



University of Tehran

Comparison of the effect of nanosilica, nanoclay, nanographene and carbon nanotubes on the tribological and mechanical properties of polyvinyl chloride-wood flour composites

Behzad Kord¹ | Mehdi Roohani² | Farnaz Movahedi³

1. Corresponding Author, Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: b.kord@standard.ac.ir
2. Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: mroohani@standard.ac.ir
3. Cellulosic Materials and Packaging Research Group, Research Center of Chemistry and Petrochemistry, Standard Research Institute, Karaj, Iran. Email: fzmovahedi@standard.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:

Research Article

Article History:

Received: 07 January 2025

Revised: 16 September 2025

Accepted: 03 October 2025

Published online: 09 February 2026

Keywords:

Composites,
Friction coefficient,
Nanoparticles,
Wear resistance,
Weight loss.

ABSTRACT

In this study, the abrasion and tribological performance of polyvinyl chloride-wood flour composites reinforced with nanosilica, nanoclay, nanographene, and carbon nanotubes were investigated. Moreover, the mechanical strength and hardness of specimens containing nanoparticles were compared with those of control samples. To achieve this objective, wood flour was mixed with polyvinyl chloride at a weight ratio of 50% by melt compounding. Nanoparticles were used at various loading levels of 1, 2, 3, and 5% (by weight). Tribological tests were performed according to the pin-on-disk method, and wear resistance and friction coefficient were measured. The morphological aspects of the specimens were characterized using field emission scanning electron microscopy (FESEM) to evaluate the dispersion of nanoparticles in the composites. The results indicated that the presence of nanoparticles in the polymer matrix improved the tribological behavior of the composites by reducing the wear rate and increasing the friction coefficient. However, the tribological properties of the samples decreased with the inclusion of high nanoparticle loadings (5% by weight). The lowest weight loss was observed for specimens containing nanosilica, nanographene, carbon nanotubes, and nanoclay, with values of 0.11, 0.14, 0.19, and 0.22 g at the 3 wt% loading level, respectively. The weight loss of the control samples was 0.33 g. The evaluation of hardness and mechanical properties (flexural strength, flexural modulus, tensile strength, and tensile modulus) showed that the highest values were obtained in composites containing 3% nanosilica. Morphological observations revealed that nanoparticles were homogeneously and well dispersed in the samples, whereas improper dispersion and agglomeration occurred at the higher nanoparticle content of 5% by weight.

Cite this article: Kord, B., Roohani, M., Movahedi, F. (2026). Comparison of the effect of nanosilica, nanoclay, nanographene and carbon nanotubes on the tribological and mechanical properties of polyvinyl chloride-wood flour composites. *Journal of Forest and Wood Products*, 78 (4), 403-417. DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.396855.1349>



© The Author(s) **Publisher:** University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jfwf.2025.396855.1349>



دانشگاه تهران

نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۰۵۳۰

وب‌گاه نشریه: <https://jfw.ut.ac.ir>

مقایسه اثر نانوسیلیس، نانورس، نانوگرافن و نانولوله کربنی

بر خواص سایشی و مکانیکی چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب

بهزاد کرد^{۱*} | مهدی روحانی^۲ | فرناز موحدی^۳

۱. نویسنده مسئول، گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: b.kord@standard.ac.ir

۲. گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: mroohani@standard.ac.ir

۳. گروه سلولزی و بسته‌بندی، پژوهشکده شیمی و پتروشیمی، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران. رایانامه: fzmovahedi@standard.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

کلیدواژه:

چندسازه،

ضریب اصطکاک،

کاهش وزن،

مقاومت به سایش،

نانوذرات.

در این پژوهش عملکرد سایشی چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب که با نانوسیلیس، نانورس، نانوگرافن و نانولوله کربنی تقویت شده است، ارزیابی شد. همچنین، خواص مکانیکی و سختی نمونه‌های دارای نانوذرات و نمونه‌های شاهد مقایسه شدند. برای این منظور، آرد چوب با نسبت وزنی ۵۰ درصد با پلی‌وینیل-کلراید به روش اختلاط مذاب با یکدیگر ترکیب شدند. نانوذرات در مقادیر مختلف ۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی به کار گرفته شد. آزمون سایش مطابق روش پین دیسک بر روی نمونه‌ها انجام شد و مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک آنها اندازه‌گیری شد. جنبه ریخت‌شناسی نمونه‌ها به منظور مطالعه نحوه پراکنش نانوذرات در چندسازه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) انجام شد. نتایج نشان داد وجود نانوذرات موجب بهبود رفتار سایشی چندسازه‌ها از طریق کاهش نرخ سایش و افزایش ضریب اصطکاک آن می‌شود. همچنین در هنگام استفاده از نانوذرات در مقادیر زیاد (۵ درصد وزنی)، خواص سایشی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. کمترین مقدار کاهش وزن به ترتیب در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس، نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس برابر ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۱۹ و ۰/۲۲ گرم در سطح بارگذاری ۳ درصد مشاهده شد. مقدار کاهش وزن در نمونه‌های شاهد ۰/۳۳ گرم گزارش شد. یافته‌های حاصل از ارزیابی سختی و استحکام مکانیکی (مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کششی) نشان داد که بیشترین مقدار این ویژگی‌ها در چندسازه‌های حاصل از اختلاط با ۳ درصد نانوسیلیس به دست آمد. تصاویر میکروگراف‌های الکترونی نشان داد که نانوذرات به طور همگن و مناسب در نمونه‌ها پراکنش یافته‌اند، اما با افزایش مقدار نانوذرات تا سطح ۵ درصد، پراکنش نامناسب و تجمع ذرات اتفاق می‌افتد.

استناد: کرد؛ بهزاد، روحانی؛ مهدی، موحدی؛ فرناز (۱۴۰۴). مقایسه اثر نانوسیلیس، نانورس، نانوگرافن و نانولوله کربنی بر خواص سایشی و مکانیکی چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل

کلراید-آرد چوب. نشریه جنگل و فرآورده‌های چوب، ۷۸ (۴)، ۴۱۷-۴۰۳. DOI: <https://10.22059/jfw.2025.396855.1349>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

<https://doi.org/10.22059/jfw.2025.396855.1349>



۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، با پیشرفت فناوری‌های نوین و افزایش نیاز به مواد سبک، مقاوم و با عملکرد بالا، پلیمرها و چندسازه‌ها به‌عنوان گزینه‌های ایده‌آل در بسیاری از صنایع شناخته شده‌اند. با این وجود، یکی از چالش‌های اصلی در کاربرد این مواد، کاهش مقاومت سایشی آنها نسبت به مواد فلزی و سرامیکی است که منجر به فرسایش سریع‌تر و کاهش عمر قطعات می‌شود [۱-۲]. این مسئله اهمیت ویژه‌ای به مطالعات مربوط به بهبود خواص سایشی در این مواد بخشیده است. از این‌رو، بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت سایشی و روش‌های بهبود آن، موضوعی حیاتی در حوزه مهندسی مواد و طراحی قطعات صنعتی در صنایع حساس و پیشرفته همچون خودروسازی، هوافضا، ساخت تجهیزات پزشکی و دریایی محسوب می‌شود [۳-۱].

فرآیند سایش به‌عنوان یک پدیده فیزیکی-مکانیکی که طی آن ماده از سطح قطعه به‌دلیل تماس مکرر و حرکت نسبی با سطح دیگر حذف می‌شود، مستقیماً بر طول عمر مفید و قابلیت اطمینان قطعات صنعتی اثرگذار است. در واقع هنگامی که دو سطح در تماس قرار می‌گیرند و حرکت نسبی بین آنها رخ می‌دهد، اصطکاک و ساییدگی به‌وجود می‌آید که می‌تواند منجر به فرسایش، کاهش ضخامت و نهایتاً خرابی قطعات شود [۴]. مکانیسم‌های سایش در پلیمرها و آمیزه‌های آنها پیچیده و چندگانه هستند و شامل فرسایش مکانیکی، خستگی سطح، چسبندگی بین سطوح و حتی تخریب حرارتی موضعی می‌شوند [۵-۶]. به‌طور کلی، سایش در پلیمرها به‌طور عمده از طریق دو مکانیسم غالب صورت می‌گیرد: فرسایش مکانیکی ناشی از برش و خراش سطحی، و خستگی سطحی که در اثر بارگذاری‌های تکراری ایجاد می‌شود. در این میان، اصطکاک سطحی منجر به تجمع انرژی در لایه‌های زیرین ماده شده و باعث تخریب تدریجی ساختار مولکولی می‌شود. این فرآیند می‌تواند به تشکیل قطعات کوچک جدا شده از سطح (ذرات فرسوده) منجر شود که یکی از عوامل اصلی کاهش عمر مفید مواد است [۵-۶]. از این‌رو، مطالعه رفتار اصطکاکی در سطوح پلیمری نیازمند درک عمیق از تعاملات مولکولی، ساختار مولکولی، و ماهیت شیمیایی و فیزیکی آنها است. از طرف دیگر، شرایط محیطی و عملیاتی نیز بر خواص سایشی پلیمرها تأثیر به‌سزایی دارند. دما، رطوبت، فشار، سرعت نسبی سطوح، شرایط شیمیایی محیط، حضور روان‌کننده‌ها و پوشش‌های سطحی از جمله این عوامل به‌شمار می‌روند [۷-۹].

