

از مس تا گرافن: مسیر تحول مواد هادی و عایقی در کابل های قدرت

مجید میرزایی^{*}، عباس فیضی نیا، یاسر قربانی امیر

گروه مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران.

چکیده: مس به عنوان هادی غالب در کابل های قدرت، با محدودیت هایی نظیر چگالی بالا، افت هدایت در دماهای کاری زیاد و محدودیت های مکانیکی روبه رو است که توسعه کابل های با بازده بالاتر را محدود می کند. این مقاله با رویکردی تحلیلی-مروری، نقش گرافن را به عنوان یک نانوماده دوبعدی پیشرفته در ارتقای هم زمان عملکرد الکتریکی، مکانیکی و عایقی کابل های قدرت بررسی می کند. نوآوری اصلی این مطالعه، ارائه یک چارچوب یکپارچه از کاربرد گرافن در سه بخش کلیدی کابل شامل هادی های کامپوزیتی مس-گرافن، لایه های نیمه هادی حفاظتی و عایق های پلیمری اصلاح شده با گرافن است. نتایج مطالعات مرور شده نشان می دهد که افزودن مقادیر بسیار کم گرافن می تواند رسانایی هادی ها را به بیش از ۱۰۰٪ استاندارد بین المللی مس آنیل شده افزایش دهد، استحکام مکانیکی را بهبود بخشد و هم زمان پدیده هایی نظیر تجمع بار فضایی و رشد درختچه های آبی در عایق های پلیمری را مهار کند. علاوه بر این، نقش گرافن در یکنواخت سازی میدان الکتریکی، کاهش تخلیه های جزئی و افزایش قابلیت اطمینان کابل های HVDC مورد تأکید قرار گرفته است. در پایان، چالش های مقیاس پذیری، یکنواخت سازی توزیع گرافن و الزامات صنعتی سازی مورد بحث قرار گرفته و مسیرهای پژوهشی آینده برای توسعه کابل های نسل بعدی با عملکرد بالا ترسیم شده است.

واژگان کلیدی: گرافن، کابل های قدرت، کامپوزیت مس-گرافن، پلی اتیلن شبکه ای، مواد رسانا و عایق پیشرفته.

mjmirzaei@nri.ac.ir

ظرفیت تولید، شکاف فناوریانه میان تولیدکنندگان این حوزه و کشورهای صنعتی پیشرفته همچنان محسوس است. یکنواختی بالای محصولات، وابستگی به مواد سنتی و تمرکز اندک بر نوآوری، موجب رقابت شدید قیمتی و کاهش بهره وری فناوری در این صنعت شده است. در عین حال، گسترش حوزه های نوین مهندسی برق از جمله سامانه های انتقال توان فوق العاده بالا، تجهیزات هوافضا، خودروهای برقی و شبکه های هوشمند نیازهای تازه ای را برای عملکرد مواد رسانا و عایق ایجاد کرده است [۱]. مواد متداولی چون مس و آلومینیوم، که دهه ها است در تولید هادی ها و کابل ها مورد استفاده اند، عملاً به مرزهای پایان عملکرد خود رسیده اند [۲]. در سوی دیگر، مواد عایق و حفاظتی

۱- مقدمه

صنعت سیم و کابل، به عنوان یکی از ارکان حیاتی زنجیره تأمین انرژی و داده، نقشی تعیین کننده در عملکرد پایدار زیرساخت های صنعتی و شهری دارد. این صنعت با تأمین بستر انتقال توان الکتریکی و اطلاعات، از اجزای بنیادین توسعه فناوری های نوین و اقتصاد جهانی به شمار می رود [۱]. در سال های اخیر، با رشد تقاضا برای انتقال توان بالا و ارتباطات پرسرعت، بازار جهانی سیم و کابل به ویژه در کشورهای در حال توسعه، گسترش چشمگیری را تجربه کرده است. با این حال، علی رغم افزایش

که نقش گرافن را در کل ساختار کابل‌های قدرت، با تمرکز بر عملکرد الکتریکی، مکانیکی و دوام کاری، مورد ارزیابی قرار دهد، به‌وضوح احساس می‌شود. مقاله حاضر با هدف پاسخ به این نیاز و ترسیم مسیرهای کاربردی برای توسعه کابل‌های گرافنی نسل آینده تدوین شده است.

۲- بهینه‌سازی ویژگی‌های گرافن

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی منتخب مس، گرافن و نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهد. گرافن با هدایت الکتریکی ویژه بسیار بالا، وزن کم و استحکام مکانیکی برجسته، نسبت به فلزات مرسوم مانند مس و آلومینیوم عملکرد قابل توجهی دارد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای بر ترکیب گرافن با مس و سایر فلزات انجام شده است تا ویژگی‌های فیزیکی آن بهینه شده و خصوصیات عملکردی آن در کاربردهای مختلف، به ویژه در حوزه‌های انتقال انرژی و صنایع الکترونیکی، ارتقا یابد. این تحقیقات پتانسیل بالای گرافن را برای جایگزینی یا بهبود مواد هادی سنتی و ایجاد نسل جدیدی از کامپوزیت‌های فلز-نانومواد نشان می‌دهد [۷، ۸].

جدول ۱. ویژگی‌های منتخب مس، آلومینیوم و گرافن [۷، ۸].

ویژگی	مس	آلومینیوم	نانولوله کربنی	گرافن
رسانایی الکتریکی (MS/m)	۵۹/۶	۳۷	۳۰۰	۶۰۰۰
استحکام کششی (MPa)	-۲۰۰	-۶۰	-۱۱۰۰۰	۱۳۰۰۰۰
هدایت حرارتی (W/m °K)	۴۰۰	۲۰۰	۴۵۰۰۰	-۴۰۰۰
			۳۰۰۰	۷۰۰۰

۲-۱ ویژگی‌های مکانیکی

گرافن از نظر خواص مکانیکی، استحکام و پایداری بسیار بالایی دارد. این ویژگی‌ها ناشی از انرژی پیوند بسیار قوی C-C و ساختار منحصربه‌فرد حلقه‌های شش‌ضلعی در شبکه کریستالی آن است. لی و همکاران ویژگی‌های مکانیکی یک لایه کامل گرافن را به‌صورت تجربی اندازه‌گیری کردند و نشان دادند که مدول کشسانی نظری گرافن حدود ۱/۰۲ تراپاسکال (TPa) و استحکام شکست آن حدود ۱۳۰ گیگاپاسکال (GPa) است، که تقریباً ۱۰۰ برابر بیشتر از فولاد با استحکام بالا است [۹، ۱۰]. با این حال،

نیز باید در برابر دما، تابش، خوردگی و تداخلات الکترومغناطیسی مقاومت بیشتری از خود نشان دهند. بنابراین، توسعه‌ی مواد پیشرفته و به‌کارگیری فناوری‌های نوینی چون نانو ساختارها و کامپوزیت‌های پیشرفته، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای افزایش دوام، بازده و کارایی اقتصادی کابل‌ها به‌شمار می‌آید [۳]. در این میان، کشف ماده‌ای دوبعدی از کربن خالص به نام گرافن توسط گیم و نوُسِلوف در دانشگاه منچستر [۴]، چشم‌انداز جدیدی را در طراحی مواد رسانای پیشرفته گشود. ساختار شبکه‌ای منحصربه‌فرد گرافن، که با خواصی چون تحرک الکترونی بسیار بالا، رسانایی حرارتی بی‌نظیر، سطح ویژه زیاد، مدول یانگ بالا و تنش شکست قابل توجه شناخته می‌شود، آن را به گزینه‌ای بالقوه برای تحول در صنعت سیم و کابل بدل کرده است. افزون بر این، گرافن می‌تواند با تشکیل کامپوزیت‌های فلزی یا پلیمری، ویژگی‌های الکتریکی، حرارتی و مکانیکی مواد پایه را به‌طور هم‌زمان بهبود بخشد. مطالعات متعددی به بررسی روش‌های ترکیب گرافن با فلزات پرداخته‌اند. برای نمونه، فرآیند اصطکاکی هم‌زدنی به‌طور مؤثر موجب اختلاط گرافن با ماتریس‌های فلزی شده و امکان تولید کامپوزیت‌های فلز-گرافن با خواص بهبودیافته را فراهم کرده است. لیو و همکاران از این روش برای لایه‌برداری درجا از گرافیت و تولید کامپوزیت‌های توده‌ای گرافنی بهره گرفتند [۵]؛ فرآیندی که مراحل اضافی آماده‌سازی را حذف و از آلودگی‌های ناخواسته جلوگیری می‌کند. همچنین شارما و همکاران با استفاده از فرآیند نوآورانه‌ی اکستروژن هم‌زدنی جامد، موفق به تولید گرافن چندلایه درون آلیاژهای آلومینیوم شدند که بهبود قابل توجهی در استحکام مکانیکی آن‌ها ایجاد کرد [۶]. این پیشرفت‌ها، زمینه‌ساز تحولی بنیادین در طراحی نسل آینده مواد کابلی هستند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه مواد گرافنی، بخش عمده‌ای از مطالعات پیشین به بررسی اثر گرافن در اجزای منفرد کابل‌های قدرت، نظیر هادی‌های فلزی یا عایق‌های پلیمری، محدود شده‌اند. این در حالی است که عملکرد واقعی کابل به برهم‌کنش هم‌زمان میان هادی، لایه‌های نیمه‌هادی و عایق وابسته است. علاوه بر این، بسیاری از نتایج گزارش‌شده در مقیاس آزمایشگاهی باقی مانده و تحلیل جامعی از چالش‌های فرآیندی، مقیاس‌پذیری و انطباق با الزامات صنعتی ارائه نشده است. از این‌رو، نیاز به یک بررسی تحلیلی و یکپارچه

شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی نشان می‌دهد که افزایش تعداد لایه‌های گرافن موجب کاهش استحکام آن می‌شود؛ به‌طوری که در گرافن ده‌لایه، استحکام شکست نظری به حدود ۸۰ گیگاپاسکال کاهش می‌یابد [۱۱]. آزمایش‌های عملی روی گرافن تک‌لایه بدون تکیه‌گاه نیز نشان داد که استحکام کششی واقعی بین ۵۰ تا ۶۰ گیگاپاسکال است، که تقریباً نصف مقدار نظری آن است [۱۲]. با وجود کاهش نسبت به مقادیر نظری، گرافن در شرایط عملی همچنان از نظر مکانیکی بسیار مقاوم‌تر از فلزات مرسوم است [۱۳].

