J. Energy Conversion
Volume: 11, Issue: 1, 2024: 79-92

نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)

دوره ۱۱، شماره ۱، بهار۱۴۰۳، ص: ۷۹-۹۲

مروری بر مطالعات مربوط به برهم‌کنش بین نانومواد، سطح لغزنده، روان‌کارها و مواد افزودنی مورد استفاده در مخلوط‌های نانو روان‌کار

عباس تقی‌پور[۱و*]

*۱ - استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران. taghipoor@iaud.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۸، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۹، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

چکیده

به دلیل تعداد زیاد مقالات و پیچیدگی بازیابی، پوشش کل مقالات منتشر شده در این بررسی غیرممکن است، اما اکثر نتایج تحقیقات و آمارها می‌توانند به عنوان مرجع نانومواد در نظر گرفته شوند. بر اساس نتایج تجربی حاصل از پژوهش‌ها، ویژگی‌های تریبولوژیکی عوامل تأثیرگذار اکثر نانومواد به صورت خلاصه در ادامه آمده است. با توجه به پیچیدگی فرایند اصطکاک و عوامل مختلف تأثیرگذار، نتیجه گیری‌ها به صورت مطلق نیستند و با تغییر شرایط انجام کار و نانومواد اولیه می‌توانند متفاوت باشند. در این مطالعه مروری بر پژوهش‌های انجام شده در مورد رابطه میان مورفولوژی و عملکرد تریبولوژیکی، تجزیه و تحلیل انواع رژیم‌های روغن‌کاری، بر هم‌کنش بین نانومواد و سطح لغزنده، تعامل میان نانومواد و روغن روان‌کننده، برهم‌کنش بین نانومواد و سایر مواد افزودنی و برهم‌کنش بین مواد در نانوکامپوزیت‌ها انجام شده است. در نهایت نیز پیشنهادات مهم برای تحقیقات آینده در زمینه توسعه نانومواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده بیان شده است.

***عهده‌دار مکاتبات** : taghipoor@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: نانومواد، برهم‌کنش، رژیم روان‌کاری، مورفولوژی، تریبولوژیکی.

نحوه استناد به این مقاله عباس تقی‌پور. مروری بر مطالعات مربوط به برهم‌کنش بین نانومواد، سطح لغزنده، روان‌کارها و مواد افزودنی مورد استفاده در مخلوط‌های نانو روان‌کار. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۳; ۱۱ (۱) : ۷۹-۹۲.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱- مقدمه

عملکرد تریبولوژیکی تحت تأثیر عوامل بسیاری قرار دارد. مورفولوژی نانومواد نقش مهمی در تحمل فشاری که نانوذرات در طول بارگذاری تحت آن قرار می گیرند، ایفا می‌کند. برای نانوذرات 0D[1]، اندازه ساختار کروی برای عملکرد تریبولوژیکی نانوذرات حیاتی است. نانوذرات کوچکتر نسبت به نانوذرات بزرگتر می‌توانند عملکرد تریبولوژیکی را به طور قابل توجهی بهبود بخشند، همچنین نانوذرات مخلوط با اندازه‌های مختلف، عملکرد تریبولوژیکی بهتری نسبت به نانوذرات با اندازه یکنواخت نشان می‌دهند. علاوه بر این، بسیاری از مقالات تایید کرده‌اند که می‌توان به طور قابل توجهی، ظرفیت باربری را توسط نانوذرات 0D و 1D[2] دارای ساختار کره‌ای و عمودی بهبود بخشید. نانومواد دو بعدی با برهم‌کنش‌های ضعیف بین لایه‌ای می‌توانند نیروی برش سطحی کمی را ایجاد کنند که برای کاهش اصطکاک مؤثراست. اما برای لایه‌هایی که هم مرکز نیستند، وجود نقص در ساختار باعث افزایش چشم‌گیر نیروی برشی می‌شود. در مقایسه، ساختارهای ورقه مانند عموماً از سایر مورفولوژی‌ها بهتر عمل می‌کنند [۱]. نانوصفحات این توانایی را دارند که به راحتی تریبو فیلم خطی و عملکرد سطحی را ایجاد کنند [۲]. بهترین مثال این است که نانوذرات MoS_2 با ساختار پیاز مانند و کریستالی ضعیف، خواص روان‌کنندگی بهتری نسبت به ذرات کروی کاملاً متبلور دارند و می‌توان گفت علت آن، توانایی لایه برداری قویتر آنها برای تولید سریع ورقه‌ها و مونتاژ لایه به لایه جهت تشکیل یک تریبوفیلم است [۳]. مورفولوژی نیز نقش مهمی در پایداری پراکندگی نانومواد در روغن دارد. به طور معمول، نانومواد با اندازه کوچکتر نسبت به مواد بزرگتر راحت‌تر در روغن پراکنده می شوند، اما در صورت عامل دارشدن روی سطح نانومواد تغییر خوا هند کرد. به طور معمول، نانومواد متخلخل یا گل-مانند با سطح ویژه نسبتاً بالا، پراکندگی خوبی در روغن روان‌کننده دارند که به طور گسترده در پژهش‌ها گزارش شده است. شایان ذکر است که تأثیر مورفولوژی دقیق نیست و موارد فوق صرفاً خلاصه‌ای از اکثر نتایج تجربی موجود است. به عنوان مثال، اندازه نانوذرات MoS_2 پیاز-مانند با ساختار ضعیف کریستالی بر عملکرد تریبولوژیکی آنها تأثیر نمی‌گذارد، زیرا می‌توان آنها را به طور یکنواخت در صفحات، لایه برداری کرد تا تریبو-فیلم تشکیل شود [۴]. نانوصفحات LDH[3] بزرگتر با درجه بلورینگی بالاتر، بهترین و پایدارترین عملکرد تریبولوژیکی را نسبت به نمونه‌های کوچکتر نشان می‌دهند، زیرا یک تریبوفیلم با خاصیت مکانیکی برتر در حین لغزش حاصل از بلورینگی بالا تشکیل می‌شود [۵]. سنگ-دانه‌ها مسئول تشکیل برخی تریبوفیلم‌های تماس نقطه‌ای هستند، اما تأثیری بر پراکندگی خوب نانوذرات در روغن ندارند [۶]. به طور خلاصه، اگرچه مورفولوژی نقش مهمی ایفا می‌کند، اما خواص تریبولوژیکی تحت تأثیر عوامل زیادی قرار می‌گیرند که با توجه به اینکه عوامل تأثیرگذار هم‌زمان ضروری است، نباید توسط ساختار جداگانه تعیین شود.

