oluşturmada yetersiz kaldığını doğrulamıştır. HSG ilavesi ile yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir iyileşme görülmüş; özellikle 0,03 g HSG katkısı ile Ra değeri 0,022-0,026 μm aralığına düşerek en düşük pürüzlülük seviyesine ulaşılmıştır. Bu durum, bu katkı seviyesinde yüzey asperitelerinin etkili şekilde doldurulduğunu, kaygan bir tribofilm oluştuğunu ve yüzey-yüzey etkileşiminin önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.



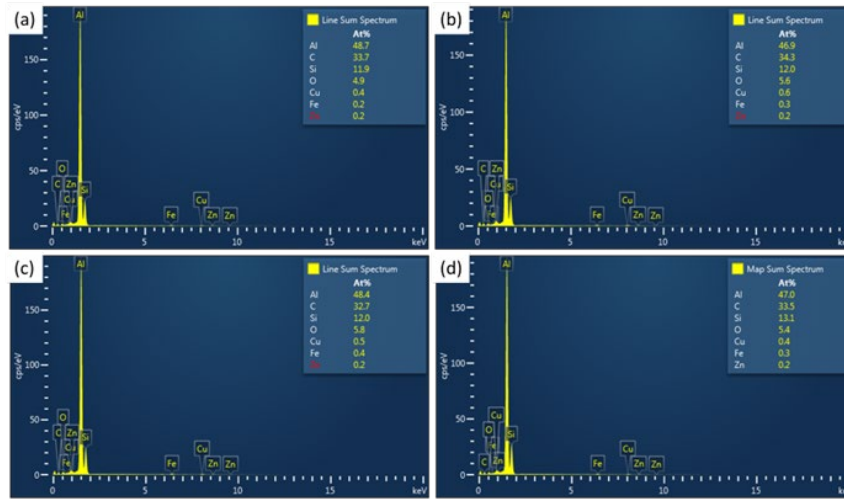
Şekil 5. Aşınma izi yüzey pürüzlülüğü değerleri (Surface roughness values of the wear trace)

Ancak 0,06 g ve üzeri katkı seviyelerinde partikül kümelenmesi nedeniyle Ra değerinin sırasıyla 0,030-0,033 μm , 0,036-0,038 μm ve en yüksek katkı seviyesinde 0,041-0,045 μm aralığında

yükseldiği belirlenmiştir. Bu artış, yüksek katkı seviyelerinde nano-parçacıkların yüzey üzerinde düzensiz bir dağılım göstermesi ve tribolojik temas bölgesinde üç-cisimli aşınma mekanizmalarının baskın hâle gelmesiyle ilişkilidir.

Şekil 6’da, farklı katkı oranları için aşınma izi bölgesinden alınan EDS toplam spektrumları sunulmuştur: (a) 0,03; (b) 0,06; (c) 0,12 ve (d) 0,24 katkılı yağ koşulları. Tüm örneklerde Al ($\approx 46,9$ – $48,7$ at.%) ve Si ($\approx 11,9$ – $13,1$ at.%) sinyallerinin baskın olması, aşınma izinde taban malzemenin (Al-Si esaslı matris) halen güçlü biçimde temsil edildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, aşınma izi boyunca C ($\approx 32,7$ – $34,3$ at.%) sinyalinin yüksek seviyede tespit edilmesi, temas arayüzünde katkı kaynaklı karbon esaslı bir transfer tabakası (tribofilm benzeri birikim) oluşumu ile uyumludur.

Ayrıca O ($\approx 4,9$ – $5,8$ at.%) içeriğinin tüm koşullarda gözlenmesi, sürtünme ısısı ve çevresel etkileşimler sonucu aşınma bölgesinde tribo-oksidasyon süreçlerinin gerçekleşebileceğine işaret etmektedir.



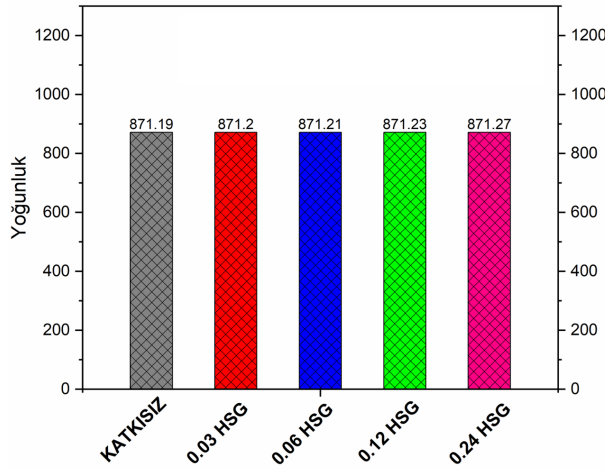
Şekil 6. (a)0,03, (b)0,06, (c)0,12, (d)0,24 katkı oranlarında aşınma izi bölgesinden alınan EDS toplam spektrumları (a-d) ve karşılık gelen elementel kompozisyonlar (at.%). ((a)0.03, (b)0.06, (c)0.12, (d)0.24 contribution ratios of EDS total spectra (a-d) taken from the wear trace region and corresponding elemental compositions (at.%).)