طی چند دهه گذشته رشد فزاینده‌ای در زمینه تولید و مصرف چندسازه‌های حاصل از پلیمرهای گرمانرم به‌وجود آمده است. اختلاط این دسته از پلیمرها با الیاف مختلف، گستره وسیعی از چندسازه‌ها با خواص ویژه برای کاربردهای متنوع را پدید آورده است که می‌توانند به‌عنوان جایگزین مناسب برای مواد متداول نظیر فلزات و چوب به‌شمار آیند [۱۰-۱۱]. در این زمینه چندسازه‌های حاصل از اختلاط پلیمرهای گرمانرم و الیاف طبیعی به‌دلیل مزایای اقتصادی (هزینه پایین)، انعطاف‌پذیری در فرآیند، زیست‌سازگاری و استحکام مکانیکی قابل قبول، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. علی‌رغم مزایای اشاره شده، جذب رطوبت، پایداری حرارتی کم، و ساینده‌گی نسبی دامنه کاربرد آنها را با محدودیت مواجه ساخته است [۱۰-۱۱]. به‌منظور غلبه بر این مشکلات، استفاده از روش‌ها و فناوری‌های پیشرفته نظیر اصلاح شیمیایی سطح الیاف و به‌کارگیری ترکیبات چندفازی جدید (هیبریداسیون)، مسیری را برای بهبود خواص این چندسازه‌ها فراهم کرده است [۱۲-۱۳]. از سوی دیگر پیشرفت‌های نانو فناوری به‌عنوان یک فرصت مناسب برای توسعه چندسازه‌های پلیمری جدید با ویژگی‌های قابل قبول شناخته شده است [۱۴-۱۶].

بررسی مطالعات و مرور منابع مشخص نمود چندسازه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف طبیعی با بهره‌گیری از خواص هم‌افزای فاز پلیمری و تقویت‌کننده، راهکار موثری برای بهبود خواص سایشی ارائه می‌دهند. در این مواد، ماتریس پلیمری نقش انتقال‌دهنده نیرو و نگهدارنده ساختار را ایفا می‌کند، در حالی که تقویت‌کننده‌ها با سختی و استحکام بالا مقاومت سایشی کل سیستم را بهبود می‌بخشند. اثر بخشی فاز تقویت‌کننده به پارامترهایی مانند درصد اختلاط، شکل هندسی الیاف، توزیع و نحوه پراکنش الیاف، و کیفیت چسبندگی در منطقه بین فازی (سطح اتصال) بستگی دارد [۱۷-۲۰]. اگرچه در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای در زمینه رفتار سایشی و مطالعه مکانیسم‌های آن در چندسازه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف طبیعی صورت پذیرفته است [۲۱-۲۶]، اما تأثیر استفاده از نانوذرات بر خواص سایشی این چندسازه‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲۷-۳۰]. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی تأثیر نانوذرات مختلف شامل نانورس، نانولوله کربن، نانوگرافن و نانوسیلیس بر خواص سایشی چندسازه ساخته‌شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب انجام شد. همچنین استحکام مکانیکی و سختی نمونه‌های حاوی نانوذرات با نمونه‌های فاقد نانوذرات (شاهد) مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲-۱. مواد

پلی‌وینیل کلراید با نام تجاری Poliran PVC S-6058، از شرکت پتروشیمی بندر امام با چگالی حجمی ۶۱۰-۵۵۰ گرم بر لیتر، و ویسکوزیته ۹۲-۸۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و دمای ذوب ۱۶۷ درجه سانتی‌گراد خریداری شد. همچنین پایدارکننده پلی‌وینیل کلراید^۱ از شرکت کاسپین پلیمر تهیه شد. آرد چوب مخلوط پهن‌برگان از شرکت آریا سلولز با اندازه ابعاد ۴۲۵ میکرون تهیه شد. نانورس با نام تجاری کلوزیت 30 B از شرکت آمریکایی Southern Clay، با ظرفیت تبادل کاتیونی ۹۰ میلی‌اکی‌والان بر ۱۰۰ گرم، و فاصله بین لایه‌های سیلیکاتی ۱۸/۵ آنگستروم، تهیه شد. نانوگرافن با نام تجاری AO-4 از شرکت آمریکایی Supermarket، با درجه خلوص ۹۸/۵ درصد، ضخامت ۶۰ نانومتر، اندازه ذرات ۳-۷ میلی‌متر، و سطح ویژه ۱۵ متر مربع بر گرم، خریداری شد. نانولوله کربنی چند دیواره با درجه خلوص ۹۰ درصد، ضخامت خارجی ۱۰ نانومتر، و ضخامت داخلی ۳/۵ نانومتر، از پژوهشگاه صنعت نفت تهیه شد. نانوسیلیس با اندازه ذرات ۷۰-۶۰ نانومتر، دانسیته ۰/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب، و سطح ویژه ۶۰۰-۱۶۰ متر مربع بر گرم، از شرکت آمریکایی Nanomaterial خریداری شد.

۲-۲. فرآیند اختلاط و ساخت نمونه‌های آزمونی

پس از تهیه مواد اولیه و قبل از ساخت نمونه‌ها، ابتدا آرد چوب به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل گرمخانه قرار گرفت تا جهت ساخت نمونه، کاملاً خشک گردد. سپس فرآیند اختلاط مواد مطابق جدول ۱ توسط دستگاه مخلوط‌کن داخلی برابندر مدل WHT 55 (ساخت کشور آلمان) در دمای اختلاط ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت اختلاط ۶۰ دور در دقیقه انجام شد. با توجه به منحنی گشتاور-زمان نمایش داده شده بر روی مانیتور دستگاه مخلوط‌کن، ابتدا پلی‌وینیل-کلراید و پایدارکننده به داخل محفظه دستگاه ریخته شد، پس از ۲ دقیقه ذوب شدن و رسیدن به گشتاور ثابت، پرکننده نانومتری اضافه و پس از گذشت ۳ دقیقه، آرد چوب به درون محفظه ریخته شد و با گذشت ۵ دقیقه و رسیدن به گشتاور ثابت، عملیات اختلاط به‌طور مستمر انجام شد. با پایان یافتن ۱۰ دقیقه از شروع اختلاط، دستگاه متوقف و ترکیب از درون مخلوط‌کن خارج شد. جرم کل مواد مصرفی برای هر تیمار تقریباً برابر ۵۷ گرم بود. پس از ترکیب مواد، همه مخلوط‌ها تا دمای اتاق خنک شدند و سپس با استفاده از یک آسیاب صنعتی (Weisser، مدل WGLS 200، آلمان) گرانوله شدند. گرانول‌ها به مدت ۴ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند. در نهایت تخته‌ها با فرآیند قالب‌گیری فشاری توسط دستگاه پرس گرم (مدل WCH، Toyo Seike Mini-test، ساخت کشور انگلیس) مجهز به یک قالب فولادی با ابعاد ۱۰۰ × ۱۰۰ × ۶ میلی‌متر ساخته شدند. در این مرحله گرانول‌ها ابتدا به قالب سرد اضافه شدند. صفحات پرس تا دمای ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد گرم شدند و در طول مرحله پیش‌گرم کردن، حداقل فشار (نزدیک به صفر) اعمال شد تا تماس بین صفحات و قالب حفظ شود. سپس فشار به آرامی در عرض ۲ دقیقه به ۵ مگاپاسکال افزایش یافت و به مدت ۴ دقیقه دیگر در این فشار نگه داشته شد. سرانجام نمونه‌های آزمونی پس از قرار گرفتن داخل دستگاه پرس سرد به مدت ۵ دقیقه تولید شدند. در هنگام فرآیند قالب‌گیری، گرانول‌ها بین دو ورق کاغذ نسوز قرار داده شد تا به صفحه‌های پرس نچسبند. سرانجام برای اطمینان از شرایط یکنواخت دمایی و رطوبتی، تمام نمونه‌های آزمونی استاندارد ساخته شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۵۰ درصد به مدت یک هفته قرار داده شدند تا با رطوبت و دمای محیط به تعادل برسند.