۲- تجزیه و تحلیل آماری داده های تریبولوژیکی

تجزیه و تحلیل آماری کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش چهار دسته نانومواد با ویژگی‌های نانوساختار متفاوت (1D، 2D[4]، 0D و نانوکامپوزیت‌ها) در شکل ۱ نشان داده شده است، با توجه به نتایج نکات زیر مدنظر است :

[1]-zero-dimensional
[2] -one-dimensional
[3]-layered double hydroxide
[4] - two-dimensional

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

۱) افزایش خاصیت ضد سایش روغن پایه برای افزودنی‌های نانومواد نسبتاً آسان است، اما کاهش قابل توجه COF[5] (ضریب اصطکاک) ممکن است به تلاش بیشتری نیاز داشته باشد. از طرفی، این نتایج ممکن است به این دلیل باشد که نانومواد به عنوان مواد افزودنی روان‌کننده به عنوان "پوشش محافظ" یا "بلبرینگ" بین سطوح اصطکاکی هستند و سطوح لغزنده را از هم جدا می‌کند تا از تماس مستقیم جلوگیری نماید و می‌تواند عملکرد ضد سایش را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. از سوی دیگر، مشکل کاهش COF ممکن است مربوط به خواص فیزیکی و شیمیایی روغن روان‌کننده و خواص شیمیایی سطح باشد. مقدار COF ارتباط نزدیکی با ضریب فشار- ویسکوزیته و فشار تماسی دارد [۱] که به راحتی توسط منحنی استریبک قابل توضیح است. مقدار COF پایین را می‌توان با روان‌کننده‌های دارای ضریب فشار-ویسکوزیته پایین به دست آورد و کاهش ویسکوزیته ظاهری می‌تواند به مرتب سازی ملکول‌ها منجر شود. به طور کلی، ضریب فشار- ویسکوزیته روغن روان‌کار نسبتاً بزرگ است، بنابراین برای روغن روان‌کار مقدار COF پایین تحت فشار تماس نسبتاً بالا چالش برانگیز است. گروه لو [۷] که در زمینه روان‌کاری مشغول تحقیق هستند، معتقدند که COF بسیار کم به هیچ عنوان با استفاده از جفت های مرسوم فولاد/ فولاد تحت شرایط یکسان به دست نمی‌آید، که علت آن خواص شیمیایی سطح است. آمار نشان می‌دهد که نسبت جفت فولاد/ فولاد مورد استفاده در مطالعات نانومواد به عنوان افزودنی روغن روان‌کننده ٪۸۵ است.

۲) نانو موادی که توانایی بهبود هم‌زمان کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش روغن روان‌کننده را دارند، عمدتاً نانومواد مبتنی بر کربن مانند G[6] و CNT[7] هستند. محل روان‌کاری روغن عمدتاً روان‌کاری مرزی است، جایی‌که مولکول‌های روغن به شدت روی سطوح تنها با دو یا سه لایه مولکولی جذب می‌شوند تا فیلم روان‌کاری را تشکیل دهند. با بهره‌مندی از توسعه فناوری لایه‌برداری، G بسیار نازک یا چند لایه و CNTs تک لایه را می‌توان با غلبه بر پیوند مستحکم بین اتمی لایه به دست آورد. نانو مواد بر پایه بسیار نازک می توانند بدون آسیب، وارد لایه نازک روغن شوند تا رابط لغزشی تنش برشی کمتری ایجاد کند و نقش مهمی در برهم‌کنش‌های بین مولکولی روغن ایفا کند که برای کاهش اصطکاک مفید است. هم‌چنین G می‌تواند به عنوان یک نانوافزودنی برای بهبود سیستم فوق روان‌کاری در نظر گرفته شود.

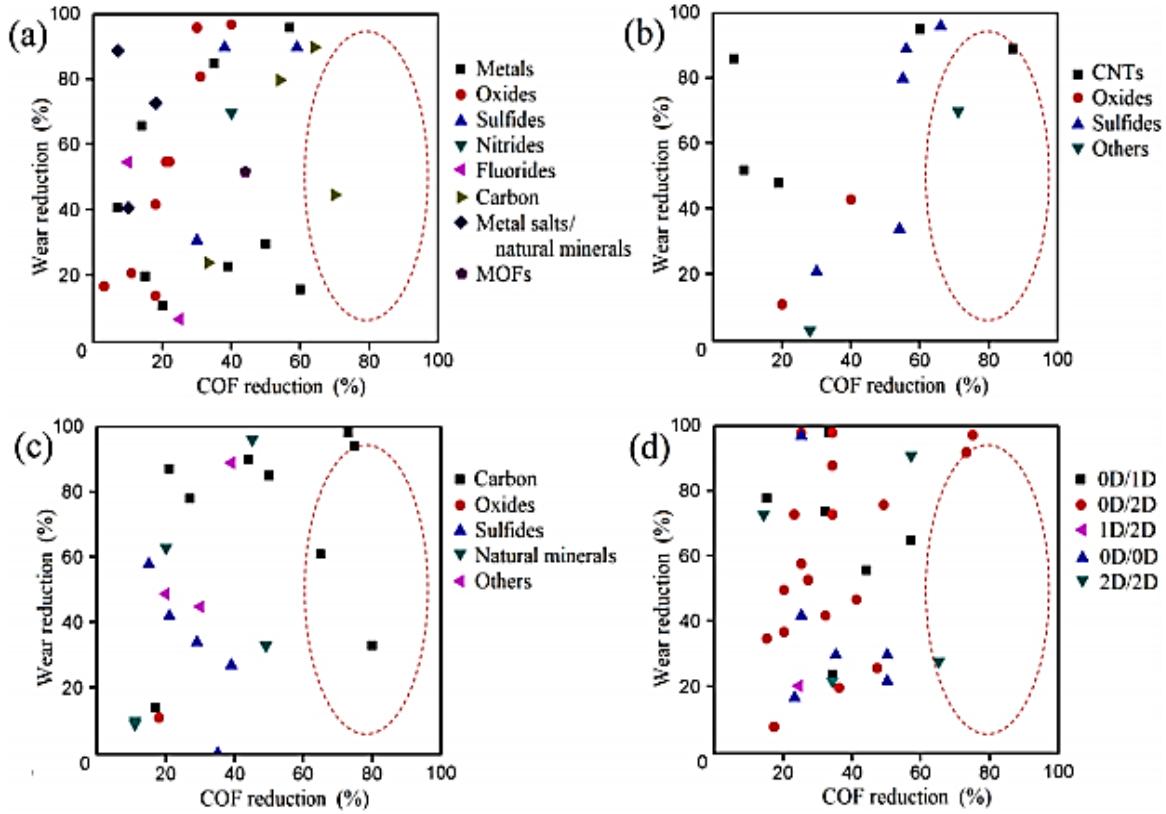
۳) در مقایسه با نانومواد منفرد، در شرایط آزمایشی مشابه اکثر نانوکامپوزیت‌ها، برتری آشکاری در عملکرد تریبولوژیکی دارند. با این حال، با توجه به داده‌های مقالات مختلف گزارش شده است که تحت شرایط آماده سازی و اصطکاک متفاوت هستند، به طور کلی زمانی‌که نانوکامپوزیت‌ها به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده استفاده می‌شوند، عملکرد تریبولوژیکی بهتری نشان داده نمی‌شود. نتایج نشان داده‌اند که شرایط کاری مختلف تأثیرات زیادی بر عملکرد تریبولوژیکی نانومواد دارد [۸].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