استحکام بالای گرافن کاربردهای عملی گسترده‌ای دارد. جایگزینی گرافن با فلزات سنتی در ساخت کابل‌ها و هادی‌ها می‌تواند موجب افزایش قابل توجه استحکام کششی و بهبود عملکرد مکانیکی شود. این ویژگی در حوزه‌هایی مانند صنایع هوافضا، خطوط انتقال فشارقوی، کابل‌های عملکرد بالا و تجهیزات نیروگاهی که تحمل فشارهای مکانیکی و حرارتی اهمیت حیاتی دارد، بسیار ارزشمند است. علاوه بر این، گرافن با وزن سبک و چگالی کم خود، امکان تولید مواد کامپوزیتی با نسبت استحکام به وزن بسیار بالا را فراهم می‌کند، که می‌تواند باعث کاهش وزن سازه‌ها و افزایش کارایی سیستم‌ها شود [۱۴، ۱۵].

از سوی دیگر، مطالعات اخیر نشان می‌دهد که ترکیب گرافن با فلزاتی مانند مس، نه تنها خواص مکانیکی بلکه خواص الکتریکی و حرارتی مواد را نیز بهبود می‌بخشد. این امر باعث می‌شود گرافن در تولید کابل‌ها و هادی‌های پیشرفته، گزینه‌ای ایده‌آل برای بهینه‌سازی عملکرد و افزایش دوام در شرایط عملیاتی سخت باشد [۱۶].

۲-۲- ویژگی‌های الکتریکی

ساختار شیمیایی منحصر به فرد گرافن، شامل شبکه‌ای از پیوندهای مزدوج π ، امکان حرکت آزاد الکترون‌های π در سطح صفحات گرافن را فراهم می‌کند. این ویژگی ذاتی باعث می‌شود گرافن دارای تحرک الکترونی بسیار بالا باشد؛ به‌طوری که مقدار آن تقریباً 2×10^5 سانتی‌متر مربع بر ولت‌ثانیه گزارش شده است، که بیش از ۶۰۰۰ برابر تحرک الکترونی مس، یکی از رساناترین فلزات سنتی، است. به همین دلیل، گرافن در دمای اتاق به‌عنوان

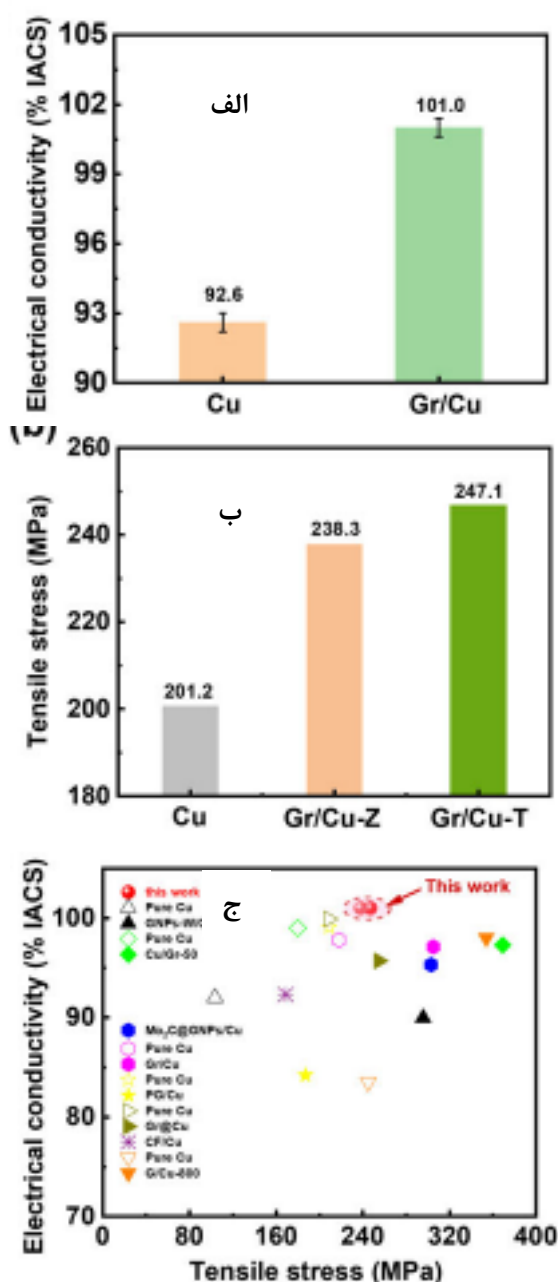
رساناترین ماده‌ی شناخته‌شده محسوب می‌شود و رسانایی الکتریکی آن حدود 1×10^6 زیمنس بر سانتی‌متر (S/cm) است که ۱/۷ برابر مس می‌باشد [۴]. مطالعات نشان داده‌اند که ایجاد لایه‌های پیوسته‌ی گرافن روی سیم‌های با قطر میکرومتری، افزایش چشمگیری در رسانایی الکتریکی ایجاد می‌کند [۱۷، ۱۸]. در این پژوهش‌ها، چگالی شکست جریان تا ۴۵۰٪ افزایش یافت و پایداری حرارتی نیز بهبود قابل توجهی نشان داد، به‌طوری که میزان دفع حرارت سطحی تا ۲۲۴٪ افزایش پیدا کرد. نمونه‌های پوشش داده شده با گرافن قادر بودند چرخه‌های حرارتی تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل کنند و در عین حال، رسانایی الکتریکی آن‌ها ۴۱٪ افزایش، مقاومت ویژه ۴۱/۲٪ کاهش و مقاومت کل سیم‌ها نیز ۴۱/۲٪ کمتر از سیم‌های مسی معمولی بود. این نتایج نشان می‌دهد که گرافن علاوه بر افزایش رسانایی، موجب بهبود مقاومت در برابر اکسیداسیون و پایداری حرارتی بالاتر نسبت به مس می‌شود. این ویژگی‌ها، در کنار وزن سبک گرافن و استحکام مکانیکی بالای آن، موجب افزایش عملکرد کابل‌ها در شرایط عملیاتی دشوار می‌شود. به‌کارگیری گرافن در مواد کابلی می‌تواند منجر به افزایش چگالی جریان، بهبود بازده انتقال انرژی و کاهش تلفات حرارتی گردد، که اهمیت ویژه‌ای در صنایع هوافضا، خطوط انتقال فشارقوی، تجهیزات الکترونیکی پیشرفته و سامانه‌های ارتباطی دارد. علاوه بر این، افزودن گرافن به هادی‌ها نه تنها عمر مفید کابل‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه موجب کاهش مصرف انرژی و بهبود دوام عملکرد در طول زمان می‌شود.

به‌طور کلی، ترکیب گرافن با مواد هادی، یک راه‌حل مهندسی نوین برای ارتقای عملکرد کابل‌ها و تجهیزات انتقال انرژی ارائه می‌دهد و می‌تواند به‌عنوان تحولی بنیادی در صنعت سیم و کابل محسوب شود، چرا که همزمان ویژگی‌های الکتریکی، مکانیکی و حرارتی را بهبود می‌بخشد.

۳- کاربرد گرافن در مواد کابلی

۳-۱- کامپوزیت‌های گرافن-مس به عنوان هادی

مس متداول‌ترین ماده‌ی رسانا در سیم‌ها و کابل‌هاست. با پیشرفت صنعت و افزایش نیاز به بازده بالاتر، استانداردهای



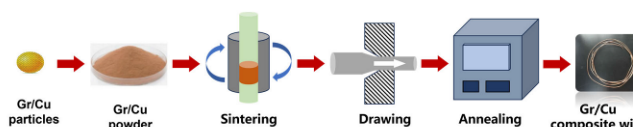
شکل ۲. مقایسه عملکرد مفتول‌های کامپوزیتی تابکاری شده: (الف) هدایت الکتریکی، (ب) استحکام کششی، و (ج) مقایسه با مفتول‌های مس خالص یا مفتول‌های کامپوزیتی Gr/Cu ساخته شده به روش‌های دیگر که در مقالات گزارش شده‌اند [۲۱].