جدول ۱. درصد وزنی اجزای تشکیل‌دهنده ترکیب تیمارهای مورد مطالعه

شماره تیمار	پلی‌وینیل-کلراید (درصد وزنی)	آرد چوب (درصد وزنی)	نانوذره (درصد وزنی)
۱	۵۰	۵۰	۰
۲	۵۰	۴۹	۱
۳	۵۰	۴۸	۲
۴	۵۰	۴۷	۳
۵	۵۰	۴۵	۵

^۱PVC Stabilizer

۲-۳. ارزیابی ویژگی‌ها

۲-۳-۱. آزمون سایش

آزمون سایش به روش پین روی دیسک و براساس استاندارد ASTM G99 [۳۱]، با استفاده از دستگاه مجهز به سیستم کامپیوتری همراه با کنترل و ثبت دمای پین، دور موتور، مسافت طی شده، نمودار نیرو-زمان، و نمودار تنش-زمان انجام شد. برای این منظور، نخست سطح نمونه‌ها با استون از هرگونه آلودگی پاک شد، و پس از توزین آنها با ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم، در دستگاه آزمون سایش تعبیه شدند. نیرویی برابر با ۱۰ نیوتن در نظر گرفته و توسط پین‌هایی از جنس فولاد بلبرینگ (فولاد ۵۲۰۰) با سختی RC ۶۴ و شعاع ۲۰ میلی‌متر در دمای محیط به سطح نمونه‌ها اعمال شد. پس از پیمودن مسافت ۲۵۰ متر با سرعت خطی ۰/۰۴ متر بر ثانیه، دوباره نمونه‌ها تمیز و وزن آنها ثبت شد. ضریب اصطکاک نمونه‌ها از خروجی اصلی دستگاه آزمون سایش به دست آمد، اما مقاومت به سایش نمونه‌ها با توجه به رابطه ۱ محاسبه شد.

$$W = W_1 - W_2 \quad (۱)$$

در رابطه بالا W : مقدار مقاومت به سایش، W_1 : وزن نمونه قبل از سایش و W_2 : وزن نمونه بعد از سایش. برای هر تیمار، آزمون مقاومت به سایش با ۳ تکرار انجام شد.

۲-۳-۲. آزمون سختی سنجی

آزمون سختی سنجی (Shore D) براساس استاندارد ASTM D2240 [۳۲]، در دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 50 ± 2 درصد انجام شد. در این آزمون، سختی نمونه‌ها از طریق میزان فرورفتگی سوزن دستگاه سختی سنج (ساخت شرکت سنتام) تحت اعمال بار ۵۰ نیوتن در مدت زمان ۱۰ ثانیه و در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. برای هر تیمار، آزمون سختی با ۵ تکرار انجام شد.

۲-۳-۳. آزمون مکانیکی

آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D 638 [۳۳]، بر روی نمونه‌های دمبلی شکل با ابعاد $10 \times 3 \times 167$ میلی‌متر توسط دستگاه اینسترون مدل ۱۱۸۶ ساخت کشور انگلستان انجام شد. در آزمون کشش طول دهانه ۱۰۰ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۲ میلی‌متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. برای هر تیمار، آزمون کشش با ۳ تکرار انجام شد. آزمون خمش مطابق روش سه‌نقطه‌ای تعریف شده در استاندارد ASTM D790 [۳۴]، با نرخ کرنش ۰/۰۱ میلی‌متر و سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. ابعاد اسمی نمونه‌ها $5 \times 13 \times 100$ میلی‌متر و طول دهانه ۸۰ میلی‌متر بود.

۲-۴. مطالعه ریخت‌شناسی نمونه‌ها

به منظور ارزیابی پراکنش نانوذرات از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان (FE-SEM) مدل Mira 3 XMU ساخت شرکت Tescan (کشور چک) استفاده شد. برای انجام این کار ابتدا نمونه‌ها در محیط نیتروژن مایع (دمای منفی ۱۹۶ درجه سانتی‌گراد) منجمد و شکسته شدند، سپس سطح شکست نمونه‌های آزمونی با لایه نازکی از طلا جهت وضوح بهتر تصویر پوشش داده شد. تمام تصاویر با ولتاژ تسریع شده ۱۵ کیلو ولت بررسی شدند.

۲-۵. تجزیه و تحلیل نتایج

برای تجزیه و تحلیل داده‌های مربوط به خواص سایشی و مکانیکی چندسازه‌ها، از آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. در صورت وجود اختلاف معنی‌دار، مقایسه و گروه‌بندی میانگین‌ها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح اطمینان ۹۹ درصد انجام شد.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

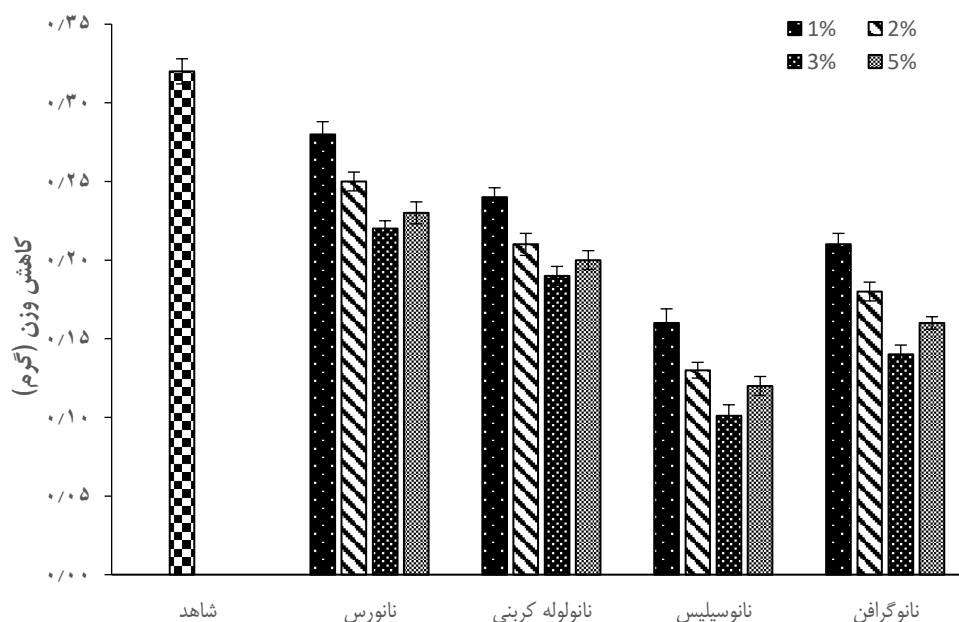
۳-۱. مقاومت به سایش

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر مقاومت به سایش چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۲). میزان کاهش وزن در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوذرات مختلف در شکل ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افت وزن نمونه‌ها با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. به عبارتی حضور نانوذرات منجر به افزایش مقاومت به سایش در نمونه‌های مورد مطالعه می‌گردد. در واقع حضور نانوذرات در ماده زمینه پلیمری، به علت داشتن توانایی حمل بار و انتقال تنش بالاتر نسبت به ماده زمینه موجب جلوگیری از لغزش راحت مولکول‌های پلیمر (کاهش تحرک مولکولی زنجیره‌های پلیمری) و در نتیجه کوچک‌تر شدن اندازه تکه‌های جدا شده ناشی از سایش می‌شود. همچنین حضور نانوذرات در ماده زمینه پلیمری از طریق بهبود برهم‌کنش بهتر بین الیاف و پلیمر در سطح اتصال (فصل مشترک) موجب کاهش نرخ سایش و بهبود رفتار سطحی چندسازه می‌گردد. نتایج مشابه در پژوهش‌های انجام شده توسط Xian و همکاران (۲۰۰۶)، Meng و همکاران (۲۰۰۹)، Zhenhua و همکاران (۲۰۱۲)، و Cui و همکاران (۲۰۱۲) گزارش شده است. از طرف دیگر، با افزایش جزء تقویت‌کننده در ماده زمینه پلیمری، مساحت سطحی و انرژی سطحی افزایش می‌یابد و در نتیجه پیوندهای بیشتری بین جزء تقویت‌کننده و ماده زمینه در چندسازه ایجاد می‌شود. از این رو، انتظار می‌رود افزایش پیوند بیشتر بین اجزاء، باعث می‌شود انتقال بار و تنش بیشتر و بهتر انجام شود و به تبع آن مقاومت به سایش در چندسازه بهبود می‌یابد [۳۹-۴۲].