5 - Coefficient of friction

6 - G is a kind of flexible 2D nanomaterial

7- carbon nanotube

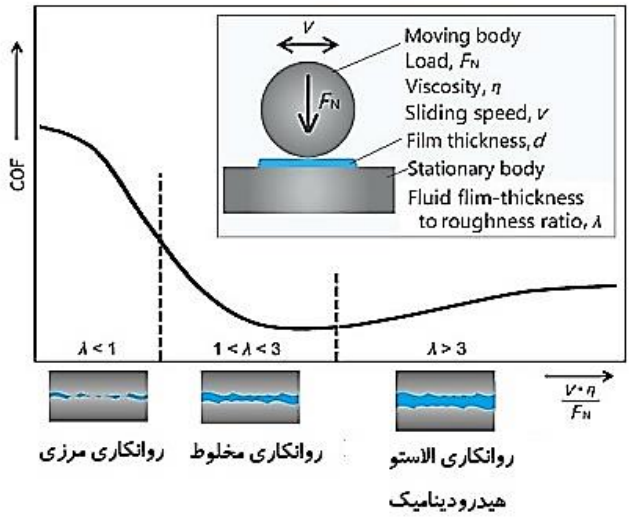


شکل ۱ : تجزیه و تحلیل آماری کاهش اصطکاک و خواص ضد سایش چهار نوع نانومواد با ویژگی‌های نانوساختار متفاوت: (a) نانومواد 0D. (b) نانومواد 1D. (c) نانومواد 2D. و (d) نانوکامپوزیت‌ها.

۳- تجزیه و تحلیل رژیم روغن‌کاری

این امر به خوبی شناخته شده است که منحنی استریبک به صورت گسترده برای تخمین رژیم روغن‌کاری مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۲)، از جمله از آن برای روان‌کاری مرزی، روان‌کاری مخلوط و روان‌کاری الاستو هیدرودینامیکی (کشسانی سیال پویا) استفاده می‌شود، همچنین می‌توان از آن برای شناسایی نقش نانومواد در طی فرایند اصطکاک استفاده کرد [۹]. بیشتر افزودنی‌های نانومواد می‌توانند عملکرد روان‌کاری را در تمام رژیم‌های روان‌کاری به طور قابل توجهی بهبود بخشند [۱۱،۱۰] و به طور کلی، تأثیرات صورت گرفته بر روغن‌کاری مرزی و روغن‌کاری مخلوط نسبتاً بیشتر می‌باشد[۱۳، ۱۲].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۲ : نمودار رژیم‌های روان‌کاری در منحنی استریبک.

در روان‌کاری مرزی، اثر غلتشی کمی وجود دارد و عملکردهای تریبولوژیکی توسط یک فیلم محافظ تعیین می‌شوند که تشکیل آن توسط افزودنی های نانومواد تقویت می‌شود [۱۵، ۱۴]. بنابراین، خواص مکانیکی نانومواد نقش مهمی در خواص مکانیکی فیلم محافظ دارد. به‌ویژه، تحت فرکانس کم یا بار زیاد، استحکام فیلم بسیار ضروری است. اما در شرایط فرکانس بالا، شکل‌پذیری اهمیت بیشتری پیدا می‌کند [۱۵]. همچنین توضیح می‌دهد که چرا نانوذرات کروی می‌توانند ظرفیت حمل بار روغن را به طور قابل توجهی بهبود بخشند. علاوه بر این، عملکرد تریبولوژیکی نانومواد تحت تأثیر ویسکوزیته روغن پایه در روان‌کاری مرزی قرار دارد. عملکرد مؤثرتر با افزودن نانوذرات در روغن پایه با ویسکوزیته کمتر مشاهده شد. از آنجایی‌که COF با افزایش ویسکوزیته روغن کاهش می‌یابد، روان‌کننده با ویسکوزیته بالاتر به سختی از ناحیه تماس فشرده می‌شود. زمان فشرده سازی طولانی‌تر، زمان کوتاه‌تری را برای تماس ناصافی‌ها فراهم می‌کند و منجر به COF کمتر می‌شود. با افزودن برخی مواد نانو افزودنی در روان‌کاری مرزی، نه تنها اثرات فیزیکی بلکه واکنش‌های تریبو شیمیایی نیز وجود دارد. در طول لغزش، واکنش‌های تریبوشیمیایی بین نانومواد و اتم‌های آهن و یا گونه‌های اکسید آهن رخ می‌دهد و محصولات آنها می‌توانند به سطوح فولادی بچسبند و یک تریبو فیلم با مقاومت برشی کم تشکیل دهند [۱۱، ۱۶].

در روان‌کاری الاستو هیدرودینامیکی، عامل غالب در تعیین عملکرد تریبولوژیکی، ویژگی جریان نانوسیال است که می‌تواند تحت تأثیر افزودنی‌های نانومواد نیز قرار گیرد. یک نظریه، بر اساس برخی نتایج تجربی پیشنهاد شده است که نانوذرات یک جریان پلاگ را در ناحیه باریک بین سطوح لغزنده القا کردند، که منجر به لغزش تنها چند لایه از مولکول‌های روغن روی یکدیگر شد و سپس اصطکاک کاهش یافت [۱۸، ۱۷]. پدیده تجمع در میان نانوذرات نیز در ناحیه تماس هرتز یافت شد [۱۵]. با این حال، نتایج برخی از تحقیقات را نمی‌توان با این نظریه توضیح داد، به عنوان مثال، افزودنی‌های ZrP[8] با غلظت بالاتر منجر به COF

[8] - Zirconium phosphate

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

پایین‌تر می‌شود [۱۹]. در برخی شرایط کاری، بخش‌های کاهش یافته توسط افزودنی‌های GO[9] تقریباً در همه رژیم‌های روان-کاری یکسان است [۲۰]. مشاهده می‌شود که فرآیند اصطکاک بسیار پیچیده است و تأثیر نانومواد بر خواص نانوسیال‌ها، نیاز به مطالعه بیشتر دارد.