زیرا در فلزات معمولاً افزایش استحکام با افزایش پراکندگی حامل‌های بار و کاهش رسانایی همراه است. در این سیستم، حضور گرافن از یک سو با ایجاد مسیرهای انتقال الکترونی با تحرک بالا و کاهش مؤلفه‌های پراکندگی ناشی از مرزدانه‌ها و نابجایی‌ها، موجب کاهش مقاومت ویژه می‌شود. بر اساس مدل ماتیسن، مقاومت ویژه کل را می‌توان به صورت جمع

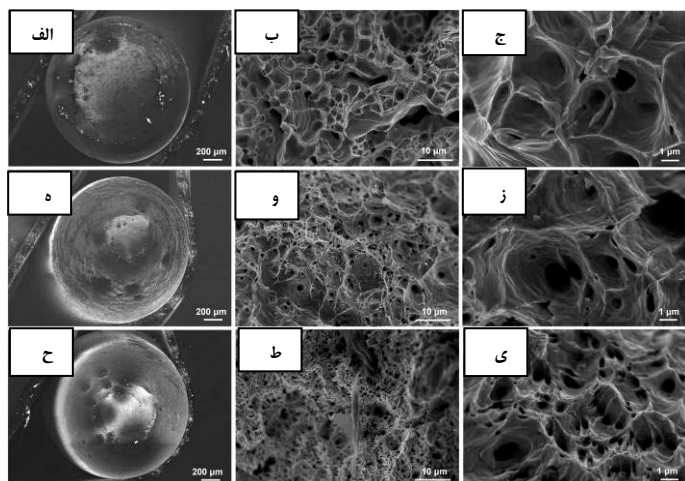
عملکردی کابل‌های مسی نیز به طور فزاینده‌ای سخت‌گیرانه‌تر شده‌اند. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که در کامپوزیت‌های مس-گرافن ساخته شده در شرایط آزمایشگاهی توسط مؤسسه ICAS، رسانایی‌هایی بیش از ۱۰۰٪ استاندارد بین‌المللی مس آنیل شده (IACS) به دست آمده است [۱۹]. کائو و همکاران گرافن را در بافت فلزی مس تعبیه کردند [۲۰]. در این ساختار، گرافن توانست تعارض میان تحرک حامل‌ها و چگالی حامل‌ها را برطرف کند؛ به گونه‌ای که با طراحی دقیق مرز مشترک و کنترل ریخت شناسی، هم تحرک و هم چگالی الکترون‌ها در سطح بالایی حفظ شد. در نتیجه، رسانایی الکتریکی کامپوزیت‌های توده‌ای گرافن-مس با کسر حجمی بسیار اندک گرافن (۰/۰۰۸) حدود ۱۷٪ بیشتر از استاندارد بین‌المللی مس آنیل شده بود، که افزایش قابل توجهی نسبت به نقره (Ag) نشان داد.

مطالعات لئو و همکاران گامی مهم در این زمینه به شمار می‌رود. این گروه با بهره‌گیری از روش رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) موفق به سنتز پودرهای کامپوزیتی گرافن/مس با گرافن تک‌لایه و چندلایه شدند و سپس با استفاده از فلزشناسی پودر، اکستروژن داغ، کشش سیم و عملیات آنیل، سیم‌های کامپوزیتی تولید کردند. این روش توانست ضمن حفظ خلوص و یکنواختی ساختار، توزیع همگن گرافن را در ماتریس مس ممکن سازد (شکل ۱) [۲۱].

بر اساس داده‌های گزارش شده (شکل ۲)، سیم‌های کامپوزیتی گرافن/مس پس از آنیل نهایی، رسانایی الکتریکی حدود ۱۰۱٪ IACS و استحکام کششی حدود ۲۴۰-۲۵۰ مگاپاسکال را نشان دادند، در حالی که برای مس خالص این مقادیر به ترتیب ۹۲/۶٪ و ۲۰۱ مگاپاسکال بود. این بهبود هم‌زمان در هر دو خاصیت، که معمولاً متضاد هستند، ناشی از بهبود ساختار دانه‌ای، کاهش نابجایی‌ها، و نقش گرافن در انتقال بار مکانیکی و الکترونی است [۲۱]. بهبود هم‌زمان رسانایی الکتریکی و استحکام مکانیکی در کامپوزیت‌های مس/گرافن پدیده‌ای غیرسنتی است،



شکل ۱. مسیر آماده‌سازی نمونه مفتول کامپوزیتی Gr/Cu [۲۱].



شکل ۳. SEM سطح شکست مقتول کامپوزیتی آئیل شده: (الف-ج) مس خالص، (د-ه) مقتول‌های کامپوزیتی Gr/Cu-Z و (ح-ی) مقتول‌های کامپوزیتی Gr/Cu-T [۲۱].

در پژوهشی دیگر، ژانگ و همکاران روشی بر پایه‌ی فلزشناسی پودر برای تولید ساختار شبکه‌ای پیوسته‌ی سه‌بعدی گرافن درون ماتریس مس ارائه کردند [۲۲]. این ساختار از طریق جوش خوردن حرارتی ورقه‌های نازک گرافنی رشد یافته بر سطح پودر مس ایجاد شد. این پیوندهای بین‌نفوذی موجب افزایش قابل توجه تنش برشی بین‌سطحی شده و بهبود چشمگیری در انتقال بار و افزایش مقاومت در برابر گسیختگی ایجاد کردند. افزون بر این، این ساختار سه‌بعدی کانال‌های رسانای برتر برای جریان الکتریسته و گرما ایجاد نمود، به‌گونه‌ای که رسانایی الکتریکی کامپوزیت به 103.4% IACS رسید.

جون و همکاران نیز با استفاده از روش رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار (CVD)، فیلم‌های چندلایه‌ی گرافن را بر سطح داخلی و خارجی مس متخلخل سه‌بعدی رشد دادند [۲۳]. این فیلم‌ها تقریباً کل سطح مس را پوشش دادند. سپس ساختار مس-گرافن متخلخل تحت فشار و زینتر فلزشناسی پودر قرار گرفت و در نهایت به‌صورت سیم کامپوزیتی گرافن-مس با قطر ۴ میلی‌متر اکستروود شد. آزمایش رسانایی نشان داد که رسانایی این سیم به 101% IACS رسید که از استاندارد بین‌المللی مس آئیل شده فراتر رفت. همچنین، ظرفیت تحمل دمایی این سیم در آزمون بار حرارتی، $5/45\%$ بیشتر از مس خالص بود. این نتایج نشان دادند که رسانایی الکتریکی و ظرفیت انتقال جریان کامپوزیت‌های گرافن-مس نسبت به مس خالص برتر است.

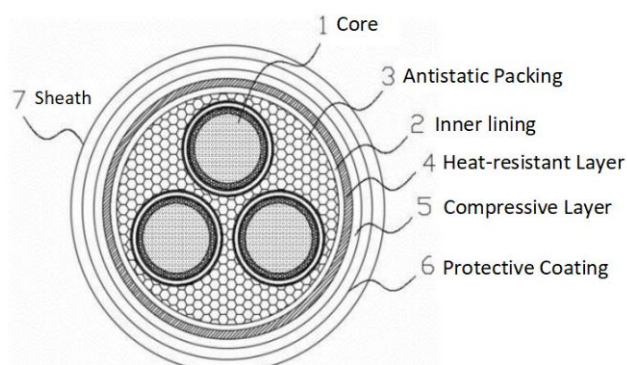
مؤلفه‌های پراکندگی شبکه‌ای و عیوب ریزساختاری در نظر گرفت، که افزودن گرافن با اصلاح ریزساختار و کاهش تمرکز نابجایی‌ها در ماتریس مس، سهم مؤلفه دوم را کاهش می‌دهد.

از سوی دیگر، افزایش استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های مس/گرافن را می‌توان به سازوکارهای تقویتی شامل انتقال تنش از ماتریس به صفحات گرافن با مدول الاستیسیته بسیار بالا، مهار حرکت نابجایی‌ها مطابق با سازوکار اوروان و ریزدانه‌سازی ناشی از حضور گرافن نسبت داد. به‌طور کمی، افزایش تنش تسلیم تابعی از فاصله مؤثر بین موانع نابجایی بوده و حضور صفحات گرافن این فاصله را کاهش می‌دهد. این هم‌افزایی منجر به افزایش استحکام بدون افت قابل توجه در رسانایی الکتریکی می‌شود. بر اساس گزارش‌های موجود، کامپوزیت‌های مس/گرافن با کسری حجمی بسیار کم گرافن (کمتر از ۱ درصد وزنی) قادر به افزایش استحکام کششی تا حدود ۳۰-۵۰ درصد و حفظ یا حتی بهبود رسانایی تا بیش از ۹۵٪ IACS هستند که این رفتار مؤید صحت چارچوب نظری ارائه‌شده است.