جدول ۲. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر مقاومت به سایش چندسازه پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
نوع نانوذرات	۰/۰۹۲	۳	۰/۰۳۱	۳۰۵/۲۵۰	۰/۰۰۰**
مقدار نانوذرات	۰/۰۲۴	۳	۰/۰۰۸	۷۸/۷۵۰	۰/۰۰۰**
نوع × مقدار نانوذرات	۰/۰۰۱	۹	۵-۱۰/۸۳۳	۰/۵۸۳	۰/۰۰۰**
خطا	۰/۰۰۳	۳۲	۰/۰۰۱		
کل	۰/۱۱۹	۴۷			

** - معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < 0.01$)



شکل ۱. تأثیر نوع و مقدار نانوذرات مختلف بر کاهش وزن نمونه‌های مورد مطالعه

همچنین در شکل ۱ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار نانوذرات تا ۳ درصد وزنی مقاومت به سایش نمونه‌ها افزایش یافته، اما افزودن مقادیر بیشتر (۵ درصد وزنی) منجر به کاهش آن می‌شود. دلیل این مسئله را می‌توان این‌گونه بیان کرد که افزایش بیش از حد نانوذرات در ماده زمینه پلیمری موجب تجمع بیش از حد و کلوخه‌ای شدن ذرات در سطح اتصال چندسازه می‌شود. این امر می‌تواند موجب افزایش فاصله مولکول‌ها در زنجیره پلیمری، ضعیف شدن پیوندها و در نتیجه کاهش توان حمل بار و افزایش نرخ سایش شود. به عبارتی درهم‌رفتگی و کلوخه شدن نانوذرات از طریق جدا شدن تکه‌ای ذرات و عدم یکنواختی مؤثر در سطح اتصال می‌تواند منجر به کاهش قدرت پیوند و افزایش نرخ سایش در چندسازه می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل از مقاومت به سایش با نتایج حاصل از مطالعات پیشین مطابقت دارد [۳۷-۳۹].

نتایج نشان داد نانوسیلیس در مقایسه با نانولوله کربنی، نانوگرافن و نانورس مقاومت به سایش بالاتری در چندسازه‌ها ایجاد کرده است. دلیل این مسئله را می‌توان به ساختار نانوسیلیس و نحوه اختلاط و پراکنش آن در ماده زمینه پلیمری نسبت داد. در واقع نانوسیلیس به دلیل داشتن ساختاری کریستالی و سخت می‌تواند منجر به افزایش سختی سطح در چندسازه شده و مقاومت به سایش را افزایش دهد. به عبارتی این سختی باعث می‌شود که ذرات نانوسیلیس از خوردگی و ساییدگی سطحی چندسازه جلوگیری نماید. از طرف دیگر نانوسیلیس به خاطر داشتن سطح ویژه زیاد می‌تواند برهم‌کنش و چسبندگی بین ماده زمینه پلیمری و آرد چوب را در ناحیه فصل مشترک افزایش داده و در نتیجه منجر به کاهش نرخ سایش و بهبود رفتار سطحی چندسازه می‌گردد. یافته‌های Zhenhua و همکاران (۲۰۱۲)، و Sheykh و همکاران (۲۰۱۷) بر درستی این موضوع تأکید دارند. کمترین مقدار کاهش وزن در نمونه‌های دارای ۳ درصد نانوسیلیس مشاهده شد. به طوری که مقدار کاهش وزن به ترتیب در نمونه‌های حاصل از اختلاط با ۳ درصد نانوسیلیس، نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس برابر ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۱۹ و ۰/۲۲ گرم گزارش شد. نمونه‌های شاهد (فاقد نانوذرات) دارای مقدار کاهش وزن برابر ۰/۳۳ گرم می‌باشد.

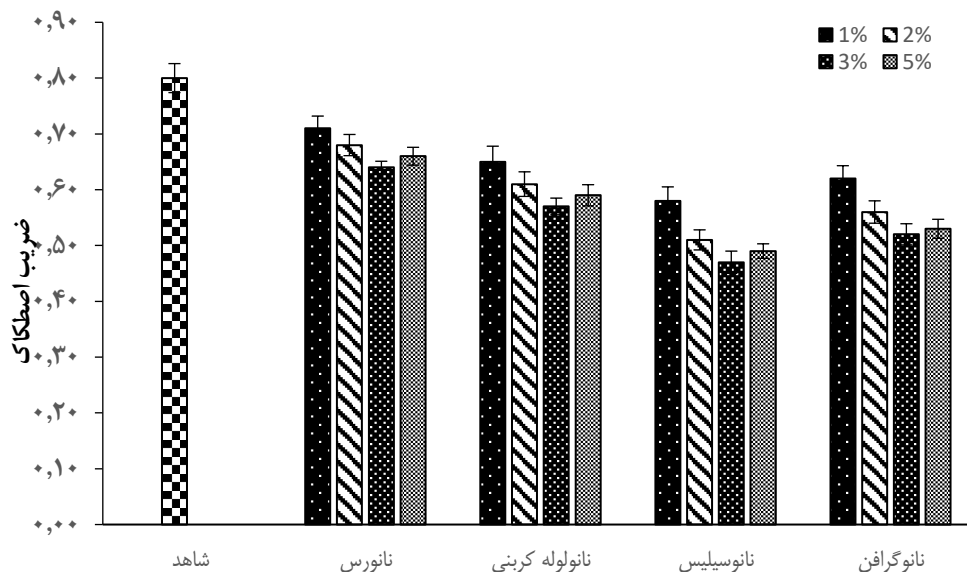
۳-۲. ضریب اصطکاک

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر ضریب اصطکاک چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۳). مقدار ضریب اصطکاک در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوذرات مختلف در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب اصطکاک نمونه‌ها با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. به عبارتی نمونه‌های دارای نانوذرات در مقایسه با نمونه‌های شاهد، از ضریب اصطکاک کمتری برخوردارند. این مسئله می‌تواند به دلیل افزایش فاز سخت در سطح اتصال و کاهش جدا شدن تکه‌ای، و پیوند محکم بین مولکول‌ها در زنجیره پلیمری باشد. از طرفی درهم‌رفتگی و کلوخه شدن^۱ نانوذرات در ناحیه فصل مشترک بین ماده زمینه پلیمری و آرد چوب منجر به افزایش تخلخل، جدا شدن راحت ذرات و افزایش ضریب اصطکاک چندسازه می‌گردد. مقایسه نتایج حاصل از ضریب اصطکاک با نتایج حاصل از مطالعات قبلی همخوانی دارد [۳۷-۴۲]. همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود چندسازه‌های دارای نانوسیلیس در مقایسه با نانولوله کربنی، نانوگرافن و نانورس از ضریب اصطکاک کمتری برخوردارند. در واقع نانوسیلیس به خاطر داشتن ذرات سخت و کروی، می‌تواند مقاومت سطح چندسازه را افزایش داده و از خراشیدگی و سایش جلوگیری نماید، در نتیجه ضریب اصطکاک را کاهش دهد. از طرف دیگر ذرات نانوسیلیس معمولاً کروی شکل و با اندازه یکنواخت می‌باشند که می‌توانند راحت‌تر در ماده زمینه پلیمری پخش شده و درهم‌رفتگی و تجمع کمتری ایجاد کنند، این توزیع یکنواخت‌تر در مقایسه با سایر نانوذرات مورد استفاده در این پژوهش می‌تواند منجر به سطح تماس بهتر و یکپارچه‌تر در ناحیه فصل مشترک چندسازه شود و به تبع آن اصطکاک سایشی کاهش یابد. نتایج مشابه در پژوهش‌های Zhenhua و همکاران (۲۰۱۲)، و Sheykh و همکاران (۲۰۱۷) گزارش شده است. همچنین می‌توان انتظار داشت ذرات نانوسیلیس با پر کردن خلل و فرج، چندسازه را هموارتر و صاف‌تر کرده و موجب کاهش اصطکاک شود [۳۷، ۳۹]. کمترین مقدار ضریب اصطکاک در نمونه‌های دارای ۳ درصد نانوسیلیس مشاهده شد. به طوری که کمترین مقدار ضریب اصطکاک به ترتیب در نمونه‌های حاصل از اختلاط با ۳ درصد نانوسیلیس، نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس برابر ۰/۴۷، ۰/۵۲، ۰/۵۷ و ۰/۶۴ گزارش شد. نمونه‌های شاهد (فاقد نانوذرات) دارای مقدار ضریب اصطکاک برابر ۰/۸۱ می‌باشد.