۴- مکانیسم

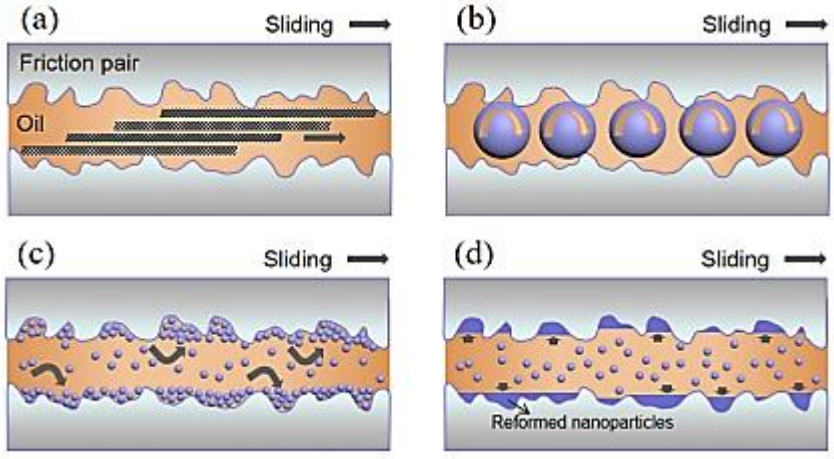
۴-۱ بر هم‌کنش بین نانومواد و سطح لغزنده

مکانیسم‌های روان‌کاری پذیرفته شده بین نانومواد و سطح لغزنده نیز در بسیاری از بررسی‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند که می‌توان به طور خلاصه به شرح زیر عنوان کرد:

(۱) نانومواد باعث تشکیل تریبوفیلم، لایه‌های محافظ یا لایه‌های جذب می‌شوند که می‌توانند سطوح اصطکاک را جدا و ویژگی-های سطح را تغییر دهند.

(۲) عملکرد فیزیکی نانومواد اضافه شده در روغن روان‌کار ممکن است به دلیل اثر لغزشی و غلتشی در سطوح لغزش بسته به تنش نرمال و برشی، منجر به ویژگی‌های تریبولوژیکی امیدوارکننده شود. علاوه بر این، نانومواد در مقیاس کوچک می‌توانند شکاف‌های روی سطوح را پر کنند، سطوح را صیقل دهند تا زبری سطح کاهش یابد که به آن اثر پولیش یا صاف کردن می‌گویند.

(۳) عملکرد شیمیایی نانومواد به دلایل خاصی اصلاح شدند و در طول فرآیند لغزش روی مسیرهای سایش رسوب کردند. این تابع اثر تعمیر نامیده می‌شود. مکانیسم‌های اصلی اصطکاک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ : چهار مکانیسم اصلی اصطکاک: (a) لغزش .(b) نورد؛ (c) پرداخت یا صاف کردن و (d) ترمیم یا خود ترمیم.

علاوه بر موارد ذکرشده در بالا، تایید شده است که نانومواد به طور مستحکم با برهم‌کنش سطحی بین نانومواد و بسترها مرتبط هستند. به عنوان مثال، هنگامی‌که روان‌کاری با یک لایه در نظر گرفته می‌شود، بر هم‌کنش‌های بین لایه‌ای ضعیف، عامل اصلی در تعیین عملکرد روان‌کاری آن نیست و بر هم‌کنش بین نانومواد لایه‌ای و سطح زیرلایه مهم است، پس از آن خواص زیرلایه

[9]- Graphene Oxide

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

تأثیر فزاینده‌ای بر خواص مکانیکی و اتلاف کننده لایه نانومواد دارد [۲۱]. گزارش شده است که با استفاده از لایه برداری G بر روی سطوحی مانند میکا، تماس خوبی با بستر و چسبندگی قوی حاصل شد. هنگامی‌که بر روی SiO_2 با سطوح ناهموار، اتمی اعمال می‌شود، نیروی چسبندگی بین G و زیرلایه کاهش می‌یابد و اثر "پاکرینگ[۱۰]" (چروکیدگی) ایجاد می‌شود. از آنجایی‌که ناحیه تماس پس از خم شدن کاهش یافت، G پیکربندی ناهموار را حفظ کرده و در عملکرد تریبولوژیکی بهبودی حاصل نشد [۲۲]. با این حال، GO با گروه‌های عاملی می‌تواند به صورت کووالانسی به سطح بستر پیوند داده شود تا بر ریزش غلبه کند. علاوه بر این، با انعطاف پذیری بالای خارج از صفحه، G نانوساختاری سه بعدی است که تحت تأثیر هندسه بستر تماس قرار می‌گیرد و ویژگی‌های تریبولوژیکی G به ویژه به زبری سطح لغزش و چسبندگی سطحی توسط نیروهای واندروالس بستگی دارد. از این‌رو، قبل، بعد، یا در فرآیند لغزش، چسبندگی به سطح بستر و مورفولوژی نانومواد ارتباط نزدیکی با خواص تریبولوژیکی آنها دارد [۲۱]. مشابه نانوذرات فوق، وجود نانولوله‌های کربنی نانومواد 1D نیز می‌تواند تجمع را در ناحیه تماس ایجاد کند، اما در طول فرایند لغزش، زبری سطح بستر منجر به کاهش تعداد تجمعات عبوری از ناحیه تماس شد و افزایش ضخامت لایه، کاهش اصطکاک و سایش رانش مشاهده شد که از انتشار گذرای تجمع CNT از طریق ناحیه تماس تحت تأثیر بر هم‌کنش سطحی ناشی می‌شود[۲۳].

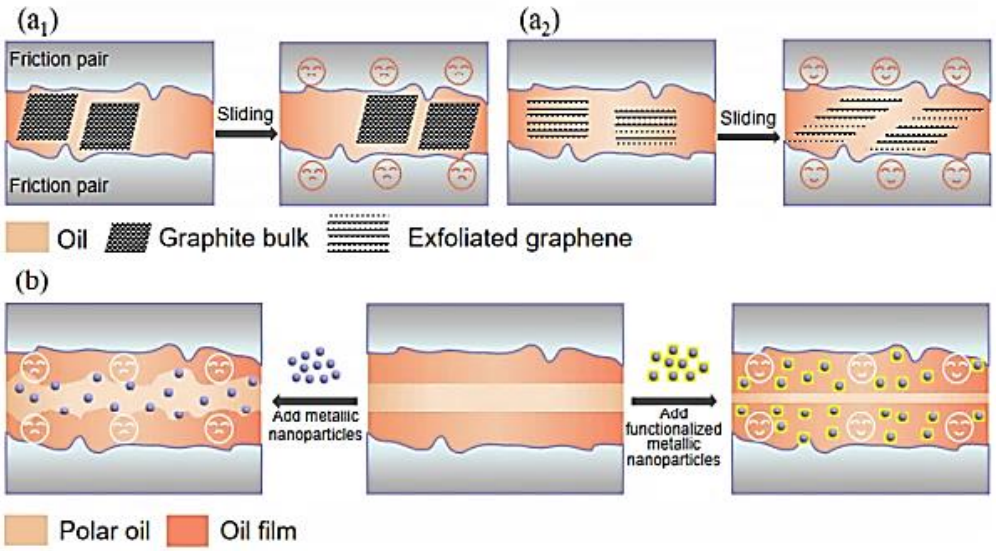
۲-۴ تعامل میان نانومواد و روغن روان‌کننده

سازماندهی و توزیع نانومواد در روغن به ویژگی نیروهای بر هم‌کنش آنها مانند نیروی واندروالس، نیروی الکترواستاتیک، حرکت براونی و برهم‌کنش‌های فضایی بستگی دارد. عملکرد رئولوژیکی و خواص جریان سیالات کلوئیدی توسط این نیروها، همراه با برهم‌کنش‌های دینامیکی در روغن با توجه به نرخ برش کنترل می‌شود. به عنوان مثال، در مقایسه با توده گرافیت [۲۴]، rGO[۱۱] از لایه‌های سست با تعداد زیادی ترک باریک تشکیل شده است. این نانوساختار خاص نیروی واندروالس بین لایه های rGOرا کاهش می‌دهد و در نتیجه مقاومت تحت نیروی برشی، کاهش می‌یابد. لایه‌های کربنی با حفره‌ها و نقص‌های اندک می‌توانند رفتارهای تریبولوژیکی را بهبود دهند [۲۵]. نمودار مکانیسم‌ها درشکل a_1 ۴ و a_2 ۴ نشان داده شده است.