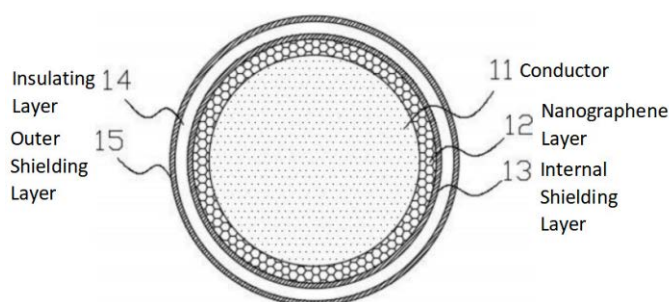
تحلیل سطح شکست نمونه‌ها (شکل ۳) نشان داد که در کامپوزیت‌های گرافنی، لایه‌های گرافن کوچک‌تر و متراکم‌تر هستند و هنگام شکست، این لایه‌ها به صورت کشیده شدن از ماتریس مس (pull-out) مشاهده شدند. این رفتار نشان می‌دهد که تنش به‌طور مؤثر از ماتریس مس به گرافن منتقل شده و انرژی جذب‌شده در فرآیند شکست افزایش یافته است. به عبارت دیگر، حضور گرافن باعث تقویت مکانیزم‌های انتقال بار و تأثیر مرزدانه‌ای در کامپوزیت شده و استحکام مکانیکی آن را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد [۲۱].

مشاهده پدیده pull-out صفحات گرافن در سطح شکست (شکل ۳) بیانگر چسبندگی بین‌سطحی مؤثر میان گرافن و ماتریس مس است. این مکانیزم موجب افزایش انرژی جذب‌شده در فرآیند شکست شده و رفتار شکست نرم‌تری را القا می‌کند. در کاربردهای کابلی، این ویژگی به معنای افزایش تحمل تنش‌های مکانیکی ناشی از نصب، ارتعاشات حرارتی و بارگذاری‌های طولانی‌مدت است که مستقیماً به افزایش طول عمر بهره‌برداری کابل منجر می‌شود.

تضمین کارایی انتقال کابل ایفا می‌کند. این رویکرد کمک می‌کند تا تأثیر عوامل خارجی که ممکن است بر عملکرد کابل اثرگذار باشند، کاهش یابد و در نهایت، رسانایی کلی کابل به‌طور جامع افزایش یابد.



شکل ۴. نمای ساختار کابل گرافنی با پوشش نانو [۲۵].



شکل ۵. نمای بخش هسته‌ی رسانای کابل گرافنی با پوشش نانو [۲۵].

۳-۲- بهبود گرافن برای کاربرد در لایه‌های نیمه‌هادی کامپوزیتی حفاظ داخلی و خارجی

به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی ساختار کابل‌های جریان مستقیم فشار قوی (HVDC)، لایه‌ی نیمه‌هادی حفاظتی (که به آن "لایه‌ی نیمه‌هادی" نیز گفته می‌شود)، نقش مهمی در یکنواخت‌سازی توزیع میدان الکتریکی درون ماده‌ی عایق ایفا می‌کند (شکل ۶). این لایه‌ی عایق، شکاف‌های هوایی بین هسته‌ی رسانا و لایه‌ی عایق و همچنین مرز بین لایه‌ی عایق و لایه‌ی رسانای بیرونی را حذف می‌کند. این ویژگی باعث جلوگیری از تخلیه‌های جزئی و در نتیجه افزایش پایداری عملکرد کابل و طول عمر آن می‌شود. با این حال، با افزایش طول عمر کاری کابل‌های جریان مستقیم فشار قوی، انباشت بارهای فضایی داخلی درون ساختار عایق به‌تدریج افزایش می‌یابد. این پدیده تأثیر منفی بر عملکرد الکتریکی ماده‌ی عایق گذاشته و

در برخی پژوهش‌های دیگر نیز سیم‌ها و کابل‌های کامپوزیتی سه‌بعدی گرافن-مس در مقیاس آزمایشگاهی تولید شده‌اند [۲۴]. در این روش، ابتدا اسکلت سه‌بعدی گرافن ساخته می‌شود و سپس از طریق زینتر فشاری در خلأ همراه با پودر مس، فرآیند کشش، بازپخت‌های متوالی و افزودن لایه‌های عایق بیرونی، ساختار نهایی سیم کامپوزیتی حاصل می‌گردد. در این ساختار، شبکه‌ی سه‌بعدی گرافن خود را درون مس حفظ می‌کند و پایداری بالایی دارد. در مقایسه با سیم‌های مسی خالص، این کامپوزیت‌ها دارای ظرفیت جریان ۱/۵ تا ۲/۴ برابر بیشتر و سختی مکانیکی به‌مراتب بالاتر هستند، در حالی که رسانایی الکتریکی آن‌ها همچنان در حد رسانایی مس باقی می‌ماند. این روش از نظر فنی ساده، سریع و با قابلیت کاربرد گسترده است، اما محدودیت‌هایی نیز دارد. اگرچه فرآیند تولید ساختارهای متخلخل گرافن-مس به‌خوبی توصیف شده، اما در مورد تولید سیم‌های کامپوزیتی گرافن-مس داده‌های کمی و توصیفی وجود دارد و پژوهش‌ها هنوز در سطح آزمایشگاهی باقی مانده‌اند. بنابراین، برای کاربرد صنعتی این فناوری، نیاز به مطالعات عمیق‌تر و توسعه‌ی فرآیندهای مقیاس‌پذیر وجود دارد تا بتواند پاسخ‌گوی نیازهای تولید انبوه در صنعت سیم و کابل باشد.

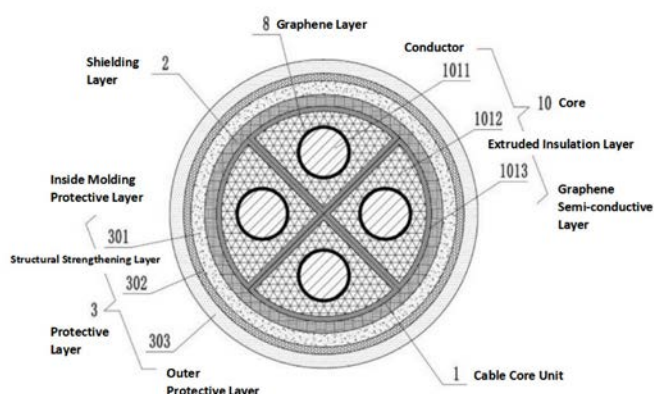
محصولات جدید مشتق‌شده در صنعت سیم و کابل عمدتاً نتیجه‌ی استفاده از مواد جدید، مواد ویژه، تغییر در ساختار محصول، بهبود فرآیندهای تولید یا ترکیب انواع مختلف محصولات هستند که بر اساس شرایط کاربرد، نیازهای عملکردی، سهولت استفاده از تجهیزات و کاهش هزینه‌ها شکل گرفته‌اند. در برخی محیط‌های کاری، افزایش رسانایی کابل برای عملکرد بهینه ضروری است. در این موارد، اجزای معمول کابل نسبتاً ثابت هستند و افزایش رسانایی سایر اجزا دشوار است. بنابراین، هسته‌ی رسانای داخلی کابل باید بهینه‌سازی شود تا نقش خود در افزایش رسانایی را به‌طور مؤثر ایفا کند. پژوهشگران موفق به توسعه کابل گرافنی با پوشش نانو شده‌اند که رسانایی آن با بهینه‌سازی اجزای هسته‌ی رسانا و افزودن یک لایه‌ی نانوگرافن به ساختار لایه‌های حفاظتی لمینت‌شده افزایش یافته است [۲۵]. ساختار این کابل در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. این روش باعث بهبود مؤثر بازده رسانایی هسته‌ی کابل می‌شود و همچنین لایه‌ی خارجی حفاظتی نقش خود را در

حفاظتی لایه را افزایش می‌دهد، بلکه فرآیند اکستروژن (خروج از قالب) را نیز بهبود می‌بخشد. در نتیجه، سطح لایه‌ی حفاظتی خروجی صاف‌تر شده و احتمال تخلیه‌های جزئی کاهش می‌یابد. همچنین، میدان الکتریکی پیرامون کابل یکنواخت‌تر می‌شود که این امر به‌طور مستقیم باعث افزایش قابلیت اطمینان، ایمنی عملکرد کابل و طول عمر آن می‌گردد.