^۱ Agglomeration

جدول ۳. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر ضریب اصطکاک چندسازه پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
نوع نانوذرات	۰/۱۶۹	۳	۰/۰۵۶	۵۶۲/۱۸۷	۰/۰۰۰**
مقدار نانوذرات	۰/۰۵۵	۳	۰/۰۱۸	۱۸۲/۶۸۸	۰/۰۰۰**
نوع × مقدار نانوذرات	۰/۰۰۳	۹	۰/۰۰۳	۲/۸۵۴	۰/۰۰۰**
خطا	۰/۰۰۳	۳۲	۱ × ۱۰ ^{-۴}		
کل	۰/۲۳۹	۴۷			

** - معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < 0.01$)

شکل ۲. تأثیر نوع و مقدار نانوذرات مختلف بر ضریب اصطکاک نمونه‌های مورد مطالعه

۳-۳. سختی

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر سختی چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۴). مقدار سختی در نمونه‌های شاهد و نمونه‌های حاوی نانوذرات مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی نمونه‌ها با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد. این موضوع به دلیل افزایش فاز تقویت‌کننده و ایجاد یک پیوند مناسب بین فاز تقویت‌کننده و ماده زمینه پلیمری در سطح اتصال می‌باشد، که منجر به توزیع یکنواخت‌تر تنش در داخل چندسازه شده و از تجمع تنش در نقاط خاص جلوگیری کرده و به تبع آن سختی افزایش می‌یابد [۳۱-۲۸]. از طرف دیگر نانوذرات به عنوان مانع برای حرکت یا رشد نقص‌ها و نابجایی‌ها^۱ عمل کرده و منجر به افزایش مقاومت به تغییر شکل و سختی در چندسازه می‌شود. نتایج مشابه در پژوهش‌های انجام شده توسط Xian و همکاران (۲۰۰۶)، Meng و همکاران (۲۰۰۹)، Zhenhua و همکاران (۲۰۱۲)، و Cui و همکاران (۲۰۱۲) گزارش شده است. از طرفی مشاهده شد با افزایش مقدار نانوذرات تا ۳ درصد وزنی سختی نمونه‌ها افزایش یافته، اما افزودن مقادیر بیشتر (۵ درصد وزنی) منجر به کاهش آن می‌شود. دلیل این مسئله را می‌توان به درهم‌رفتگی و کلوخه شدن نانوذرات و به تبع آن کاهش چسبندگی در سطح اتصال نسبت داد [۳۵-۳۲]. همچنین در شکل ۲ مشاهده می‌شود چندسازه‌های دارای نانوسیلیس در مقایسه با نانولوله کربنی، نانوگرافن و نانورس از سختی بالاتری برخوردارند. نانوذرات سیلیس به‌خاطر داشتن سختی ذاتی بالا در مقایسه با سایر نانوذرات به کار گرفته شده در این پژوهش، منجر به افزایش سختی چندسازه‌ها می‌شوند که با یافته‌های Zhenhua و همکاران

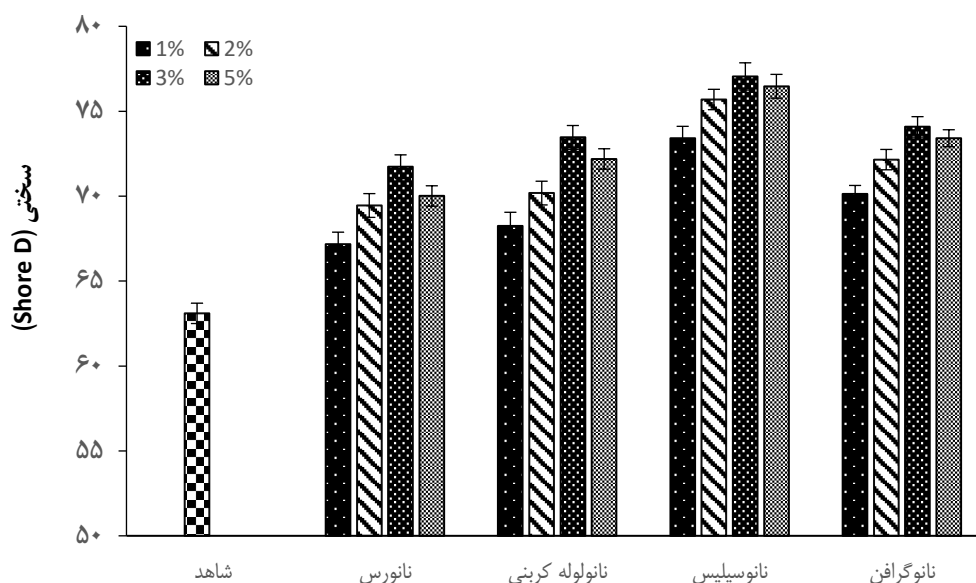
^۱Dislocations

(۲۰۱۲)، و Sheykh و همکاران همخوانی دارد. از طرف دیگر سطح ذرات نانوسیلیس به دلیل داشتن گروه‌های فعال امکان برقراری بهتر با ماده زمینه پلیمری از طریق پیوندهای هیدروژنی یا کووالانسی را فراهم می‌نماید، در نتیجه این اتصال قوی باعث انتقال بهتر تنش و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل سطحی و سختی چندسازه می‌گردد. در حالی که نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس به‌خاطر داشتن سطح نسبتاً غیرفعال، برهمکنش ضعیف‌تری ایجاد می‌کنند [۳۸، ۳۶]. بیشترین مقدار سختی در نمونه‌های دارای ۳ درصد نانوسیلیس مشاهده شد. به‌طوری که بیشترین مقدار سختی به‌ترتیب در نمونه‌های حاصل از اختلاط با ۳ درصد نانوسیلیس، نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس برابر ۷۷/۰۵، ۷۴/۰۸، ۷۳/۴۶ و ۷۱/۷۳ گزارش شد. نمونه‌های شاهد (فاقد نانوذرات) دارای مقدار سختی برابر ۶۳/۱ می‌باشد.

جدول ۴. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر سختی چندسازه پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
نوع نانوذرات	۲۴۲/۵۹۱	۳	۸۰/۸۶۴	$5/284 \times 10^3$	۰/۰۰۰**
مقدار نانوذرات	۱۲۵/۷۶۵	۳	۴۱/۹۲۲	$2/740 \times 10^3$	۰/۰۰۰**
نوع × مقدار نانوذرات	۳/۳۷۷	۹	۰/۳۷۵	۲۴/۵۱۹	۰/۰۰۰**
خطا	۰/۴۹۰	۳۲	۰/۰۱۵		
کل	۳۷۲/۲۲۲	۴۷			

** - معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($p < 0.01$)



شکل ۳. تأثیر نوع و مقدار نانوذرات مختلف بر سختی نمونه‌های مورد مطالعه

۳-۴. خواص مکانیکی

به‌طور کلی خواص مکانیکی چندسازه‌ها به عوامل زیادی از قبیل: نسبت جزء تقویت‌کننده به ماده زمینه پلیمری، چگونگی پخش (همگن یا ناهمگن) جزء تقویت‌کننده در ماده زمینه، و چسبندگی جزء تقویت‌کننده با ماده زمینه در فصل مشترک (سطح اتصال) آنها وابسته است. از نظر فنی، جزء تقویت‌کننده دارای خواص مکانیکی بالاتر و بهتری نسبت به ماده زمینه است. در واقع قسمت اعظم نیرو توسط فاز تقویت‌کننده تحمل می‌شود و ماده زمینه پلیمری ضمن حفاظت تقویت‌کننده از صدمات فیزیکی و شیمیایی، کار انتقال نیرو به آن را انجام می‌دهد. همچنین ماده زمینه، جزء تقویت‌کننده را به مانند یک چسب کنار هم نگه می‌دارد و البته گسترش ترک را محدود می‌کند. ضریب کشسان ماده زمینه پلیمری باید از جزء تقویت‌کننده پایین‌تر باشد تا اتصال قوی بین این

دو فاز ایجاد کند [۱۱-۱۰].

نتایج آماری حاصل از تجزیه واریانس نشان داد که تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر خواص مکانیکی چندسازه ساخته شده از پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی‌دار بوده است (جدول ۵). مقایسه اثر مقدار نانوذرات مختلف بر خواص مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استحکام مکانیکی نمونه‌ها با افزودن نانوذرات بهبود می‌یابد. به‌طور کلی اندازه ذرات جزء تقویت‌کننده نقش بسیار مهمی در تقویت ماده زمینه و به تبع آن افزایش استحکام مکانیکی چندسازه دارد [۱۶-۱۴]. از این‌رو استفاده از ذرات در ابعاد نانومتری به‌عنوان جزء تقویت‌کننده به‌دلیل داشتن مساحت سطح بیشتر در مقدار مساوی ذرات، سطح تماس بین ماده زمینه و فاز تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. در نتیجه فصل مشترک بین ماده زمینه و تقویت‌کننده افزایش یافته و انتقال تنش بین آنها بیشتر و بهتر انجام می‌شود و باعث افزایش استحکام مکانیکی چندسازه می‌شود. از طرف دیگر نتایج نشان داد تجمع و تراکم نانوذرات، و تشکیل توده‌های درهم‌رفته در مقادیر بالای اضافه شدن نانوذرات به ماده زمینه، موجب کاهش استحکام مکانیکی چندسازه می‌گردد [۳۰-۲۷]. همچنین نتایج نشان داد نانوسیلیس در مقایسه با نانولوله کربنی، نانوگرافن و نانورس استحکام مکانیکی بالاتری در چندسازه‌ها ایجاد کرده است. همان‌طور که گفته شد دلیل این مسئله را می‌توان به ساختار کریستالی و سخت ذرات نانوسیلیس، و همچنین داشتن سطح ویژه زیاد و فعال آن مرتبط دانست که منجر به برهمکنش بهتر در ناحیه فصل مشترک و انتقال مؤثر تنش و افزایش خواص مکانیکی در چندسازه می‌گردد [۳۷، ۳۹]. بیشترین مقدار استحکام مکانیکی در نمونه‌های دارای ۳ درصد نانوسیلیس مشاهده شد.