10- puckering

11- reduced graphene oxide

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]



شکل ۴ : نمودار مکانیسم‌ها

خاصیت قطبی نقش مهمی در تعامل بین نانومواد و روغن روان‌کننده دارد [۲۶]. ترکیبات قطبی می‌توانند بر روی سطوح فلز جذب شوند و این جاذبه منجر به تشکیل یک لایه نازک روغن می‌شود. با این حال، نانوذرات فلزی نیز می‌توانند توسط مولکول‌های قطبی جذب شوند و از عملکرد بلبرینگ آن‌ها به‌عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده یا ایجاد اختلال در تشکیل فیلم روغن جلوگیری کنند. بر این اساس، برای ماهیت قطبی روغن‌های روان‌کننده مختلف، عامل‌دار کردن سطح نانومواد می‌تواند به طور مؤثر تعامل بین نانومواد و روغن روان‌کننده را تغییر دهد، مانند افزایش پایداری پراکندگی و توزیع همگن. با این حال، تمامی اصلاحات مرتبط با عملکرد سطحی قطعی نیستند [۲۹، ۲۸، ۲۷]. نمودار مکانیسم‌ها در شکل(b) ۴ نشان داده شده است.

دیدگاه مرسوم این است که عملکرد تریبولوژیکی نانومواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده، متناسب با پایداری پراکندگی آنها در روغن است. با این حال، زمانی‌که نانوذرات به عنوان مواد افزودنی در تماس نقطه‌ای به روغن اضافه می‌شوند، تشکیل تریبوفیلم از مواد پراکنده نشأت نمی‌گیرد و از تجمع نانوذرات حاصل می‌گردد [۶]. این نکته جدید ممکن است باعث پیشرفت طراحی جدید افزودنی‌های روغن روان‌کننده درشرایط کاری مختلف شود. رابطه میان نانومواد و فیلم روغن نیز یکی از نقاط مهم مورد بحث در زمینه‌های تریبولوژی است. یکی از فاکتورهای اصلی که باید در نظر گرفته شود، اندازه نانومواد در مقایسه با ضخامت لایه روغن است. هنگامی‌که اندازه نانومواد بیشتر از ضخامت لایه روغن است، رفتارهای نانو مواد تحت تأثیر شرایط سینماتیکی تماس قرار می‌گیرند. در سرعت لغزش کم، نانومواد به راحتی وارد سطح تماس می‌شوند، جایی‌که یک لایه روغن مرزی چسبنده تشکیل می‌شود. با این حال، این فیلم روغن با افزایش مداوم سرعت از بین می‌رود؛ زیرا در آن حالت روان‌کاری از روغن‌کاری مخلوط به روان‌کاری الاستو هیدرودینامیکی تغییر می‌کند. در سرعت لغزش بالاتر، بیشتر مواد موجود در نانوسیال‌ها برای تماس مستقیم با سطح رد می‌شوند و باعث کاهش ضخامت لایه روغن می‌گردند [۲۳]. بنابراین، مکانیسم‌های به دام انداختن سطح بستر باید بیشتر مورد توجه واقع شوند.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، ویسکوزیته روغن پایه نیز بر عملکرد تریبولوژیکی روان‌کننده، به ویژه در روان‌کاری مرزی، تأثیرگذار است. رسانایی گرمایی و ویسکوزیته روغن ویژگی‌های مهمی هستند که می‌توانند مستقیماً تحت تأثیر دما و غلظت نانو مواد قرار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

گیرند. به طور کلی، بیشتر نمونه‌های روغن مخلوط شده با نانومواد دارای رفتار نیوتنی هستند. ویسکوزیته نانوسیالات با افزایش غلظت نانومواد و کاهش دما، افزایش می‌یابد [۳۰]. همچنین به غلظت‌ها حساس‌تر می‌شود [۳۱]. در دماها و شارهای حرارتی بالا، انتقال حرارت در روان‌کار نقش مهمی را ایفا می‌کند. وجود نانومواد با رسانایی حرارتی بالا می‌تواند انتقال حرارت از سطح تماس را افزایش داده و منجر به ویسکوزیته و ظرفیت حمل بار بیشتر حتی در غلظت پایین شود [۳۲،۳۰].

۴-۳ برهم‌کنش بین نانومواد و سایر مواد افزودنی

با توسعه افزودنی‌های روغن، ادغام نانومواد با افزودنی‌های روغن روان‌کننده معمولی اجتناب ناپذیر است [۳۳]. از تجزیه و تحلیل داده‌های تریبولوژیکی مطالعات بر روی روغن روان‌کاری مخلوط با نانومواد و سایر افزودنی‌ها، نشان داده شده است که به طور کلی، عملکرد تریبولوژیکی روغن پایه مخلوط شده با نانومواد و سایر مواد افزودنی بهتر از نانومواد خالص است که نشان دهنده هم افزایی بین نانومواد و سایر مواد افزودنی روغن است. پراکنده کننده‌ها بیشترین کاربرد را در نانومواد روغن‌های روان‌کار دارند، زیرا می‌توان پایداری پراکندگی نانومواد را با افزودن آنها بهبود بخشید. این روش می‌تواند به راحتی مشکل تجمع نانومواد در روغن‌های روان‌کاری را حل کند که دست‌یابی به آن ساده‌تر، مقرون به صرفه و راحت‌تر از عامل دار کردن سطحی بر روی نانومواد است.

برهم‌کنش‌های بین نانولوله‌های MoS_2 و چندین افزودنی روغن مورد بررسی قرار گرفت که به شرایط تماس و سطوح روغن‌کاری بستگی داشت[۳۴،۳۵]. برهم‌کنش هم افزایی بین نانولوله‌های MoS_2 با افزودنی‌های ضد سایش تحت شرایط غلتشی و لغزشی مختلط به دست آمد. علاوه بر این، همه افزودنی‌های روغن انتخاب شده، پدیده هم افزایی با نانولوله‌های MoS_2 تحت فشارشدید را نشان دادند که به اهمیت پراکندگی خوب نانومواد در روان‌کاری مرزی اشاره دارد. با این حال، اثر تضاد[۱۲] میان نانولوله‌های MoS_2 و پراکنده کننده‌ها تحت لغزش رفت و برگشتی مشا هده شد؛ این پدیده نشان می‌دهد که تأثیر سایر افزودنی‌های روغن بر روان‌کاری نانومواد نیز تحت تأثیر رژیم روغن‌کاری و شرایط انجام آزمایش قرار می‌گیرد.