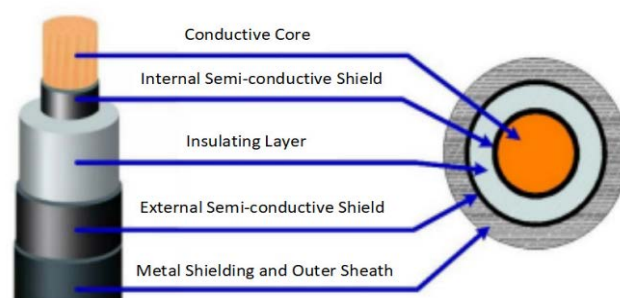
۳-۳- کابل کامپوزیتی عایق‌شده با گرافن

ساختار کابل کامپوزیتی عایق‌شده با گرافن در شکل ۸ نشان داده شده است. این کابل از هسته، لایه‌ی حفاظتی و لایه‌ی محافظ از درون به بیرون تشکیل شده است. هسته‌ی کابل شامل رسانا، لایه‌ی عایق و لایه‌ی نیمه‌هادی گرافنی از درون به بیرون می‌باشد. فرآیند تولید این کابل فشرده و یکنواخت است. در مقایسه با کابل‌های سنتی، بهبودهای حاصل از کابل کامپوزیتی عایق‌شده با گرافن به شرح زیر است [۲۷]:

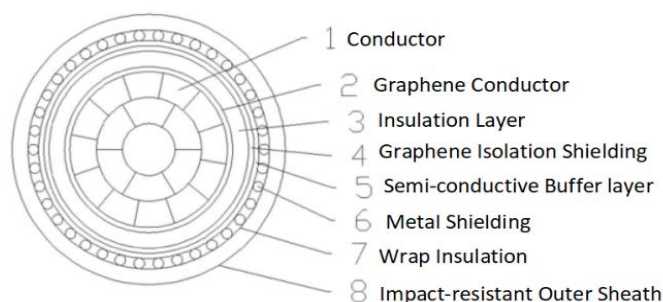
- کاهش نویز ناشی از هسته‌های کابل: در روش‌های پیشین، وقتی چند هسته کابل در قالب کابل قرار می‌گیرند، شکاف بین آن‌ها باعث جابجایی نسبی بین رساناها و سایر اجزا شده و نویز ایجاد می‌کند. با تغییر روش تماس بین هسته‌های مجاور کابل و جایگزینی اتصال استوانه‌ای با تماس سطح، هسته‌ها می‌توانند موقعیت نسبی ثابتی بدون نیاز به مواد پرکننده حفظ کنند. این امر جابجایی نسبی هسته‌ها تحت نیروهای خارجی در طول استفاده را کاهش داده و نویز را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد.



شکل ۸. ساختار کابل کامپوزیتی عایق‌شده با گرافن [۲۷].



شکل ۶. نمای شماتیکی از پیکربندی ساختاری یک کابل جریان مستقیم فشار قوی (HVDC) [۲۵].



شکل ۷. ساختار شماتیکی کابل قدرت مقاوم به ضربه با لایه‌های حفاظ داخلی و خارجی نیمه‌هادی کامپوزیتی گرافنی [۲۵].

می‌تواند ایمنی و پایداری عملکرد کابل را به خطر اندازد [۲۶]. نتایج آزمایش‌های ارائه‌شده نشان می‌دهد که استفاده از مقدار مناسبی گرافن به‌جای ماده‌ی سنتی دوده (کربن سیاه) در لایه‌ی نیمه‌هادی، می‌تواند انباشت بار در لایه‌ی عایق را به‌طور مؤثری کاهش دهد. علاوه بر این، گرافن سبب بهبود عملکرد کابل در شرایط میدان الکتریکی غیریکنواخت می‌شود و از بروز مشکلات احتمالی جلوگیری می‌کند. در نتیجه، رخداد تخلیه‌های موضعی بین رسانا و لایه‌ی عایق نیز کاهش یافته و احتمال بروز نقص‌ها و ترک‌های ناشی از عملکرد غیرطبیعی کابل کمتر می‌شود. همچنین، تلفات توان و آلودگی ناشی از تابش‌های الکترومغناطیسی کاهش می‌یابد و تداخل محیط الکترومغناطیسی خارجی با سیگنال کابل به‌طور مؤثری مهار می‌شود. این ویژگی‌ها موجب بهبود کیفیت انتقال سیگنال و افزایش سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) کابل می‌گردند. از سوی دیگر، پژوهشگران نوعی کابل قدرت مقاوم به ضربه با لایه‌های حفاظ داخلی و خارجی نیمه‌هادی تقویت‌شده با گرافن توسعه داده‌اند (شکل ۷). در مقایسه با کابل‌های سنتی که از مواد نیمه‌هادی معمولی در لایه‌ی حفاظتی استفاده می‌کنند، به‌کارگیری مواد حفاظتی گرافنی در این بخش نه تنها هدایت الکتریکی و کارایی

• بهبود مقاومت و رسانایی با لایه‌ی نیمه‌هادی گرافنی: لایه‌ی نیمه‌هادی از گرافن ساخته شده است که استحکام کابل را افزایش می‌دهد و به دلیل هدایت الکتریکی بالا و سطح صاف گرافن، تولید بارهای الکتریکی و تخلیه‌ها کاهش یافته و نویز بیشتر کاهش می‌یابد.

• افزایش کارایی فرآیند تولید کابل: در روش‌های سنتی برای کاهش نویز و پرکردن شکاف‌ها، از مواد پرکننده استفاده می‌شد که فرآیند تولید را کند می‌کرد. در این کابل، هسته‌ها به صورت تماس سطحی مستقیم در قالب قرار می‌گیرند و بنابراین در مراحل بعدی نیازی به پرکردن فضای بین هسته‌ها با مواد اضافی نیست. این کار باعث حذف شکاف مرکزی، کاهش مراحل پردازش و افزایش کارایی تولید کابل می‌شود.

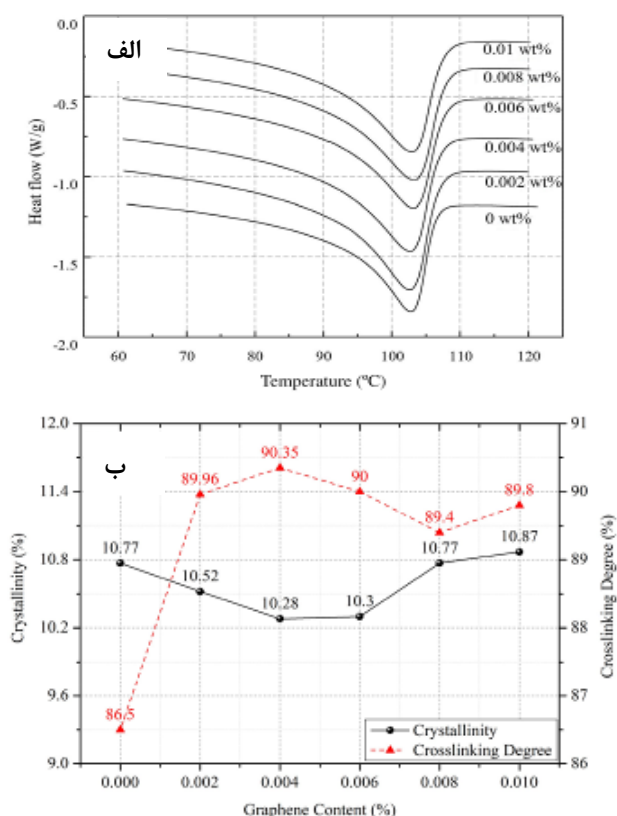
در سال‌های اخیر، توسعه مواد عایق پلیمری با کارایی بالا برای کابل‌های جریان مستقیم ولتاژ بالا (HVDC) به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی صنعت انتقال برق مطرح شده است. پلی‌اتیلن پیوند عرضی (XLPE) به دلیل استحکام مکانیکی و مقاومت حرارتی مطلوب، در سیستم‌های AC کاربرد گسترده‌ای دارد، اما در کابل‌های DC با مشکل تجمع بار فضایی و تخریب ناشی از آن روبه‌روست [۲۸]. یکی از راهکارهای نوین برای بهبود عملکرد الکتریکی این مواد، افزودن نانوذرات به ماتریس پلیمری است که موجب ایجاد تله‌های عمیق الکترونی و کاهش تحرک حامل‌های بار می‌شود. در این میان، گرافن به‌دلیل رسانایی بالا، پایداری شیمیایی و سطح ویژه زیاد، به‌عنوان نانوفیلری نویدبخش مطرح شده است [۲۸].

در پژوهش لی و همکاران در سال ۲۰۲۱، هدف بررسی اثر افزودن مقادیر بسیار کم گرافن (در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۱ درصد وزنی) به XLPE بر ویژگی‌های حرارتی، مکانیکی، الکتریکی و مقاومت در برابر پیرشدگی آبی (Water Treeing) بود (شکل‌های ۹ تا ۱۲). برای این منظور، نمونه‌های گرافن / XLPE با روش آمیزش محلولی^۱ تهیه و پس از عملیات کراس‌لینک، تحت آزمون‌های DSC، استحکام کششی، رسانایی DC، توزیع بار فضایی و آزمون تسریع‌شده درختچه‌های آبی قرار گرفتند.