جدول ۵. تجزیه واریانس تأثیر نوع و مقدار نانوذرات بر خواص مکانیکی چندسازه پلی‌وینیل کلراید-آرد چوب

ویژگی	منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	مقدار F	سطح معنی‌داری
مقاومت خمشی	نوع نانوذرات	۲۴۱/۶۳۳	۳	۸۰/۵۴۴	$۱/۰۱۳ \times ۱۰^۴$	۰/۰۰۰**
	مقدار نانوذرات	۱۳۶/۴۷۵	۳	۴۵/۴۹۲	$۵/۷۲۱ \times ۱۰^۳$	۰/۰۰۰**
	نوع × مقدار نانوذرات	۳/۲۲۴	۹	۰/۶۵۸	۴۵/۰۴۱	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۲۵۴	۳۲	۰/۰۰۸		
	کل	۳۸۱/۵۸۶	۴۷			
مدول الاستیسیته خمشی	نوع نانوذرات	۲۸۹۸۳۵۵/۷۵۵	۳	۹۶۶۱۱۸/۵۸۵	$۵/۸۰۸ \times ۱۰^۳$	۰/۰۰۰**
	مقدار نانوذرات	۳۶۷۶۴۲/۵۱۳	۳	۱۲۲۵۴۷/۵۰۴	۷۳۶/۷۳۶	۰/۰۰۰**
	نوع × مقدار نانوذرات	۷۷۸۳۱/۹۸۳	۹	۸۶۴۷/۹۹۸	۵۱/۹۹۰	۰/۰۰۰**
	خطا	۵۳۳۲/۹۰۲	۳۲	۱۶۶/۳۴۱		
	کل	۳۳۴۹۱۵۳/۱۵۴	۴۷			
مقاومت کششی	نوع نانوذرات	۹۶/۵۰۴	۳	۳۲/۱۶۸	$۲/۵۹۷ \times ۱۰^۳$	۰/۰۰۰**
	مقدار نانوذرات	۶۱/۰۹۵	۳	۲۰/۳۶۵	$۱/۶۴۴ \times ۱۰^۳$	۰/۰۰۰**
	نوع × مقدار نانوذرات	۶/۹۲۴	۹	۰/۷۶۹	۶۲/۱۱۵	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۳۹۶	۳۲	۰/۰۱۲		
	کل	۱۶۴/۹۱۹	۴۷			
مدول الاستیسیته کششی	نوع نانوذرات	۴۳۷۲۹۹/۶۹۹	۳	۱۴۵۷۶۶/۵۶۶	$۷/۳۰۷ \times ۱۰^۶$	۰/۰۰۰**
	مقدار نانوذرات	۳۳۳۴۵۷/۴۲۱	۳	۱۱۱۱۵۲/۴۷۴	$۵/۵۷۲ \times ۱۰^۶$	۰/۰۰۰**
	نوع × مقدار نانوذرات	۱۹۶۰۹/۱۲۰	۹	۲۱۷۸/۷۹۱	$۱/۰۹۲ \times ۱۰^۵$	۰/۰۰۰**
	خطا	۰/۶۳۸	۳۲	۰/۰۲۰		
	کل	۷۹۰۳۶۶/۸۷۸	۴۷			

** - معنی‌دار در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < ۰/۰۱$)

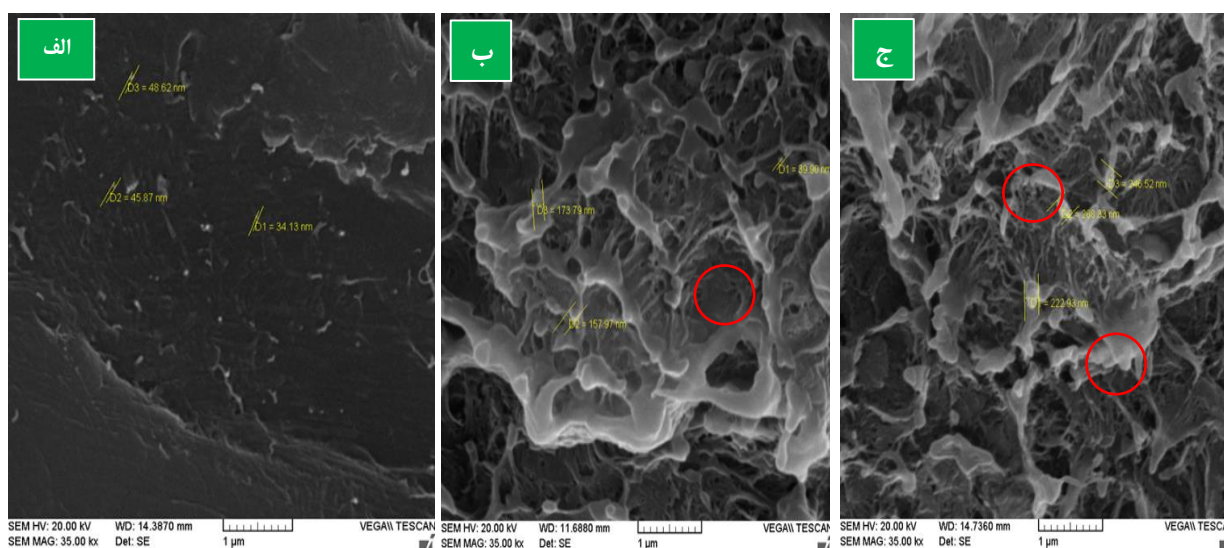
جدول ۶. تأثیر نوع و مقدار نانوذرات مختلف بر خواص مکانیکی نمونه‌های مورد مطالعه

مقاومت خمشی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته خمشی (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته کششی (مگاپاسکال)	نانوذرات (درصد)
۲۱/۳۶۳۶	۱۷۶۹/۸۴	۲۵/۷۱	۲۴۰۷/۹۱	نمونه شاهد
۲۴/۵۵ ^c	۲۰۸۷/۳۹ ^c	۲۹/۰۸ ^d	۲۵۳۸/۲۲ ^d	۱
۲۶/۶۱ ^b	۲۱۷۶/۳۵ ^b	۳۱/۱۵ ^c	۲۷۰۲/۴۹ ^c	۲
۲۸/۱۹ ^a	۲۲۷۶/۱۱ ^a	۳۳/۰۳ ^a	۲۸۱۵/۷۶ ^a	۳
۲۷/۴۸ ^{ab}	۲۲۰۸/۶۴ ^{ab}	۳۲/۴۸ ^b	۲۷۸۱/۵۰ ^b	۵
۲۶/۰۳ ^c	۲۲۰۵/۱۱ ^c	۳۰/۲۴ ^d	۲۶۷۰/۳۵ ^d	۱
۲۹/۲۱ ^b	۲۲۱۷/۴۷ ^b	۳۲/۶۱ ^c	۲۷۹۶/۸۲ ^c	۲
۳۱/۴۹ ^a	۲۳۰۹/۵۵ ^a	۳۴/۰۷ ^a	۲۹۰۴/۰۹ ^a	۳
۳۰/۵۹ ^{ab}	۲۲۸۱/۳۸ ^{ab}	۳۳/۲۹ ^b	۲۸۵۶/۳۷ ^b	۵
۳۰/۰۵ ^c	۲۶۰۸/۰۲ ^c	۳۴/۱۵ ^c	۲۸۵۲/۱۸ ^c	۱
۳۲/۱۱ ^b	۲۷۳۹/۵۸ ^b	۳۵/۰۷ ^b	۲۹۴۱/۳۳ ^b	۲
۳۴/۶۲ ^a	۲۸۶۶/۱۳ ^a	۳۶/۱۸ ^a	۳۰۷۹/۲۷ ^a	۳
۳۳/۴۱ ^{ab}	۲۸۰۸/۹۴ ^{ab}	۳۵/۷۶ ^{ab}	۳۰۱۵/۰۶ ^{ab}	۵
۲۸/۷۶ ^d	۲۴۵۷/۲۱ ^d	۳۲/۶۵ ^c	۲۷۸۸/۴۲ ^c	۱
۳۱/۱۲ ^c	۲۵۸۳/۴۴ ^c	۳۳/۸۷ ^b	۲۸۴۷/۰۹ ^b	۲
۳۳/۰۸ ^a	۲۷۸۶/۷۳ ^a	۳۴/۶۲ ^a	۲۹۳۱/۱۵ ^a	۳
۳۲/۳۹ ^b	۲۷۲۳/۰۱ ^b	۳۴/۲۳ ^{ab}	۲۹۱۰/۸۸ ^{ab}	۵