۴-۴ برهم‌کنش بین مواد در نانوکامپوزیت‌ها

بر هم‌کنش‌های متفاوتی بین نانومواد در نانوکامپوزیت‌ها وجود دارد، مانند اثرات هم‌افزایی و تضاد. نانوساختارهای مختلف و انواع نانومواد در ساختار و مزیت‌ها متفاوت هستند. به عنوان مثال، نانوذرات فلزی دارای ویژگی‌های منحصر به فردی از جمله، عدم خورندگی و نقطه ذوب پایین، اندازه کوچک (۱۰ >نانومتر) CDs[۱۳] ، نسبت ابعاد بزرگ طول به قطر CNT و پایداری مکانیکی نانومواد مبتنی بر کربن. به طور کلی، نانوذرات با اندازه کوچک می‌توانند خواص کاهش اصطکاک و ضد سایش را بهبود بخشند و نانوذرات با اندازه بزرگ ظرفیت حمل بار بهتری را نشان می‌دهند [۳۶]. ترکیب مزایای نانومواد در شرایط قابل اجرا همواره مورد انتظار محققان است.

نیروهای برهم‌کنش قوی واندروالس به دلیل مساحت سطح بزرگ چند لایه مبتنی بر گرافن است و عملکرد تریبولوژیکی روغن مخلوط با نانومواد مبتنی بر گرافن با تجمع لایه‌های گرافن محدود می‌شود. بنابراین، هیچ پوشش یکنواخت مفیدی روی تریبوفیلم وجود ندارد. با این حال، نانوذرات یا نانولوله ها می‌توانند به طور مؤثری از روی هم قرار گرفتن لایه‌های مبتنی بر گرافن جلوگیری

12- antagonism
13 - Carbon Dots

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

کنند. علاوه بر این، آنها می‌توانند برای کاهش اصطکاک در بین لایه‌ها بچرخند. کامپوزیت‌های 1D و 2D به صورت مؤثری مزایای نانوساختارهای مختلف را ترکیب می‌کنند. نمودار اثرات هم افزایی با ابعاد مختلف در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. سایر پارامترهای نانومواد در نانوکامپوزیت‌ها نیز باید در نظر گرفته شوند مانند غلظت، توانایی تغییر شکل، میل به ترکیب میان نانومواد مختلف و نسبت جرمی نانومواد مختلف که می‌تواند عملکرد تریبولوژیکی نانومواد را به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده کنترل کند.

۵- چشم انداز

تا به امروز، استفاده‌های بسیاری از نانومواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده شده است که نشان از توسعه پر رونق در این حوزه دارد. با این حال، تجزیه و تحلیل فرآیند تجربی و داده‌ها نشان می‌دهد که هنوز چالش‌هایی در برنامه‌های کاربردی وجود دارد. موارد زیر می‌توانند به‌عنوان پیشنهادات مهم تحقیقات آینده در زمینه توسعه نانومواد به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده در نظر گرفته شود.

۱) تحقیقات فرابعدی

درتحقیقات گوناگون داده‌های تجربی مختلفی با استفاده از نانومواد یکسان به دست می‌آید که ممکن است به فرآیندهای آزمایشی مختلف، سطوح تماس و ساختار نانومواد یا موارد دیگر مربوط باشد. برای توضیح این مشکل، تحقیقات فرا بعدی در مبحث تریبولوژی و مکانیسم مولکولی دقیقی مورد نیاز است. بنابراین، برای رسیدن به این هدف، در نظر گرفتن چندین زمینه مورد نیاز است :

(الف) کاربرد شبیه‌سازی دینامیک مولکولی [۳۸،۳۷] رفتارهای تریبولوژیکی برای نانومواد و ترکیبی از شبیه‌سازی مولکولی و آزمایش‌های تریبولوژیکی.

(ب) تحقیق سیستماتیک در مورد نظم تبدیل فیلم روغن، سطح تماس، نانومواد و انرژی در طول فرآیند اصطکاک و تغییر نظم عملکردهای تریبولوژیکی تحت شرایط کاری مختلف.

(ج) سیستم برهم‌کنش مولکولی بین روغن، سطح تماس، نانومواد و سایر افزودنی‌های معمولی.

۲) طراحی نانوذرات

به طور کلی، محققان مطالعه نانومواد‌ی که قبلاً یافته شده‌اند را ترجیح می دهند. بنابراین، تغییر الگوی سنتی تحقیق برای آشکارسازی و دستیابی به نانومواد جدید با رفتارهای تریبولوژیکی هدفمند حائز اهمیت است. به عنوان مثال، هندسه، اندازه در مقیاس نانو و عامل‌سازی MOF[۱۴] و CF[۱۵] را می‌توان به صورت دقیق کنترل و طراحی کرد. ضمن آن‌که مطالعه کاربرد آنها در روغن روان‌کننده قابل توجه است. با این حال، مطالعه MOFs به عنوان افزودنی‌های روغن روان‌کننده در سال ۲۰۱۱ و CFs در سال ۲۰۱۷ آغاز شد. تحقیقات اندکی انجام شده است و همین امر در مورد ILs[۱۶] نیز صادق است. طراحی نانومواد دشوار است اما ممکن است برای دستیابی عملکردهای تریبولوژیکی بهتر، مؤثر باشد.

۳) تهیه با روش برتر

[14]- Metal–organic framework
[15] - covalent organic framework
[16] - Ionic Liquids