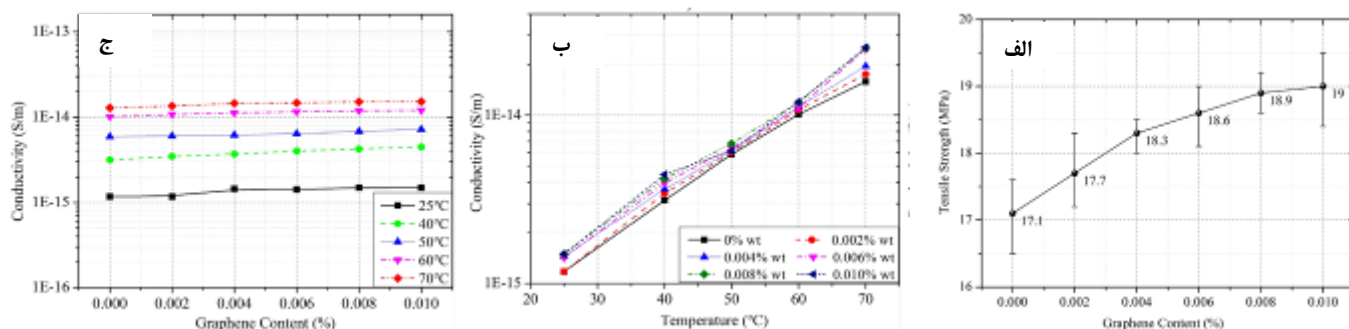
^۱ Solution Blending

کاهش تجمع بار فضایی در حضور گرافن در لایه‌های نیمه‌هادی (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که گرافن با اصلاح توزیع تله‌های الکترونی و افزایش یکنواختی میدان الکتریکی، از تمرکز تنش الکتریکی در مرز عایق-نیمه‌هادی جلوگیری می‌کند. این پدیده مستقیماً احتمال وقوع تخلیه‌های جزئی را کاهش داده و پایداری بلندمدت کابل‌های HVDC را افزایش می‌دهد، به‌ویژه در ولتاژهای بالا که تخریب تدریجی عایق عامل اصلی شکست کابل محسوب می‌شود.

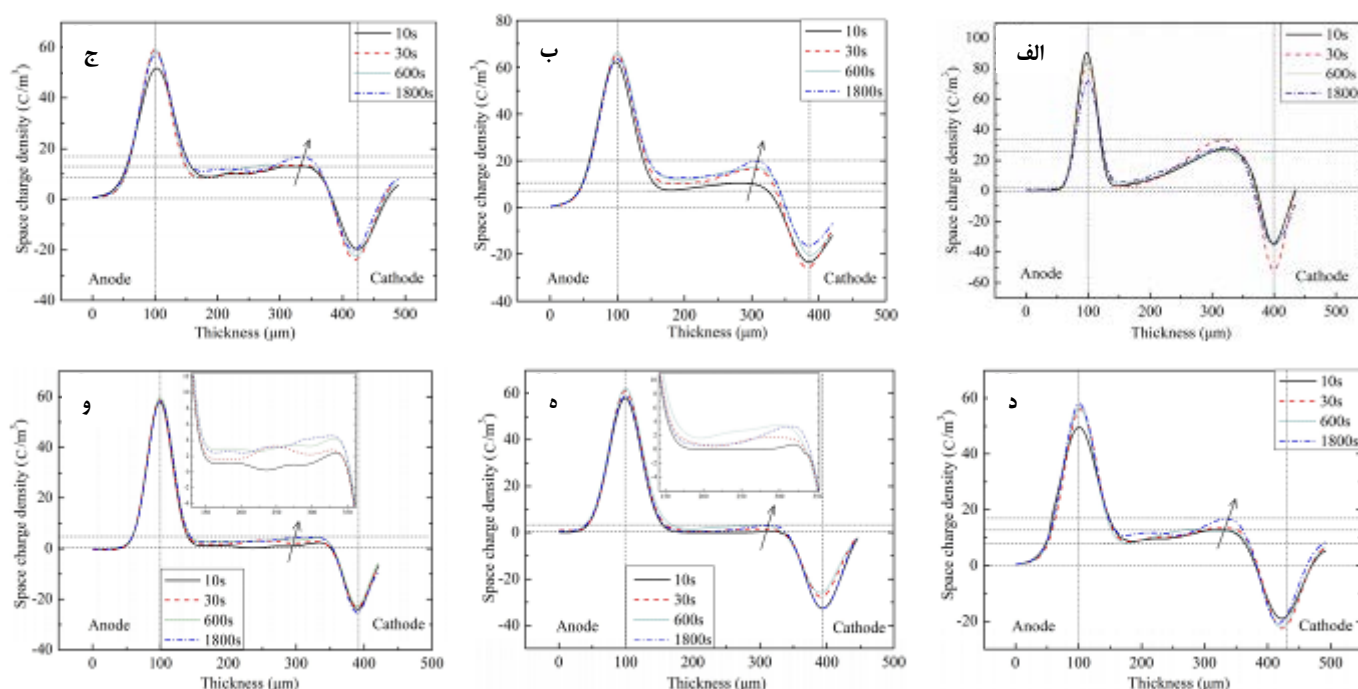
کاهش رشد درختچه‌های آبی در نمونه‌های گرافن / XLPE (شکل ۱۲) نشان می‌دهد که گرافن علاوه بر نقش تقویتی مکانیکی، به‌عنوان یک مانع فیزیکی و شیمیایی در برابر نفوذ رطوبت و یون‌ها عمل می‌کند. این رفتار، که با کاهش تجمع بار فضایی همراه است، یکی از عوامل کلیدی افزایش طول عمر عایق در کابل‌های HVDC محسوب می‌شود. از منظر مهندسی، این نتایج نشان می‌دهد که افزودن مقادیر بسیار کم گرافن



شکل ۹. (الف) منحنی‌های DSC نمونه‌های گرافن / XLPE با مقادیر مختلف گرافن (۰، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱٪). (ب) میزان بلورینگی و درجه‌ی پیوند عرضی در نمونه‌های گرافن / XLPE با همان مقادیر گرافن (۰، ۰/۰۰۲، ۰/۰۰۴، ۰/۰۰۶، ۰/۰۰۸ و ۰/۰۱٪) [۲۸].



شکل ۱۰. (الف) استحکام کششی نمونه‌های گرافن / XLPE با مقادیر مختلف گرافن (۰٪، ۰.۰۰۲٪، ۰.۰۰۴٪، ۰.۰۰۶٪، ۰.۰۰۸٪، ۰.۰۱٪). (ب) و (ج) رسانایی جریان مستقیم (DC) نمونه‌های گرافن / XLPE در دماهای مختلف (۲۵، ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ درجه سانتی گراد): (ب) دما به‌عنوان محور افقی، (ج) درصد وزنی گرافن به‌عنوان محور افقی [۲۸].



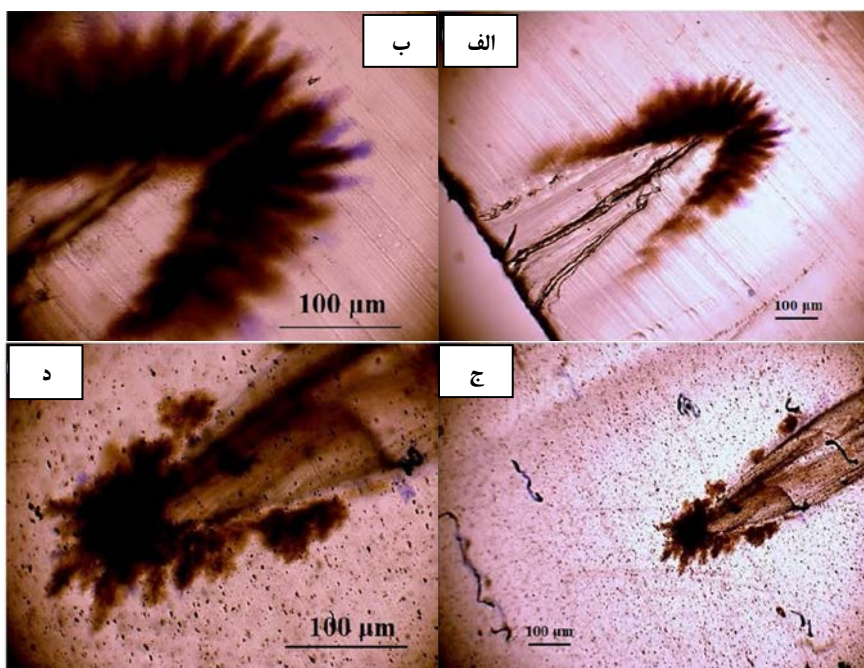
شکل ۱۱. توزیع بار فضایی در نمونه‌های گرافن / XLPE: (الف) XLPE خالص، (ب) XLPE + ۰.۰۰۲٪ وزنی گرافن، (ج) XLPE + ۰.۰۰۴٪ وزنی گرافن، (د) XLPE + ۰.۰۰۶٪ وزنی گرافن، (ه) XLPE + ۰.۰۰۸٪ وزنی گرافن، (و) XLPE + ۰.۰۱٪ وزنی گرافن [۲۸].

می‌تواند بدون افزایش وزن یا رسانایی ناخواسته، دوام عایق را در شرایط بهره‌برداری طولانی‌مدت به‌طور محسوسی افزایش دهد. نتایج آزمون DSC نشان داد که افزودن گرافن تغییر محسوسی در دمای ذوب و میزان بلورینگی ایجاد نمی‌کند و این پارامترها در حدود ۱۰۳ °C باقی می‌مانند. با این حال، درجه پیوند عرضی به‌طور متوسط ۳/۵٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی پایداری حرارتی بالاتر نمونه‌های گرافنی است. بنابراین، گرافن اثر چندانی بر رسانایی حرارتی ندارد، اما با ایجاد پیوندهای سطحی، واکنش‌های پیوند عرضی را تسهیل می‌کند. افزودن گرافن موجب افزایش پیوسته استحکام کششی شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱۷/۱ MPa در XLPE خالص به حدود ۱۸/۹ MPa در نمونه با ۰/۰۰۸ درصد وزنی گرافن رسید. این افزایش به دو عامل اصلی نسبت داده شد [۲۸]، اول، بهبود ریزساختار از طریق کاهش حفرات و تراز بهتر زنجیره‌های پلیمری و دوم، نقش تقویتی گرافن به‌عنوان فاز سخت با مدول بالا و پیوند مناسب با ماتریس پلیمر.

