



سنتر و ارزیابی نانوکامپوزیت هیبریدی سیلیکا-گرافن جهت بهبود

همزمان مقاومت سایشی و کاهش مقاومت غلشی در آج نایر

معین وفایی (کارشناس تحقیقات) / محمد ابهچی (کارشناس تحقیقات) / لیلا قائیدی (کارشناس تحقیقات)

محسن غفریان (کارشناس تحقیقات) / الهام رضایی نژاد (رئیس تحقیقات)

vafaeimoein23@gmail.com-09308345397

۲. بخش تجربی

۲-۱. **مسواود و روش هسا:** الاستومتر پایه‌س مورد استفاده در این تحقیق پلی‌استاتین بوتادین (SBR-1502) تولید شرکت پتروشیمی بندرامام بود. نانولوله‌های سیلیس مخلخل (MSNTs) با قطر خارجی ۸۰-۵۰ نانومتر و سطح ویژه $700 \text{ m}^2/\text{g}$ از شرکت نسامواد پیشرفته تهیه شد. اکسید گرافن (GO) نیز از شرکت نسافوزوش خریداری و در آزمایشگاه تحت فرآیند کاهش شیمیایی با استفاده از هیدرازین هیدرات به RGO تبدیل گردید. عامل کپولان سیلیلی مورد استفاده، Bis-(y-triethoxysilylpropyl)-disulfide (TESPD) بود.

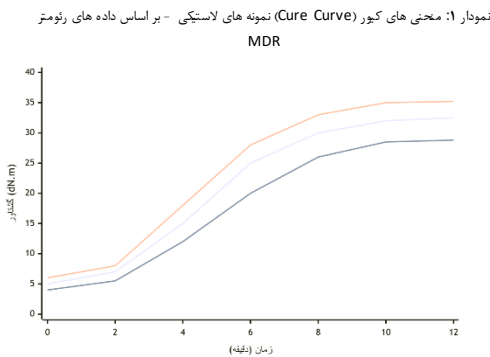
۲-۲. **سنسنتز نانوکامپوزیت:** ابتدا نانولوله‌های سیلیس مخلخل در محلول اتانولی حاوی ۵ درصد وزنی عامل کپولان TESPD به مدت ۲ ساعت تحت اولتراسوند (با توان ۲۰۰ وات) قرار گرفتند تا عملیات عامل‌دار شدن سطح انجام پذیرد. در مرحله سوازی، سوسپانسیون اکسید گرافن در آب مقطر تحت کاهش شیمیایی قرار گرفت تا به اکسید گرافن کاهش یافته (RGO) تبدیل شود. سپس مقادیر طراحی‌شده از MSNT‌های عامل‌دار شده و RGO (با نسبت‌های ۵/۱۵، ۵/۲۰ و ۵/۲۵ قسمت در صد وزنی به همراه الاستومتر SBR و سایر افزودنی‌های متعارف در یک مخلوط‌کن داخلی با ظرفیت ۳۰۰ سیسی و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و سرعت ۶۰ دور بر دقیقه مخلوط شدند. اختلاط در هشت مرحله و با کل زمان ۱۲ دقیقه انجام پذیرفته است. نمونه‌های خام پس از اختلاط، بسر روی پیک غلشک Laboratory Mill دو غلشک و در نهایت در پیک پرس هیدرولیک در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد و تحت فشار ۱۵۰ بار و به مدت زمان پهنه شده برای ولکانیزاسیون (۹۰) قالب‌گیری شدند.

۲-۳. **روش ههای مشخصه‌یابی:** مورفولوژی و نحوه پراکندگی نانوذرات در ماتریس پلیمری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM, Philips CM120) مورد بررسی قرار گرفت. آزمون‌های نانولوزی دینامیکی بسر روی نمونه‌های ولکانیزه شده توسط دستگاه رنومتر دیسکی-دیسکی (RPA 2000, Alpha Technologies) در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه کرنش ۷٪ انجام شد. مقاومت سایشی نمونه‌ها مطابق با استاندارد DIN 53516 و بسا استفاده از دستگاه سایش (Zwick Abrasion Tester) ارزیابی گردید. خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، ازدیاد طول و مدول ۱۰۰٪.

۳۰۰٪ مطابق با استاندارد ASTM D412 اندازه‌گیری شد.