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

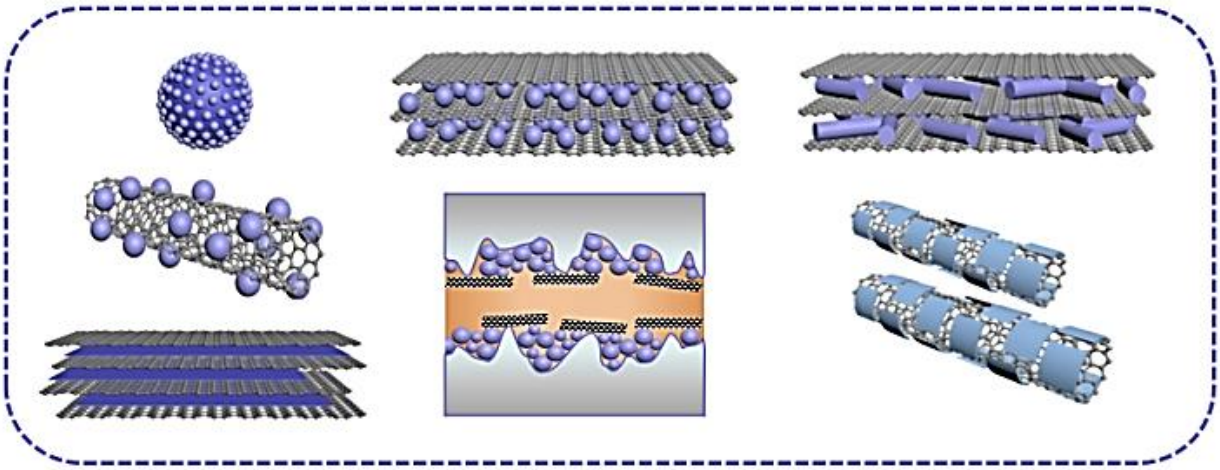
بسیاری از روش‌های آماده‌سازی نانومواد برای دستیابی به عملکرد تریبولوژیکی بهتر انجام شده‌اند اما برخی از مشکلات مانند هزینه بالا، تولید در مقیاس کوچک، تکرارپذیری ضعیف، نیاز به زمان طولانی و غیره وجود دارد و در صنعت فعلی به سختی قابل دسترسی است. روش‌های یک مرحله‌ای و کم هزینه که می‌توانند به تهیه نانومواد با عملکرد تریبولوژیکی برتر دست یابند، امید بخش هستند. از سوی دیگر، به دلیل منابع فراوان و هزینه کم، کانی‌های طبیعی ارزش کاوش در تریبولوژی را دارند. با این حال، تلاش‌های بیشتری برای بهینه‌سازی عملکرد تریبولوژیکی آنها مورد نیاز است.

۴) تحقیق در مورد مکانیسم‌های هم افزایی

با استفاده از اثر روان‌کنندگی هم افزایی، ترکیب دو یا چند نانومواد دارای رفتار تریبولوژیکی بهتری نسبت به نانومواد منفرد تحت شرایط کاری یکسان است. از سوی دیگر، ادغام نانومواد با سایر افزودنی‌های معمولی مؤثر و اجتناب ناپذیر است. با این حال، اثر روان‌کاری هم‌افزایی و مکانیسم مشارکتی به طور قطعی در سطح مولکولی تأیید نشده است، که این امر برای طراحی سیستم روان‌کاری ضروری است.

۵) حفاظت از محیط زیست

به حداقل رساندن و حذف استفاده از گوگرد و فسفر موجود در افزودنی‌های روغن روان‌کننده امری ضروری است. شکی نیست که نانومواد سازگار با محیط زیست به کاهش مصرف انرژی و اثر کربن کمک شایانی می‌نماید. افزودنی‌های نانومواد سازگار با محیط زیست برای پایداری محیط مفید هستند و الزامات تریبولوژی سبز [۳۹] را برآورده می‌کنند، که زمینه جدیدی برای تریبولوژیست‌ها می‌باشد.



شکل ۵ : نمودار اثرات هم افزایی با ابعاد مختلف.

۶. مراجع

[1] Dai W, Kheireddin B, Gao H, Liang H. Roles of nanoparticles in oil lubrication. Tribol Int 102: 88–98 (2016)