نتایج شبیه‌سازی‌های اتمی نیز این فرض را تأیید کرده‌اند که حضور گرافن موجب جهت‌گیری منظم‌تر زنجیره‌های PE و انتقال مؤثر تنش در مقیاس نانو می‌شود.

نتایج آزمون DSC نشان داد که افزودن گرافن تغییر محسوسی در دمای ذوب و میزان بلورینگی ایجاد نمی‌کند و این پارامترها در حدود ۱۰۳ °C باقی می‌مانند. با این حال، درجه پیوند عرضی به‌طور متوسط ۳/۵٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی پایداری حرارتی بالاتر نمونه‌های گرافنی است. بنابراین، گرافن اثر چندانی بر رسانایی حرارتی ندارد، اما با ایجاد پیوندهای سطحی، واکنش‌های پیوند عرضی را تسهیل می‌کند. افزودن گرافن موجب افزایش پیوسته استحکام کششی شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱۷/۱ MPa در XLPE خالص به حدود ۱۸/۹ MPa در نمونه با ۰/۰۰۸ درصد وزنی گرافن رسید. این افزایش به دو عامل اصلی نسبت داده شد [۲۸]، اول، بهبود ریزساختار از طریق کاهش حفرات و تراز بهتر زنجیره‌های پلیمری و دوم، نقش تقویتی گرافن به‌عنوان فاز سخت با مدول بالا و پیوند مناسب با ماتریس پلیمر.

نتایج آزمون DSC نشان داد که افزودن گرافن تغییر محسوسی در دمای ذوب و میزان بلورینگی ایجاد نمی‌کند و این پارامترها در حدود ۱۰۳ °C باقی می‌مانند. با این حال، درجه پیوند عرضی به‌طور متوسط ۳/۵٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده‌ی پایداری حرارتی بالاتر نمونه‌های گرافنی است. بنابراین، گرافن اثر چندانی بر رسانایی حرارتی ندارد، اما با ایجاد پیوندهای سطحی، واکنش‌های پیوند عرضی را تسهیل می‌کند. افزودن گرافن موجب افزایش پیوسته استحکام کششی شد؛ به‌گونه‌ای که مقدار آن از ۱۷/۱ MPa در XLPE خالص به حدود ۱۸/۹ MPa در نمونه با ۰/۰۰۸ درصد وزنی گرافن رسید. این افزایش به دو عامل اصلی نسبت داده شد [۲۸]، اول، بهبود ریزساختار از طریق کاهش حفرات و تراز بهتر زنجیره‌های پلیمری و دوم، نقش تقویتی گرافن به‌عنوان فاز سخت با مدول بالا و پیوند مناسب با ماتریس پلیمر.



شکل ۱۲. (الف) و (ب) مورفولوژی (ریخت‌شناسی) درختچه آبی در نمونه‌های XLPE خالص. (ج) و (د) مورفولوژی درختچه آبی در نمونه‌های گرافن / XLPE با غلظت ۰/۰۰۷٪ وزنی گرافن [۲۸].

دو مکانیسم اصلی برای این پدیده مطرح است:

۱. افزایش استحکام تسلیم در حضور گرافن (از ۱۰/۹۹ MPa به ۱۲/۶۹ MPa)، که مقاومت در برابر تنش‌های الکتریکی را افزایش می‌دهد.

۲. ماهیت آب‌گریز گرافن که مهاجرت رطوبت و یون‌ها در شبکه‌ی پلیمری را محدود می‌کند و به‌صورت فیزیکی مسیرهای رشد درختچه آبی را مسدود می‌سازد.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن مقدار بسیار کمی گرافن (در حد هزارم درصد وزنی) می‌تواند به‌طور هم‌زمان خواص مکانیکی و عایقی XLPE را بهبود دهد، بدون آن‌که چگالی یا وزن ماده افزایش یابد. اثر اصلی گرافن در این سامانه‌ها از طریق سه سازوکار کلیدی صورت می‌گیرد:

- تقویت مکانیکی ساختار پلیمری
- ایجاد تله‌های الکترونی عمیق در مرز گرافن-پلیمر
- ایجاد مانع فیزیکی برای نفوذ آب و یون‌ها

به‌طور کلی، این نوع نانوکامپوزیت‌ها پتانسیل بالایی برای استفاده در عایق کابل‌های UHVDC نسل آینده (تا ۸۰۰ kV) دارند. با این حال، بهینه‌سازی بیشتر در پراکنده‌سازی یکنواخت گرافن،

اگرچه گرافن رسانایی بالایی دارد، افزودن آن تا حد ۰/۰۱ درصد وزنی تأثیر محسوسی بر رسانایی DC کلی XLPE نداشت. بر اساس نظریه‌ی پراکندگی، در این غلظت پایین، فاصله بین صفحات گرافن بسیار زیاد بوده و مسیر رسانای پیوسته ایجاد نمی‌شود. اما در آزمون PEA، که توزیع بار فضایی را نشان می‌دهد، نتایج بسیار چشمگیر بود. در نمونه‌های گرافن/XLPE، میزان تجمع بارهای ناهمنام در نزدیکی الکترودها به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت و در غلظت ۰/۰۰۸٪ وزنی به حداقل رسید. این بهبود ناشی از ایجاد تله‌های عمیق الکترونی در نواحی مرزی بین گرافن و پلیمر است که از حرکت آزاد حامل‌های بار جلوگیری می‌کند. در صورت افزایش بیش از حد گرافن، این نواحی به‌هم متصل می‌شوند و مسیرهای هدایت ناخواسته‌ای ایجاد می‌کنند؛ بنابراین مقدار بهینه گرافن در محدوده‌ی پایین باقی می‌ماند. پدیده‌ی درختچه آبی از مهم‌ترین عوامل تخریب در عایق کابل‌های پلیمری است. نتایج آزمون تسریع شده ۳۰ روزه در محلول NaCl نشان داد که افزودن تنها ۰/۰۰۷٪ وزنی گرافن باعث کاهش طول میانگین شاخه‌های درختچه آبی از ۱۰۱/۸ μm به ۸۵/۶ μm (کاهش ۱۵/۹٪) می‌شود. تصاویر میکروسکوپی نشان دادند که در نمونه‌های گرافنی، شاخه‌ها پراکندگی کمتری دارند و جهت رشد آن‌ها تصادفی‌تر است [۲۸].

کنترل ضخامت لایه‌ها و اصلاح سطحی برای پیوند بهتر با پلیمر، پیش شرط تجاری سازی کامل این فناوری است [۲۸].

۴- چشم اندازهای کاربرد کابل‌های گرافنی

چشم اندازهای بازار برای کابل‌های گرافنی شامل انتقال توان فشار قوی بسیار بالا، همچنین خودروهای برقی، راه آهن‌های سریع السیر و سایر حوزه‌های حمل و نقل ریلی است. علاوه بر این، مقاومت عالی در برابر خوردگی و خواص مکانیکی برجسته‌ی کابل‌های گرافنی، آن‌ها را برای کاربرد در مهندسی دریایی و صنایع پتروشیمی مناسب می‌سازد. نوآوری‌های فناورانه و کاهش هزینه‌ها می‌تواند به گسترش استفاده از گرافن در مواد کابل کمک کند و انتظار می‌رود که کابل‌های گرافنی در آینده جایگاه مهمی در بازارهای مهندسی دریایی و پتروشیمی پیدا کنند. کاربرد کابل‌های گرافنی در مهندسی دریایی عمدتاً بر افزایش مقاومت در برابر خوردگی و دوام کابل متمرکز است. محیط دریایی به دلیل حضور نمک و میکروارگانیسم‌ها بسیار خورنده است و باعث تسریع فرسایش و آسیب کابل‌های معمولی می‌شود. فناوری پوشش گرافنی می‌تواند برای حفاظت ضد خوردگی کشتی‌ها، سکوها دریایی و سایر سازه‌های مهندسی دریایی استفاده شود، به طور مؤثر خوردگی ناشی از آب دریا را کاهش داده، عمر سازه را افزایش دهد و ایمنی مهندسی دریایی را بهبود بخشد. در صنایع پتروشیمی، کابل‌های گرافنی می‌توانند برای حفاظت ضد خوردگی سکوها نفتی، خطوط لوله نفت و سایر تجهیزات مرتبط استفاده شوند. پایداری شیمیایی و مقاومت گرافن در برابر خوردگی، آن را قادر می‌سازد تا در برابر اسیدها، بازها، نمک‌ها و حلال‌های آلی مقاومت کند و در نتیجه طول عمر تجهیزات افزایش می‌یابد. پتانسیل کابل‌های گرافنی همچنین موضوع تحلیل‌های بازار بوده و شرکت‌های بزرگ صنعتی اقدام به تحقیق و توسعه، تولید و تجاری سازی این کابل‌ها کرده‌اند. این تحولات با ارتقای تدریجی و بررسی کاربردهای تجاری گرافن در حوزه کابل همراه بوده است. برای نمونه، محصولات کابل گرافنی شرکت هولدینگ ژونگچائو به مرحله تولید صنعتی رسیده و به صورت عمده به شرکت‌های تولید کابل در چندین استان و شهر عرضه می‌شوند [۲۹]. علاوه بر این، پروژه کابل گرافنی مشترک هانگدیان و دانشگاه نیو سالت ولز استرالیا نیز پیشرفت کرده و