Oksijen oranının özellikle 0,06–0,12 katkı seviyelerinde nispeten artması ($\approx 5,6$ – $5,8$ at.%), bu koşullarda oksidatif katkının daha belirgin olabileceğini düşündürmektedir. Buna karşın Al ve Si’nin yüksek kalması, oluşan karbon ve oksijen içeren tabakanın tüm yüzeyi kalın ve sürekli biçimde kaplayan bir filmde ziyade ince veya yer yer süresiz bir karakter sergileyebileceğini göstermektedir. Spektrumlarda iz miktarda görülen Zn ($\approx 0,2$ at.%) ve Cu/Fe ($\approx 0,2$ – $0,6$ at.%) sinyalleri, yağın katkı paketinde bağlı kalıntılar veya temas sırasında yüzeyler arası sınırlı yerel birikimler şeklinde yorumlanabilir. Genel olarak, farklı katkı

oranlarında C ve O’nun varlığı, aşınma izi üzerinde transfer tabakası artı tribo-oksidasyon bileşenlerinin birlikte rol alabileceğini desteklemekte.

3.5. HSG Katkısının Yağ Yoğunluğu Üzerindeki Etkisi (The Effect of HSG Addition on Oil Density)

HSG nano-katkısının motor yağının fiziksel özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla katkısız ve katkılı yağ örneklerinin yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve şekil 7’de verilmiştir.

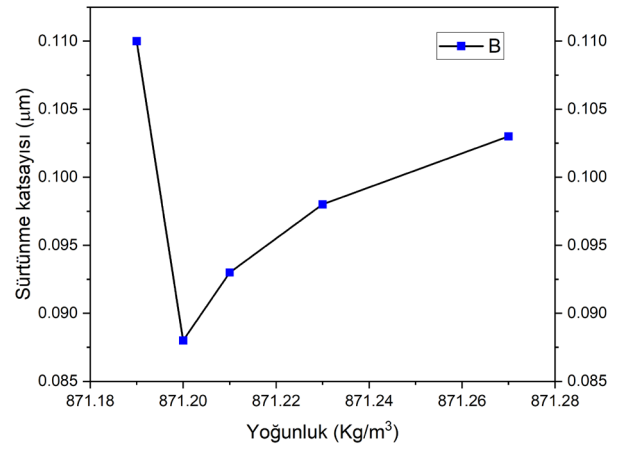


Şekil 7. Katkılı ve katkısız yağ yoğunluk değerleri (Additive and non-additive oil density values)

Katkısız dizel motor yağının yoğunluğu 871,19 Kg/M3 olarak belirlenirken, HSG ilavesiyle birlikte yoğunluk değerlerinde katkı oranına bağlı olarak sınırlı ve düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Düşük katkı seviyesinde (0,03 g HSG) yoğunluk 871,20 seviyesine yükselmiş, 0,06 g ve 0,12 g HSG ilavesiyle bu değer sırasıyla 871,21 ve 871,23 olarak ölçülmüştür. En yüksek katkı oranı olan 0,24 g HSG içeren yağda ise yoğunluk değeri 871,27'ye ulaşmıştır.

Yoğunlukta gözlenen bu artışın oldukça sınırlı olması, HSG nano-parçacıklarının yağın temel fiziksel karakterini önemli ölçüde değiştirmediğini ve reolojik açıdan stabil bir sistem oluşturduğunu göstermektedir. Bu durum, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma davranışında gözlenen değişimlerin yağın akışkanlığındaki makroskopik bir değişimden ziyade, HSG'nin yüzeyde oluşturduğu tribofilm ve lameller kayma mekanizmalarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır. Dolayısıyla yoğunluk sonuçları, HSG katkılı yağların tribolojik performansındaki iyileşmenin fiziksel değil, ağırlıklı olarak yüzey etkileşimi temelli bir mekanizma ile gerçekleştiğini desteklemektedir.