جدول ۱: فرمولاسیون ترکیبات بر اساس قسمت در صد وزنی (phr)

اجزاء	نمونه شاهد (C-Black)	MSNT نمونه	MSNT (RGO) نمونه هیبریدی
SBR-1502	100	100	100
N234 آبرین فلک	50	-	-
MSNT سلیسول سیلیس	-	15	15
GO (اکسید گرافن کاهش یافته)	-	-	5
دانه DBAE	10	10	10
اکسید سیلیس (RGO)	3	3	3
استاندارد اسید	2	2	2
PPPD آنتی‌اکسیدان	1	1	1
تثاوبه (TBB)	1.5	1.5	1.5
توانره	1.8	1.8	1.8
TESPD عامل کپولان	-	1.2	2.5



براساس نمودار ۱ نمونه هیبریدی اگرچه کمترین ولکانیزه می‌شود، اما در نهایت شبکه متراکم‌تر و مستحکم‌تری را تشکیل می‌دهد که منجر به خواص مکانیکی و دینامیکی برتر می‌شود. این نمودار به طور کامل منطبق برتری نمونه هیبریدی را از منظر فرآیند پخت تایید می‌کند.

جدول ۲: داده‌های خواص فیزیکی-مکانیکی (پس از ولکانیزاسیون)

نمونه هیبریدی (MSNT+RGO)	MSNT نمونه	نمونه شاهد (C-Black)	استاندارد	اِمون
75.8 ± 1.1	18.2 ± 0.9	7.8 ± 1.7	ASTM D412	تقویت‌کننده (Tensile Strength), MPa
91 ± 15	78.0 ± 15	75.0 ± 20	ASTM D412	ازدیاد طول تا پارگی (Elongation at Break), %
2.2 ± 0.2	1.8 ± 0.1	2.1 ± 0.1	ASTM D412	مدول (Modulus @100%), MPa
17.2 ± 0.6	8.9 ± 0.4	1.5 ± 0.5	ASTM D412	مدول (Modulus @300%), MPa
67 ± 1	21 ± 2	25 ± 2	ASTM D2240	سختی (Hardness, Shore A)

بر اساس داده‌های جدول ۲ نمونه هیبریدی MSNT/RGO با ایجاد تعادل مطلوب بین استحکام و انعطاف‌پذیری، به‌طور همزمان استحکام کششی (75.8 MPa)، ازدیاد طول (91%) و مدول (2.2 MPa) در 300% (در مقایسه با نمونه‌های شاهد و MSNT خالص بهبود بخشیده است. این بهبود یکپارچه، نشان‌دهنده ایجاد پیوندهای مؤثر در سطح مشترک و تشکیل شبکه نانوساختاری تقویت‌شده در ماتریس پلیمری است.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. **مورفولوژی:** تصاویر TEM گرفته‌شده از نمونه پهنه‌ساخته MSNT 15phr/RGO 5phr) پراکندگی نسبتاً همگن نانولوله‌های سیلیس و صفحات RGO را در ماتریس پلیمری نشان داد. استفاده از عامل کپولان TESPD به وضوح منجر به کاهش قابل توجهی در نیروی کشش نانوذرات شده بود. صفحات RGO عمدتاً در فضای بین نانولوله‌ها قرار گرفته و یک شبکه ناهمگن اما به هم پیوسته را تشکیل داده بودند که می‌تواند نقش بسزایی در انتقال مؤثر تنش و کاهش تمرکز تنش داشته باشد.