[2] Rajendhran N, Palanisamy S, Periyasamy P, Venkatachalam R. Enhancing of the tribological characteristics of the lubricant oils using Ni-promoted MoS2 nanosheets as nano-additives. *Tribol Int* 118: 314–328 (2018)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[3] Lahouij I, Vacher B, Martin J M, Dassenoy F. IF–MoS2 based lubricants: Influence of size, shape and crystal structure. *Wear* 296(1–2): 558–567 (2012)
[4] Rabaso P, Ville F, Dassenoy F, Diaby M, Afanasiev P, Cavoret J, Vacher B, le Mogne T. Boundary lubrication: Influence of the size and structure of inorganic fullerene-like MoS2 nanoparticles on friction and wear reduction. *Wear* 320: 161–178 (2014)
[5] Wang H D, Liu Y H, Liu W R, Wang R, Wen J G, Sheng H P, Peng J F, Erdemir A, Luo J B. Tribological behavior of NiAl-layered double hydroxide nanoplatelets as oil-based lubricant additives. *ACS Appl Mater Interfaces* 9(36): 30891–30899 (2017)
[6] Wu H X, Wang L P, Dong G N. Origin of the tribofilm from MoS2 nanoparticle oil additives: Dependence of oil film thickness on particle aggregation in rolling point contact. *Friction* 9(6): 1436–1449 (2021)
[7] Zhang C H, Li K, Luo J B. Superlubricity with nonaqueous liquid. In: *Superlubricity*, 2nd edn. Erdemir A, Martin J M, Luo J B, Eds. Amsterdam (the Netherlands): Elsevier Amsterdam, 2020: 379–403.
[8] Duan H T, Wu Y, Hua M, Yuan C Q, Wang D, Tu J S, Kou H C, Li J. Tribological properties of AlCoCrFeNiCu high-entropy alloy in hydrogen peroxide solution and in oil lubricant. *Wear* 297(1–2): 1045–1051 (2013)
[9] Uflyand I E, Zhinzhilo V A, Burlakova V E. Metal-containing nanomaterials as lubricant additives: State-of-the-art and future development. *Friction* 7(2): 93–116 (2019)
[10] Sarno M, Senatore A, Cirillo C, Petrone V, Ciambelli P. Oil lubricant tribological behaviour improvement through dispersion of few layer graphene oxide. *J Nanosci Nanotechnol* 14(7): 4960–4968 (2014)
[11] Liu Y H, Xin L, Zhang Y J, Chen Y F, Zhang S M, Zhang P Y. The effect of Ni nanoparticles on the lubrication of a DLC-based solid–liquid synergetic system in all lubrication regimes. *Tribol Lett* 65(2): 31 (2017)
[12] Choi Y, Lee C, Hwang Y, Park M, Lee J, Choi C, Jung M. Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil. *Curr Appl Phys* 9(2): e124–e127 (2009)
[13] Ali M K A, Hou X J, Mai L Q, Cai Q P, Turkson R F, Chen B C. Improving the tribological characteristics of piston ring assembly in automotive engines using Al2O3 and TiO2 nanomaterials as nano-lubricant additives. *Tribol Int* 103: 540–554 (2016)
[14] Chen Y F, Zhang Y J, Zhang S M, Yu L G, Zhang P Y, Zhang Z J. Preparation of nickel-based nanolubricants via a facile *in situ* one-step route and investigation of their tribological properties. *Tribol Lett* 51(1): 73–83 (2013)
[15] Liu X Y, Xu N, Li W M, Zhang M, Chen L F, Lou W J, Wang X B. Exploring the effect of nanoparticle size on the tribological properties of SiO2/polyalkylene glycol nanofluid under different lubrication conditions. *Tribol Int* 109:467–472 (2017)
[16] Wu X H, Gong K L, Zhao G Q, Lou W J, Wang X B, Liu W M. MoS2/WS2 quantum dots as high-performance lubricant additive in polyalkylene glycol for steel/steel contact at elevated temperature. *Adv Mater Interfaces* 5(1): 1700859 (2018)
[17] Ghaednia H, Babaei H, Jackson R L, Bozack M J, Khodadadi J M. The effect of nanoparticles on thin film elasto-hydrodynamic lubrication. *Appl Phys Lett* 103(26): 263111 (2013)
[18] Ghaednia H, Hossain M S, Jackson R L. Tribological performance of silver nanoparticle-enhanced polyethylene glycol lubricants. *Tribol Trans* 59(4): 585–592 (2016)
[19] He X L, Xiao H P, Choi H, Díaz A, Mosby B, Clearfield A, Liang H. α-zirconium phosphate nanoplatelets as lubricant additives. *Colloids Surf A Physicochem Eng Aspects* 452: 32–38 (2014)
[20] Senatore A, D'Agostino V, Petrone V, Ciambelli P, Sarno M. Graphene oxide nanosheets as effective friction modifier for oil lubricant: Materials, methods, and tribological results. *ISRN Tribol* 2013: 425803 (2013)
[21] Spear J C, Ewers B W, Batteas J D. 2D-nanomaterials for controlling friction and wear at interfaces. *Nano Today* 10(3): 301–314 (2015)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[22] Cho D H, Wang L, Kim J S, Lee G H, Kim E S, Lee S, Lee S Y, Hone J, Lee C G. Effect of surface morphology on friction of graphene on various substrates. *Nanoscale* 5(7): 3063–3069 (2013)
[23] Gong K L, Wu X H, Zhao G Q, Wang X B. Tribological properties of polymeric aryl phosphates grafted on to multi-walled carbon nanotubes as high-performances lubricant additive. *Tribol Int* 116: 172–179 (2017)
[24] Wan C X, Zhan S P, Jia D, Yang T, Chen H, Yao C Y, Duan H T. Tribological behavior of nanographite/polyimide composite under drying sliding condition. *Wear* 494–495: 204271 (2022)
[25] Li Y R, Zhao J, Tang C, He Y Y, Wang Y F, Chen J, Mao J Y, Zhou Q Q, Wang B Y, Wei F, et al. Highly exfoliated reduced graphite oxide powders as efficient lubricant oil additives. *Adv Mater Interfaces* 3(22): 1600700 (2016)
[26] Ge X Y, Halmans T, Li J J, Luo J B. Molecular behaviors in thin film lubrication—Part three: Superlubricity attained by polar and nonpolar molecules. *Friction* 7(6): 625–636 (2019)
[27] Yu L, Zhang L, Ye F, Sun M, Cheng X L, Diao G Q. Preparation and tribological properties of surface-modified nano-Y2O3 as additive in liquid paraffin. *Appl Surf Sci* 263: 655–659 (2012)
[28] Wang N, Wang H G, Ren J F, Gao G, Zhao G R, Yang Y W, Wang J Q. High-efficient and environmental-friendly PTFE@SiO2 core–shell additive with excellent AW/EP properties in PAO6. *Tribol Int* 158: 106930 (2021)
[29] Luo T, Chen X C, Li P S, Wang P, Li C C, Cao B Q, Luo J B, Yang S K. Laser irradiation-induced laminated graphene/MoS2 composites with synergistically improved tribological properties. *Nanotechnology* 29(26): 265704 (2018)
[30] Gu Y F, Fei J, Zheng X H, Li M, Huang J F, Qu M, Zhang L J. Graft PEI ultra-antiwear nanolayer onto carbon spheres as lubricant additives for tribological enhancement. *Tribol Int* 153: 106652 (2021)
[31] Cursaru D L, Andronescu C, Pirvu C, Ripeanu R. The efficiency of Co-based single-wall carbon nanotubes (SWNTs) as an AW/EP additive for mineral base oils. *Wear* 290–291: 133–139 (2012)
[32] Ettefaghi E O L, Rashidi A, Ahmadi H, Mohtasebi S S, Pourkhalil M. Thermal and rheological properties of oil-based nanofluids from different carbon nanostructures. *Int Commun Heat Mass Transf* 48: 178–182 (2013)
[33] Jin Y L, Duan H T, Cheng B X, Wei L, Tu J S, Liu J F, Li J. Synthesis of a multi-phenol antioxidant and its compatibility with alkyl diphenylamine and ZDDP in ester oil. *Tribol Lett* 67(2): 58 (2019)
[34] Tomala A, Ripoll M R, Gabler C, Remškar M, Kalin M. Interactions between MoS2 nanotubes and conventional additives in model oils. *Tribol Int* 110: 140–150 (2017)
[35] Tomala A, Ripoll M R, Kogovšek J, Kalin M, Bednarska A, Michalczewski R, Szczerek M. Synergisms and antagonisms between MoS2 nanotubes and representative oil additives under various contact conditions. *Tribol Int* 129: 137–150 (2019)
[36] Wang Y H, Shi Q, Xu H, Dong J X. The synthesis and tribological properties of small- and large-sized crystals of zeolitic imidazolate framework-71. *RSC Adv* 6(22): 18052–18059 (2016)
[37] Zhan S P, Xu H P, Duan H T, Pan L, Jia D, Tu J S, Liu L, Li J. Molecular dynamics simulation of microscopic friction mechanisms of amorphous polyethylene. *Soft Matter* 15(43): 8827–8839 (2019)
[38] Zhan S P, Duan H T, Pan L, Tu J S, Jia D, Yang T, Li J. Molecular dynamics simulation of shock-induced microscopic bubble collapse. *Phys Chem Chem Phys* 23(14): 8446–8455 (2021)
[39] Zhang S W. Green tribology: Fundamentals and future development. *Friction* 1(2): 186–194 (2013)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

چکیده انگلیسی:

A review of studies related to the interaction between nanomaterials, sliding surfaces, lubricants and additives used in nano-lubricant mixtures

Abbas Taghipoor[1*]
***1-** Department of Mechanical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Received: April 2024 Accepted: June 2024

Abstract

Due to the a lot of articles and the complexity of retrieval, it is impossible to cover all published articles in this review, but most of the research results and statistics can be considered as a reference for nanomaterials. According to many experimental results, the tribological characteristics of the influencing factors of most nanomaterials are summarized below. Due to the complexity of the friction process and various influencing factors, the conclusions are not absolute and can be different with the change of working conditions and nanomaterials. In this study, an overview of the researches carried out on the relationship between morphology and tribological performance, the analysis of various lubrication regimes, the interaction between nanomaterials and the sliding surface, the interaction between nanomaterials and lubricating oil, nanomaterials and other additives and the interaction between materials in nanocomposites. Finally, important suggestions for future research in the field of developing nanomaterials as lubricant oil additives have been stated.

Keywords: Nanomaterials, interaction, lubrication regime, morphology, tribological.
*corresponding author: taghipoor@iaud.ac.ir

Cite this article as: Abbas Taghipoor. A review of studies related to the interaction between nanomaterials, sliding surfaces, lubricants and additives used in nano-lubricant mixtures. Journal of Energy Conversion, 2024, 11(1), 79-92.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]