Şekil 8'te verilen sürtünme katsayısı-yoğunluk ilişkisi, HSG katkısının yağın yoğunluğunu yalnızca sınırlı ölçüde artırmasına rağmen tribolojik davranış üzerinde doğrusal olmayan bir etki oluşturduğunu göstermektedir. HSG nano-katkısının tribolojik performans üzerindeki etkisi, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve yağ yoğunluğu sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bu etkinin esas olarak yüzey-temelli mekanizmalarla kontrol edildiği açıkça görülmektedir.



Şekil 8. HSG katkılı motor yağlarında yağ yoğunluğu ile sürtünme katsayısı arasındaki ilişki (The relationship between oil density and coefficient of friction in HSG-enhanced motor oils)

HSG nano-katkısının tribolojik performans üzerindeki etkisi, sürtünme katsayısı, yüzey pürüzlülüğü ve yağ yoğunluğu sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, bu etkinin esas olarak yüzey-temelli mekanizmalarla kontrol edildiği açıkça görülmektedir. Yoğunluk ölçümleri, katkısız yağ için 871,19 olarak belirlenmiş; HSG ilavesiyle birlikte yoğunluğun katkı oranına bağlı olarak çok sınırlı bir artış göstererek en yüksek katkı seviyesinde dahi yalnızca 871,27 değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu sınırlı değişim, HSG katkısının yağın temel reolojik karakterini belirgin şekilde değiştirmediğini ve sürtünme katsayısı ile yüzey pürüzlülüğünde gözlenen iyileşmelerin makroskopik bir yoğunluk artışından kaynaklanmadığını göstermektedir. Buna karşın, yoğunluğun neredeyse sabit kaldığı düşük katkı seviyesinde elde edilen belirgin COF düşüşü ve Ra değerindeki azalma, tribolojik performanstaki iyileşmenin doğrudan HSG'nin yüzeyde oluşturduğu lameller tribofilm ve asperite doldurma (mending) mekanizmalarıyla ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle 0,03 g HSG katkısında sürtünme katsayısının minimum seviyeye inmesi ve Ra değerinin 0,022-0,026 µm aralığına düşmesi, yüzey pürüzlülüğünün azalmasıyla sürtünme davranışı arasında güçlü bir korelasyon olduğunu göstermektedir. Buna karşılık, katkı oranı arttıkça yoğunlukta yalnızca ihmal edilebilir bir artış gözlenmesine rağmen COF ve Ra değerlerinin yeniden yükselmesi, performans kaybının yağın fiziksel özelliklerinden ziyade nano-parçacıkların aglomerasyon eğilimi ve bunun sonucunda ortaya çıkan üç-cisimli aşınma mekanizmalarından kaynaklandığını göstermektedir. Dolayısıyla bu bulgular, HSG katkılı yağlarda tribolojik performansın yoğunluk kontrollü değil, yüzey film stabilitesi ve nano-

parçacık dağılımı kontrollü bir davranış sergilediğini açık biçimde ortaya koymaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, 25 mL dizel motor yağına 0,03; 0,06; 0,12 ve 0,24 g Holey Süper Grafen (HSG) ilave edilerek, nano-katkı miktarının tribolojik davranış üzerindeki etkisi reciprocating kayma koşullarında (20 N normal yük, 500 m kayma mesafesi) incelenmiştir. Sonuçlar, HSG ilavesinin sürtünme ve aşınma performansını katkı oranına belirgin biçimde bağlı olarak değiştirdiğini göstermiştir. Katkısız yağda COF değerleri yaklaşık 0,105–0,115 aralığında seyrederken, 0,03 g HSG katkısında COF yaklaşık 0,085–0,090 seviyesine gerileyerek en düşük ve en kararlı sürtünme davranışı elde edilmiştir. HSG miktarı 0,06 g ve üzerine çıkarıldığında COF ve Ra değerlerinin yeniden yükselme eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Bu eğilim, yüksek katkı seviyelerinde parçacık kümelenmesi taşınım olasılığının artmasıyla temas bölgesinde üçüncü-cisim etkisinin güçlenmesi ve koruyucu film sürekliliğinin zayıflaması ile ilişkilendirilebilir. Aşınma izi bölgesinden alınan EDS toplam spektrumlarında tüm katkı seviyelerinde Al-Si esaslı taban yanı sıra C ve O sinyallerinin belirgin olması, arayüzde karbonca zengin bir transfer tabakası oluşumu ve tribo-oksidasyonun birlikte gerçekleşebildiğine işaret etmektedir. Yağ yoğunluğu ölçümleri, HSG ilavesiyle yalnızca sınırlı bir değişim meydana geldiğini göstermiş; bu durum gözlenen tribolojik iyileşmelerin tek başına makroskopik yoğunluk değişimi ile açıklanamayacağını düşündürmüştür. Sonuç olarak, HSG'nin düşük miktarda (özellikle 0,03 g/25 mL) sürtünme ve aşınma davranışını iyileştirme potansiyeli ortaya konmuş; ancak daha yüksek katkılarda dispersiyon kararlılığının performansı sınırlayan kritik bir faktör hâline geldiği değerlendirilmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Recep Çağrı ORMAN: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve maklenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