۳-۲. **خواص دینامیکی-مکانیکی:** آنالیز داده‌های حاصل از RPA نشان داد که نمونه هیبریدی (MSNT 15phr/RGO 5phr) در مقایسه با نمونه‌های حاوی تنها MSNT با کرنش بلک، کمترین مقدار $\tan \delta$ را در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد (0.08) در مقابل 0.15 نمونه شاهد) از خود نشان می‌دهد. این کاهش $\tan \delta$ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، به بررسی اثر سینتریک نانوذرات هیبریدی متشکل از نانولوله‌های سیلیس مخلخل (MSNTs) و اکسید گرافن کاهش‌یافته (RGO) پرداخته است. جهت دستیابی به پراکندگی پهنه و ایجاد پیوند شیمیایی قوی در سطح مشترک، از یک عامل کپولان سیلیلی دو عاملی (Bis-(y-triethoxysilylpropyl)-disulfide) بهره گرفته شد. نتایج حاصل از آنالیزهای رنولوزی دینامیکی (RPA) کاهش چشمگیر $\tan \delta$ در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد را برای نمونه پهنه‌ساخته حاوی ۱۵ قسمت در صد وزنی MSNT و ۵ قسمت در صد وزنی RGO، در مقایسه با نمونه شاهد مبتنی بر کرنش بلک N234 نشان داد که حاکی از کاهش قابل توجه مقاومت غلشی است. شایان ذکر است که این بهبود با افزایش ۲۰ درصدی شاخص مقاومت سایشی در آزمون استاندارد DIN همراه بود. بررسی‌های میکروسکوپی (TEM) تشکیل یک شبکه ناهمگن و پراکندگی یکپارچه نانوذرات را تأیید نمود. مکانیزم عملکرد به تشکیل یک شبکه نانوساختاری پایدار نسبت داده می‌شود که در آن MSNT‌ها با ایجاد قفل و بست مکانیکی، استحکام و پایداری حرارتی را افزایش داده و صفحات RGO از طریق کاهش اصطکاک داخلی، انحراف انرژی را به حداقل می‌رسانند. این استراتژی فرمولاسیون، گامی مؤثر در راستای توسعه تایرهای نسل آینده با کارایی سوخت برتر و طول عمر بالاتر محسوب می‌شود.

واژه ههای کلیدی: نانوکامپوزیت هیبریدی، مقاومت غلشی، مقاومت سایشی مجور مقاله : مواد اولیه و آموه سازی

۱. مقدمه:

امروزه با تشدید مقررات زیست‌محیطی و تمایل به کاهش مصرف سوخت در صنعت حمل و نقل، بهبود کارایی تایرها به یک اولویت استراتژیک تبدیل شده است. مقاومت غلشی، به عنوان یکی از عوامل اصلی تلفات انرژی [۱]، سهم قابل توجهی در مصرف سوخت خودروها دارد. از سوی دیگر، مقاومت سایشی ضعیف نه تنها منجر به کاهش عمر مفید تایر می‌گردد، بلکه به عنوان یک منبع انتشار ذرات ریز لاستیک و به عنوان یک آلاینده نوظهور زیست‌محیطی شناخته می‌شود [۲]. برکننده‌های مرسوم از جمله کرنش بلک اگرچه مقاومت سایشی مطلوبی ایجاد می‌کنند، اما به دلیل ماهیت هدایت‌کنندگی حرارتی و ساختار کروی شکل خود، منجر به افزایش تلفات هیستریزس و در نتیجه مقاومت غلشی بسالا می‌شوند [۳]. از این رو، رویکردهای نوین به سمت استفاده از نسامواد مهندسی‌شده با قابلیت تعدیل این رابطه معکوس معطوف شده است.

در این میان، نانولوله‌های سیلیس مخلخل، به دلیل بار بون سطح ویژه بسیار بسالا، ساختار لوله‌ای توخالی و پایداری حرارتی برجسته، پتشیل بسالایی برای بهبود خواص مکانیکی و ایجاد پیوندهای قوی بسا ماتریس پلیمری از خود نشان می‌دهند [۴]. در مقابل، اکسید گرافن کاهش یافته و بسا دارا بساختار دویمعدی، مدول الاستیسیته بسالا و هدایت حرارتی استثنایی، می‌تواند بسا کاهش اصطکاک بین زنجیره‌های پلیمری، نقش یک روان‌ساز جامد را ایفا نموده و تلفات مکانیکی را کاهش دهد [۵]. بسا این وجود، چالش اصلی در استفاده از این نسامواد، دستیابی به پراکندگی همگن در بسنتر پلیمری و جلوگیری از تجمع آن‌ها به دلیل نیروهای ولندوالسی قوی است. استفاده از عوامل کپولان مناسب می‌تواند بسا ایجاد بل‌های شیمیایی بین فاز برکنده و ماتریس، بر این چالش غلبه نماید.

این پژوهش با نگاهی نو، به بررسی اثر هم‌افزایی ناشی از ترکیب این دو نساماده در یک سیستم هیبریدی و بسا بهره‌گیری از یک عامل کپولان دو عاملی می‌پردازد. هدف نهایی، طراحی و به‌ساختاری یک نانوکامپوزیت لاستیکی است که بتواند به‌طور همزمان به هر دو منحصه متضاد، یعنی مقاومت سایشی برتر و مقاومت غلشی بسیار پایین، دست یابد.