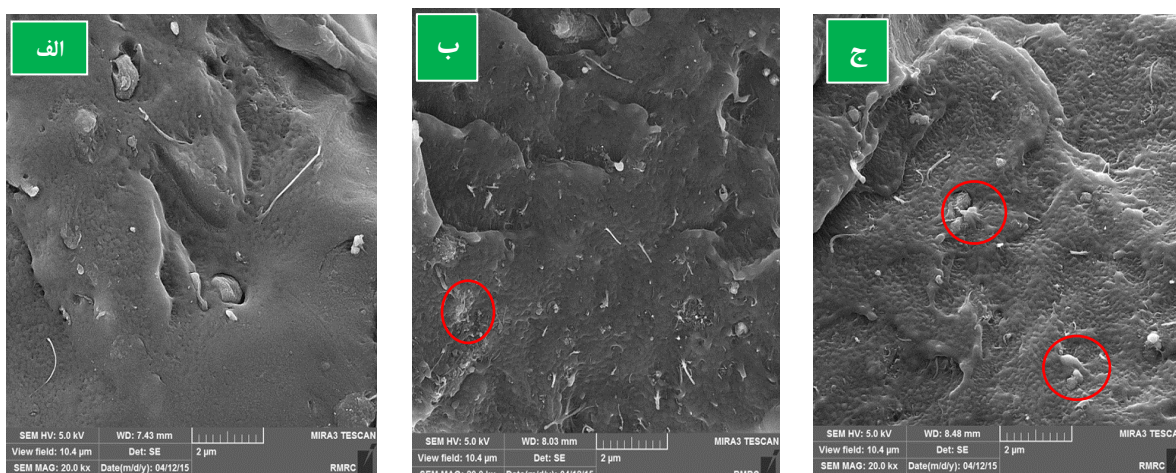
گروه‌هایی که در ستون‌ها با حروف یکسان مشخص شده‌اند، نشان می‌دهند که براساس آزمون دانکن هیچ تفاوت آماری در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($P < 0.01$) بین نمونه‌ها وجود ندارد.

۳-۵. ریخت‌شناسی

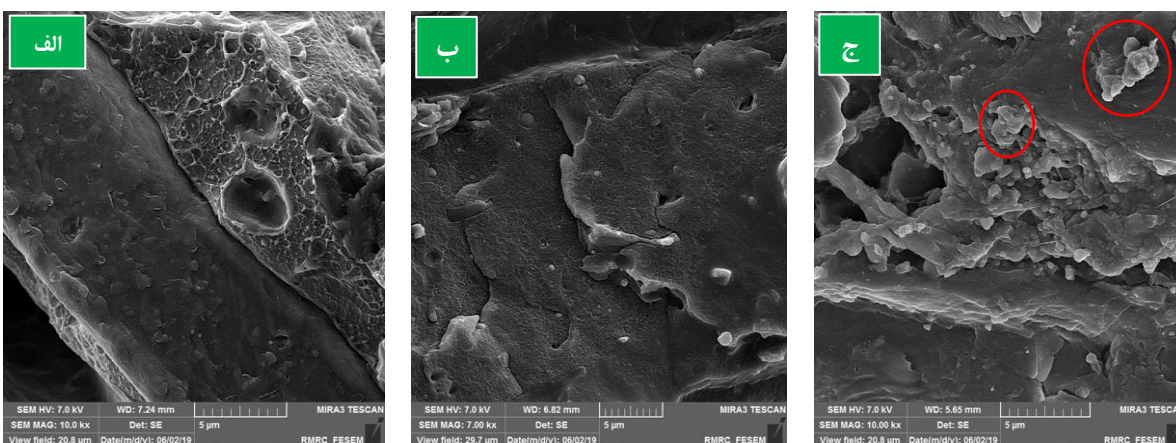
شکل‌های ۴ تا ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های مورد مطالعه دارای مقادیر مختلف نانوذرات را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که نانوذرات به‌صورت نسبتاً یکنواخت و همگن در ساختار چندسازه پراکنش یافته‌اند، اما با افزایش مقدار نانوذرات تا سطح ۵ درصد میزان پراکنش نایک‌نواخت، و تشکیل توده‌های درهم‌رفته (کلوخه‌ای شدن) افزایش می‌یابد. تجمع نانوذرات در تصاویر میکروسکوپی با دایره قرمز رنگ مشخص شده است.



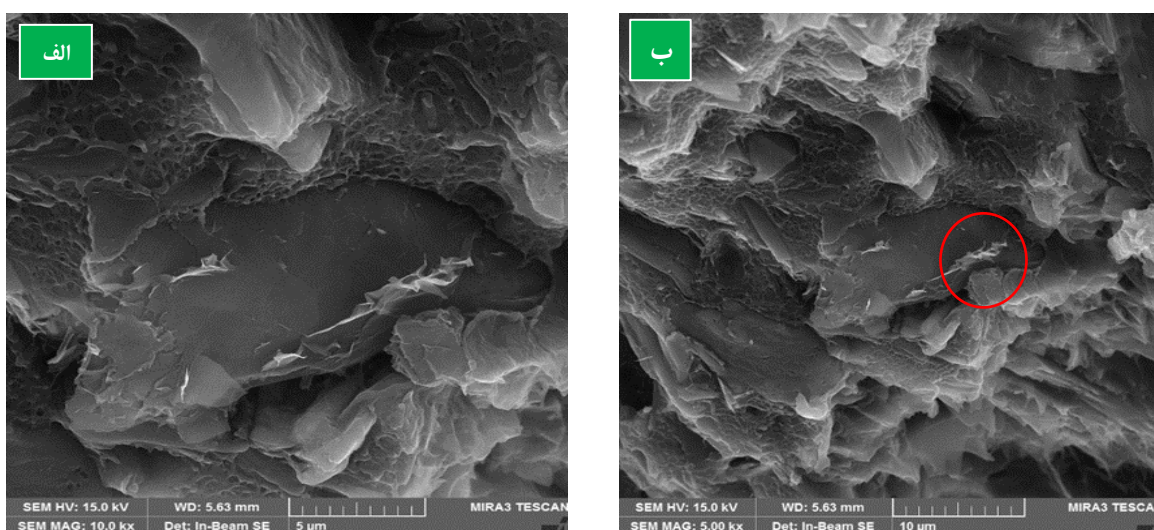
شکل ۴. میکروگراف FE-SEM نمونه‌های حاوی (الف) ۱ درصد نانورس، (ب) ۳ درصد نانورس و (ج) ۵ درصد نانورس



شکل ۵. میکروگراف FE-SEM نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانولوله کربنی، (ب) ۳ درصد نانولوله کربنی، و (ج) ۵ درصد نانولوله کربنی



شکل ۶. میکروگراف FE-SEM نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوسیلیس، (ب) ۳ درصد نانوسیلیس، و (ج) ۵ درصد نانوسیلیس



شکل ۷. میکروگراف FE-SEM نمونه‌های حاوی ۱ درصد نانوغرافن، و (ب) ۵ درصد نانوغرافن

۴. نتیجه گیری

در این تحقیق اثر نانوذرات مختلف شامل نانورس، نانولوله کربنی، نانوسیلیس و نانوگرافن در مقادیر مختلف وزنی (۱، ۲، ۳ و ۵ درصد وزنی) بر خواص سایشی و مکانیکی چندسازه ساخته شده از پلی وینیل کلراید-آرد چوب مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد وجود نانوذرات موجب بهبود رفتار سایشی چندسازه از طریق کاهش نرخ سایش و افزایش ضریب اصطکاک آن می شود. همچنین، در هنگام استفاده از نانوذرات در مقادیر زیاد (۵ درصد وزنی)، خواص سایشی نمونه ها کاهش می یابد. کمترین مقدار کاهش وزن به ترتیب در نمونه های حاوی نانوسیلیس، نانوگرافن، نانولوله کربنی و نانورس برابر ۰/۱۱، ۰/۱۴، ۰/۱۹ و ۰/۲۲ گرم در سطح بارگذاری ۳ درصد مشاهده شد. مقدار کاهش وزن در نمونه های شاهد معادل ۰/۳۳ گرم گزارش شد. یافته های حاصل از ارزیابی سختی و استحکام مکانیکی (مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته خمشی، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته کششی) نشان داد که بیشترین مقدار این ویژگی ها در چندسازه های حاصل از اختلاط با ۳ درصد نانوسیلیس به دست آمد. تصاویر میکروگراف های الکترونی (FE-SEM) نشان داد که نانوذرات به طور همگن و مناسب در نمونه ها پراکنش یافته اند، اما با افزایش مقدار نانوذرات تا سطح ۵ درصد، پراکنش نامناسب و تجمع ذرات اتفاق می افتد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی پژوهشگاه استاندارد در قالب طرح پژوهشی (شناسه طرح ۱۴۰۰۱۴۶) اجراء شده است. نویسندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از معاونت پژوهشی و فناوری پژوهشگاه استاندارد اعلام می دارند.