He conducted the experiments, analyzed the results and performed the writing process.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C.M. Taylor, Automobile Engine Tribology, South African Mechanical Engineer 48 (1998) 31–32.
- [2] H. Ghaednia, R.L. Jackson, The effect of nanoparticles on the real area of contact, friction, and wear, J Tribol 135 (2013) 041603. <https://doi.org/0.1115/1.4024297>.
- [3] K. Holmberg, A. Erdemir, Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, Friction 5 (2017) 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>.
- [4] V.W. Wong, S.C. Tung, Overview of automotive engine friction and reduction trends—Effects of surface, material, and lubricant-additive technologies, Friction 4 (2016) 1–28. <https://doi.org/10.1007/s40544-016-0107-9>.
- [5] S.C. Tung, M.L. McMillan, Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future, Tribol Int 37 (2004) 517–536.
- [6] M. Priest, C.M. Taylor, Automobile engine tribology—approaching the surface, Wear 241 (2000) 193–203.
- [7] N. Morris, M. Mohammadpour, R. Rahmani, P.M. Johns-Rahnejat, H. Rahnejat, D. Dowson, Effect of cylinder deactivation on tribological performance of piston compression ring and connecting rod bearing, Tribol Int 120 (2018) 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.12.045>.
- [8] J. Umer, N. Morris, R. Rahmani, S. Balakrishnan, H. Rahnejat, Nanoscale frictional characterisation of base and fully formulated lubricants based on activation energy components, Tribol Int 144 (2020) 106115. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106115>.

- [9] H. Spikes, Mechanisms of ZDDP—an update, *Tribol Lett* 73 (2025) 38. <https://doi.org/10.1007/s11249-025-01968-3>.
- [10] D.E. Sander, H. Allmaier, H.-H. Priebsch, F.M. Reich, M. Witt, T. Füllenbach, A. Skiadas, L. Brouwer, H. Schwarze, Impact of high pressure and shear thinning on journal bearing friction, *Tribol Int* 81 (2015) 29–37.
- [11] C. Delprete, A. Razavykia, Piston ring–liner lubrication and tribological performance evaluation: A review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 232 (2018) 193–209. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2014.07.021>.
- [12] W.W.F. Chong, M. Teodorescu, H. Rahnejat, Nanoscale elastoplastic adhesion of wet asperities, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 227 (2013) 996–1010. <https://doi.org/10.1177/1350650112472>.
- [13] A. Usman, C.W. Park, Numerical investigation of tribological performance in mixed lubrication of textured piston ring–liner conjunction with a non-circular cylinder bore, *Tribol Int* 105 (2017) 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.043>.
- [14] S. Karami, M.G. Parashkoochi, D.M. Zamani, B. Najafi, Evaluation of the efficiency and exhaust emissions of a diesel engine through the incorporation of nano-materials into the engine lubricant, *Clean Eng Technol* 18 (2024) 100723. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100723>.
- [15] I. Etsion, State of the art in laser surface texturing, *Advanced Tribology: Proceedings of CIST2008 & ITS-IFTtoMM2008* (2009) 761–762. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03653-8_252.
- [16] H. Spikes, The history and mechanisms of ZDDP, *Tribol Lett* 17 (2004) 469–489. <https://doi.org/10.1023/B:TRIL.0000044495.26882.b5>.
- [17] P. Nguyen-Tri, T.A. Nguyen, P. Carriere, C. Ngo Xuan, Nanocomposite coatings: preparation, characterization, properties, and applications, *International Journal of Corrosion* 2018 (2018) 4749501. <https://doi.org/10.1155/2018/4749501>.
- [18] M. Garcia Tobar, K. Pinta Pesantez, P. Jimenez Romero, R.W. Contreras Urgiles, The Impact of Oil Viscosity and Fuel Quality on Internal Combustion Engine Performance and Emissions: An Experimental Approach, *Lubricants* 13 (2025) 188. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040188>.
- [19] H. Kaleli, S. Demirtaş, V. Uysal, I. Karnis, M.M. Stylianakis, S.H. Anastasiadis, D.-E. Kim, Tribological performance investigation of a commercial engine oil incorporating reduced graphene oxide as additive, *Nanomaterials* 11 (2021) 386. <https://doi.org/10.3390/nano11020386>.
- [20] C. Xie, T.J. Toops, M.J. Lance, J. Qu, M.B. Viola, S.A. Lewis, D.N. Leonard, E.W. Hagaman, Impact of Lubricant Additives on the Physicochemical Properties and Activity of Three-Way Catalysts, *Catalysts* 6 (2016) 54. <https://doi.org/10.3390/catal6040054>.
- [21] D. Kim, T.J. Toops, K. Nguyen, D.W. Brookshear, M.J. Lance, J. Qu, Impact of lubricant oil additives on the performance of Pd-based three-way catalysts, *Emission Control Science and Technology* 6 (2020) 139–150. <https://doi.org/10.1007/s40825-019-00138-x>.
- [22] A. Morina, A. Neville, M. Priest, J.H. Green, ZDDP and MoDTC interactions in boundary lubrication—The effect of temperature and ZDDP/MoDTC ratio, *Tribol Int* 39 (2006) 1545–1557. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2006.03.001>.
- [23] Y. Hong, Y. Mo, J. Lv, J. Wang, Tribological properties of polymer friction improvers combined with MoDTC/ZDDP at different temperatures, *Lubricants* 11 (2023) 196. <https://doi.org/10.3390/lubricants11050196>.
- [24] K. Nasser, M.J.G. Guimarey, N. das M. Pereira, Recent Studies on Nanomaterials as Additives to Lubricants Under Electrified Conditions for Tribology, *Lubricants* 13 (2024) 2. <https://doi.org/10.3390/lubricants13010002>.
- [25] M. Garcia Tobar, R.W. Contreras Urgiles, B. Jimenez Cordero, J. Guillen Matute, Nanotechnology in lubricants: A systematic review of the use of nanoparticles to reduce the friction coefficient, *Lubricants* 12 (2024) 166. <https://doi.org/10.3390/lubricants12050166>.
- [26] C. Kumara, B. Armstrong, I. Lyo, H.W. Lee, J. Qu, Organic-modified ZnS nanoparticles as a high-performance lubricant additive, *RSC Adv* 13 (2023) 7009–7019. <https://doi.org/10.1039/D2RA07295E>.
- [27] J.M. Liñeira del Río, C.M.C.G. Fernandes, J.H.O. Seabra, Tribological Improvement of Low-Viscosity Nanolubricants: MoO₃, MoS₂, WS₂ and WC Nanoparticles as Additives, *Lubricants* 12 (2024) 87. <https://doi.org/10.3390/lubricants12030087>.
- [28] M. Waqas, R. Zahid, M.U. Bhutta, Z.A. Khan, A. Saeed, A review of friction performance of lubricants with nano additives, *Materials* 14