۵. منابع

- [1] Escobar Nunez, E., Gheisari, R. & Polycarpou, A.A. (2019). Tribology review of blended bulk polymers and their coatings for high-load bearing applications. *Tribology International*, 129(3), 92-111.
- [2] Liskiewicz, T., Sherrington, I., Khan, T. & Liu, Y. (2023). Advances in sensing for real-time monitoring of tribological parameters. *Tribology International*, 189(10), 108965-108983.
- [3] Presilla, R., Wandel, S., Stammeler, M., Grebe, M., Poll, G. & Glavatskih, S. (2023). Oscillating rolling element bearings: A review of tribological testing and analysis approaches. *Tribology International*, 188(9), 108805-108827.
- [4] Aldousiri, B., Shalwan, A. & Chin, C.W. (2013). A review on tribological behavior of polymeric composites and future reinforcements. *Advances in Materials Science and Engineering*, 9(1), 48-54.
- [5] Li, B., Li, P., Zhou, R., Feng, X.O. & Zhou, K. (2022). Contact mechanics in tribological and contact damage-related problems: A review. *Tribology International*, 171, 107534-107545.
- [6] Xue, Q.J & Wang, Q.H. (1997). Wear mechanisms of polyetheretherketone composites filled with various kinds of SiC. *Wear*, 213(1-2), 54-58.
- [7] Chattopadhyay, R. (2004). *Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Processes*, New York, Springer, 375.
- [8] Rabinowicz, E. (2013). *Friction and Wear of Materials* (2nd Edition), New York, Wiley, 336.
- [9] George, S.C., Thomas, S., Sarath, P.S., Haponiuk, J.T. & Reghunath R. (2023). *Tribology of Polymers, Polymer Composites, and Polymer Nanocomposites*, Elsevier, 482.
- [10] Klyosov, A.A. (2007). *Wood-Plastic Composites*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, USA, 702.
- [11] Oksman, K. & Sain, M. (2008). *Wood-Polymer Composites*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, 384.
- [12] Li, X., Tabil, L.G. & Panigrahi, S. (2007). Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber reinforced composites: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 15(1), 25-33.
- [13] Susheel, K., Kaith, B.S. & Inderjeet, K. (2009). Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites: A review. *Polymer Engineering & Science*, 49(2), 1253-1272

- [14] Tjong, S.C. (2006). Structural and mechanical properties of polymer nanocomposites. *Journal of Material Science Engineering*, 53(3-4), 73-197.
- [15] Viswanathan, V., Laha, T., Balani, K., Agarwal, A. & Seal, S. (2006). Challenges and advances in nanocomposites processing techniques; A review. *Journal of Material Science Engineering*, 54(5-6), 121-285.
- [16] Dufresne, A., Thomas, S. & Pothan L.A. (2013). Biopolymer Nanocomposites Processing, Properties, and Applications. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 684.
- [17] Umar Nirmal, U., Hashim, J. & Megat Ahmad, M.H. (2015). A review on tribological performance of natural fiber polymeric composites. *Tribology International*, 83(8), 77-104.
- [18] Omrani, E., Menezes, P.L. & Rohatgi, P.K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 717-736.
- [19] Jan, P., Matkovi, S., Bek, M., Perse, S.L. & Kalin, M. (2023). Tribological behavior of green wood-based unrecycled and recycled polypropylene composites. *Wear*, (524-525).
- [20] Rafiq Bhat, A., Kumar, R. & Kumar Mural, P.S. (2023). Natural fiber reinforced polymer composites: A comprehensive review of tribo-mechanical properties. *Tribology International*, 189(6), 108978-108990.
- [21] Hashmi, S.A.R., Dwivedi, U.K. & Chand, N. (2007). Graphite modified cotton fiber reinforced polyester composites under sliding wear conditions. *Wear*, 262(11-12), 1426-1432,
- [22] Hamdan, Abdul, S.M., Idrus, M., Rahman, R. Ibrahim, N.F. & Islam, S. (2010). Wear of wood polymer composite for journal bearing materials. *Wood Research Journal*, 1(1), 22-26.
- [23] Kaymakci, A., Ayrilmis, N. & Gulec, T. (2013). Surface properties and hardness of polypropylene composites filled with sunflower stalk flour. *BioResources*, 8(1), 592-602.
- [24] Shakuntala, O., Raghavendra, G. & Samir Kumar, A. (2014). Effect of filler loading on mechanical and tribological properties of wood apple shell reinforced epoxy composite. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2(1), 70-79.
- [25] Jiang, L., He, C., Li, X. & Fu, J. (2018). Wear properties of wood-plastic composites pretreated with a stearic acid-palmitic acid mixture before exposure to degradative water conditions. *BioResources*, 13(2), 3817-3831.
- [26] Ibrahim, M.A., Hirayama, T. & Khalaf, D. (2019). An investigation into the tribological properties of wood flour reinforced polypropylene composites. *Materials Research Express*, 7(1), 153-165.
- [27] Amir Hooman Hemmasi, A.H., Khademi-Eslam, H., Talaiepoor, M., Kord, B. & Ghasemi, I. (2010). Effect of nanoclay on the mechanical and morphological properties of wood polymer nanocomposite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(7), 964-971.
- [28] Ashori, A., Sheshmani, S. & Farhani, F. (2013). Preparation and characterization of bagasse/HDPE composites using multi-walled carbon nanotubes. *Carbohydrate Polymer*, 92(1): 865-871.
- [29] Chaharmahali, M., Ebrahimi, G.H., Hamzeh, Y., Ashori, A. & Ghasemi, I. (2014). Effects of nanographene on the physico-mechanical properties of bagasse/polypropylene composites. *Polymer Bulletin*, 71: 337-349.
- [30] Mohseni-Tabar, M., Tabarsa, T., Mashkour, M. & Khazaeian, A. (2015). Using silicon dioxide (SiO₂) nano-powder as reinforcement for walnut shell flour/HDPE composite materials. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 12(1), 15-21.
- [30] Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, Annual Book of ASTM Standard, G99, 2010.
- [32] Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness, Annual Book of ASTM Standard, D2240, 2015.
- [33] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D638, 2014.
- [34] Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, Annual Book of ASTM Standard, D790, 2017.
- [35] Xian, G., Walter, R. & Hupert, F. (2006). Friction and wear of epoxy/TiO₂ nanocomposites: Influence of additional short carbon fibers, aramid and PTFE particles. *Composites Science and Technology*, 66(16), 3199-3209.

- [36] Meng, H., Xie, G.Y. & Yang, R. (2009). Friction and wear behavior of carbon nanotubes reinforced polyamide 6 composites under dry sliding and water lubricated condition. *Composites Science and Technology*, 69(5), 606-611.
- [37] Zhenhua, L. (2012). The friction and wear properties of nano-SiO₂ and TiO₂ particle reinforced PMMA composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(6), 793-800.
- [38] Cui, L.J., Geng, H.Z., Wang, W.J., Chen, L.T. & Gao, J. (2013). Functionalization of multi-wall carbon nanotubes to reduce the coefficient of the friction and improve the wear resistance of multi-wall carbon nanotube/epoxy composites. *Carbon*, 54(3), 277-282.
- [39] Sheykh, M.J., Tarmian, A., Doosthoseini, K. & Abdulkhani, A. (2017). Wear resistance and friction coefficient of nano-SiO₂ and ash-filled HDPE/lignocellulosic fiber composites. *Polymer Bulletin*, 74(11), 4537-4547.
- [40] Soni, A., Kumar Das, P. & Kumar Gupta, S. (2024). Experimental investigations on the influence of natural reinforcements on tribological performance of sustainable nanocomposites: A comparative study with polymer technology. *Tribology International*, 191(1), 109195-109202.
- [41] Ul Ain, Q., Wani, M.F., Sehgal, R. & Singh, M.K. (2024). Tribological and mechanical characterization of carbon-nanostructures based PEEK nanocomposites under extreme conditions for advanced bearings: A molecular dynamics study. *Tribology International*, 196(11), 109702-109711.
- [42] Solodov, A.N., Balkaev, A.D., Shayimova, J.R., Vakhitov, R. & Gataullina, R.M. (2024). Enhanced wear resistance and mechanical properties of epoxy nanocomposites through surface-concentrated magnetic and luminescent graphene oxide. *Tribology International*, 204(5), 110504-110516.