- (2021) 6310.
<https://doi.org/10.3390/ma14216310>.
- [29] H. Liu, Y. Xu, E. Hu, K. Hu, Synthesis and tribological properties of WS₂/MoS₂ micro-nano composite lubricant, *Tribol Int* 204 (2025) 110506.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2025.110506>.
- [30] Z. Lu, Q. Lin, Z. Cao, W. Li, J. Gong, Y. Wang, K. Hu, X. Hu, MoS₂ nanomaterials as lubricant additives: A review, *Lubricants* 11 (2023) 527.
<https://doi.org/10.3390/lubricants11120527>.
- [31] Q. Gao, S. Liu, K. Hou, Z. Li, J. Wang, Graphene-based nanomaterials as lubricant additives: A review, *Lubricants* 10 (2022) 273.
<https://doi.org/10.3390/lubricants10100273>.
- [32] J. Kogovšek, M. Kalin, Comparison of graphene as an oil additive with conventional automotive additives for the lubrication of steel and DLC-coated surfaces, *Tribol Int* 180 (2023) 108220.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108220>.
- [33] Ö. Can, Ö. Çetin, Potential use of graphene oxide as an engine oil additive for energy savings in a diesel engine, *Engineering Science and Technology, an International Journal* 48 (2023) 101567.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101567>.
- [34] T. Nagarajan, N. Sridewi, W.P. Wong, R. Walvekar, M. Khalid, Enhanced tribological properties of diesel-based engine oil through synergistic MoS₂-graphene nanohybrid additive, *Sci Rep* 13 (2023) 17424.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-43260-1>.
- [35] X. Kuang, X. Yang, H. Bian, R. Kuang, N. Hu, S. Li, Performance evaluation of nano-graphene lubricating oil with high dispersion and low viscosity used in diesel engines, *PLoS One* 19 (2024) e0307394.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0307394>.
- [36] E. Tomanik, W. Christinelli, P.S. Garcia, S. Rajala, J. Crepaldi, D. Franzosi, R.M. Souza, F.F. Rovai, Effect of Graphene Nanoplatelets as Lubricant Additive on Fuel Consumption During Vehicle Emission Tests, *Eng* 6 (2025) 18. <https://doi.org/10.3390/eng6010018>.
- [37] N.A. Ismail, N.W.M. Zulkifli, Z.Z. Chowdhury, M.R. Johan, Functionalization of graphene-based materials: Effective approach for enhancement of tribological performance as lubricant additives, *Diam Relat Mater* 115 (2021) 108357.
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108357>.
- [38] P. Wu, X. Chen, C. Zhang, J. Zhang, J. Luo, J. Zhang, Modified graphene as novel lubricating additive with high dispersion stability in oil, *Friction* 9 (2021) 143–154.
<https://doi.org/10.1007/s40544-019-0359-2>.
- [39] Y. Liu, S. Yu, Q. Shi, X. Ge, W. Wang, Graphene-family lubricant additives: recent developments and future perspectives, *Lubricants* 10 (2022) 215.
<https://doi.org/10.3390/lubricants10090215>.
- [40] İ. Tiyek, M.S. Ersoy, M.H. Alma, U. Dönmez, B. Yıldırım, T. Salan, Ş. Karataş, S. Uruş, İ. Karteri, K. Yıldız, Modifiye hummers yöntemiyle grafen oksit (GO) sentezi ve karakterizasyonu, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology* 4 (2016) 41–48.
- [41] N.S. Rajput, S. Al Zadjali, M. Gutierrez, A.M.K. Esawi, M. Al Teneiji, Synthesis of holey graphene for advanced nanotechnological applications, *RSC Adv* 11 (2021) 27381–27405.
<https://doi.org/10.1039/D1RA05157A>.
- [42] Z. Jiang, Y. Sun, B. Liu, L. Yu, Y. Tong, M. Yan, Z. Yang, Y. Hao, L. Shangguan, S. Zhang, Research progresses of nanomaterials as lubricant additives, *Friction* 12 (2024) 1347–1391. <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0808-9>.
- [43] W. Gu, K. Chu, Z. Lu, G. Zhang, S. Qi, Synergistic effects of 3D porous graphene and T161 as hybrid lubricant additives on 316 ASS surface, *Tribol Int* 161 (2021) 107072.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107072>.
- [44] H. Lin, Q. Jian, X. Bai, D. Li, Z. Huang, W. Huang, S. Feng, Z. Cheng, Recent advances in thermal conductivity and thermal applications of graphene and its derivatives nanofluids, *Appl Therm Eng* 218 (2023) 119176.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119176>.
- [45] J. Liu, B. Chen, P. Guo, Z. Yu, W. Sheng, K. Zhang, X. Liu, Fabrication of 3D porous graphene materials for oil-based lubrication: Tribological and wear performance, *Carbon N Y* 221 (2024) 118892.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2024.118892>.
- [46] P. Ramos Ferrer, A. Mace, S.N. Thomas, J.-W. Jeon, Nanostructured porous graphene and its composites for energy storage applications, *Nano Converg* 4 (2017) 29.
<https://doi.org/10.1186/s40580-017-0123-0>.
- [47] O. Okhay, A. Tkach, A comprehensive review of the use of porous graphene frameworks for various types of rechargeable lithium batteries, *J Energy Storage* 80 (2024) 110336.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110336>.
- [48] V.D. Nithya, A review on holey graphene electrode for supercapacitor, *J Energy Storage*

- 44 (2021) 103380.
<https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103380>.
- [49] E. Tomanik, W. Christinelli, R.M. Souza, V.L. Oliveira, F. Ferreira, B. Zhmud, Review of graphene-based materials for tribological engineering applications, *Eng 4* (2023) 2764–2811. <https://doi.org/10.3390/eng4040157>.