نمونه‌های کابل گرافنی در حال آزمون رسمی و برنامه‌ریزی برای صنعتی سازی هستند [۳۰]. با پیشرفت تحقیقات گرافن و کاهش هزینه‌های تولید، انتظار می‌رود که استفاده از آن در بخش برق گسترده‌تر شود و نقش مهمی در انتقال انرژی و صنایع کابل‌های با عملکرد بالا ایفا کند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، نقش مواد مبتنی بر گرافن در بهبود عملکرد اجزای مختلف کابل‌های قدرت شامل هادی، لایه‌های نیمه‌هادی و عایق‌های پلیمری مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعات مرور شده نشان می‌دهد که استفاده از گرافن می‌تواند به طور هم‌زمان موجب ارتقای خواص الکتریکی، مکانیکی و عایقی کابل‌ها شود.

به طور مشخص، افزودن گرافن به هادی‌های مسی منجر به افزایش هم‌زمان رسانایی الکتریکی و استحکام مکانیکی شده و این امر امکان افزایش ظرفیت انتقال جریان و بهبود پایداری مکانیکی کابل را بدون افزایش وزن یا سطح مقطع فراهم می‌کند. همچنین، به کارگیری گرافن در لایه‌های نیمه‌هادی سبب کاهش تجمع بار فضایی و یکنواخت‌تر شدن توزیع میدان الکتریکی می‌شود که نقش مهمی در افزایش پایداری الکتریکی و کاهش احتمال تخلیه‌های جزئی، به ویژه در کابل‌های جریان مستقیم فشارقوی، دارد. از سوی دیگر، نتایج مربوط به عایق‌های پلیمری حاوی گرافن، به ویژه XLPE، نشان‌دهنده بهبود مقاومت در برابر پدیده درختچه‌های آبی و فرسایش الکتریکی است که مستقیماً به افزایش طول عمر بهره‌برداری کابل منجر می‌شود.

از منظر کاربردی، یافته‌های این مطالعه بیانگر آن است که استفاده از مقادیر کم گرافن می‌تواند بدون ایجاد تغییرات نامطلوب در فرآیند تولید، به بهبود چندمنظوره عملکرد کابل‌های قدرت منجر شود. این موضوع گرافن را به گزینه‌ای امیدبخش برای توسعه نسل آینده کابل‌های با قابلیت اطمینان بالا، طراحی فشرده و عمر کاری طولانی تبدیل می‌کند. با این حال، انجام پژوهش‌های بیشتر در زمینه مقیاس‌پذیری صنعتی، ارزیابی بلندمدت عملکرد و تحلیل اقتصادی، برای تسهیل کاربرد صنعتی این مواد ضروری است.

مراجع

10. Z. Gao, Zuo, T., Wang, M., Zhang, L., Da, B., Ru, Y., ... & Xiao, L., Carbon, 186, 303-312 (2022). <https://doi.org/10.1126/science.1157996>
11. Y. Kumar, S. Sahoo, and A. K. Chakraborty, *Physica B: Condensed Matter.*, 620, 413250 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2021.413250>
12. K. Cao *et al.*, Nat. Commun., 11(1), 284 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14130-0>
13. T. Zuo, Wang, M., Xue, J., Ru, Y., Wu, Y., Ding, F., ... & Xiao, L. , Mater. Charact., 200 (2023).
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.112863>
14. X. Zhu, J. Xue, T. Zuo, Y. Ru, Y. Xu, B. Chen, et al, J. Mater. Sci.: Materials in Electronics, 36(10), 1-8, (2025).
<https://doi.org/10.1007/s10854-025-14612-6>
15. Y. Geng, X. Zhang, Q. Cao, D. B. Xiong, Compos. Commun., 46, (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.coco.2024.101857>
16. W. Liu, Zhao, X., Li, H., & Ding, Y. , Metals, 15(10), (2025).
<https://doi.org/10.3390/met15101117>
17. H. Kashani, C. Kim, C. Rudolf, F. K. Perkins, E. R. Cleveland, and W. Kang, Adv. Mater., 33(51), 2104208, (2021).
<https://doi.org/10.1002/adma.202104208>
18. K. Zhou, Y. Jia, D. Jia, J. Wang, W. Sun, Y. Wang, et al, J. Mater. Res. Technol., 33, 7546-7571., (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.076>
1. arketsandMarkets, Wire & Cable Market by Product Type (Electronic Wire, Power Cable, Control & Instrumentation Cable, Communication Cable, Flexible & Specialty Cable), Material Type, Voltage, Installation, End-Use Industry, and Region – Global Forecast to 2029, Aug. 2024. [Online]. Available:
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/wire-and-cable-market-247134084.html>.
2. K. I. Bolotin et al., Solid State Commun., 146(9-10), 351-355 (2008).
<https://doi.org/10.1016/j.ssc.2008.02.024>
3. D. M. Basko, Phys. Rev. B Condens. Matter. 79(20), 205428 (2009).
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.79.205428>
4. A. K. Geim, K. S. Novoselov, Nat. Mater., 6(3), 183-191, (2007). <https://doi.org/10.1038/nmat1849>
5. Y. Liu *et al.*, Mater. Lett., 301, 130280 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130280>
6. A. Sharma et al., Mater. Des., 238, 112643 (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.112643>
7. P. Hidalgo-Manrique, X. Lei, R. Xu, M. Zhou, I. A. Kinloch, R. J. Young, J. Mater. Sci., 54(19), 12236-12289 (2019).
<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03703-5>
8. P. Hidalgo-Manrique et al., J. Mater. Sci., 52(23), 13466-13477 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s10853-017-1450-6>
9. C. Lee, X. Wei, J. W. Kysar, J. Hone, Science, 321(5887), 385-388 (2008).
<https://doi.org/10.1126/science.115799>

29. China Daily, "Carbon-neutral industry catches wind, graphene cable producer Zhongchao Holding gets attention," Mar. 12, 2021. [Online]. Available: URL of the article. [Accessed: Jul. 20, 2026].
30. GrapheneTV, "Graphene cable project developed by Hangdian and Australian universities achieves stage-by-stage results," Aug. 8, 2018. [Online]. Available: <http://www.graphene.tv/201808083927/>. [Accessed: Jul. 20, 2026].
19. W. Li, J. Ma, B. Liu, W. Wang, Z. Liu, *Mater. Res. Express*, 11(4), (2024). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad3a3d>
20. M. Cao et al., *Adv. Funct. Mater.*, 29(17), 1806792, (2019). <https://doi.org/10.1002/adfm.201806792>
21. W. Liu, Y. Han, J. Zhang, C. Zhang, Y. Ding, *Appl. Sci.* (2076-3417), 14(20), (2024). <https://doi.org/10.3390/app14209273>
22. X. Zhang et al., *Nat. Commun.*, 11, (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16490-4>
23. S. Zhong, X. Zhang, A. Liu, and B. Zhang, *Adv. Eng. Mater.*, 27(7), 2401950, (2025), <https://doi.org/10.1002/adem.202401950>.
24. K. Jianli, Y. Ge, B. Lü, Z. Guan, Z. Qiao, and Z. Yu, "Three-dimensional continuous graphene/copper composite material and preparation method thereof," Chinese Patent CN109897985A, Jun. 18, 2019.
25. B. Wang, Z. Huo, and P. Wen, "Graphene composite high-semiconductive polyethylene-shielded power cable," Chinese Patent CN203617033U, May 28, 2014.
26. G. Li, X. Li, F. Zhang, X. Liang, M. Liu, Y. Wei, S. Li, C. Hao, Q. Lei, *High Volt.*, 7(3), 545–552, (2022), <https://doi.org/10.1049/hve2.12162>.
27. S. X. Zhang, J. Xu, F. Xia, Y. Wang, D. Jiang, and F. Zhou, "Graphene copper wire, preparation method thereof and cable," Chinese Patent CN114388167B, Jan. 26, 2024.
28. Y. Li, G. Zhu, K. Zhou, P. Meng, and G. Wang, *Sci. Rep.*, 11, (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97328-x>



From copper to graphene: the evolution of conductive and insulating materials in power cables

Majid Mirzaee*, Abbass Feizinia, Yaser Ghorbani Amir

Non-metallic group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran.

Abstract: Copper, as the dominant conductor in power cables, faces limitations such as high density, reduced conductivity at elevated operating temperatures, and mechanical constraints, which restrict the development of higher-efficiency cables. This article, adopting an analytical-review approach, examines the role of graphene as an advanced two-dimensional nanomaterial in simultaneously enhancing the electrical, mechanical, and insulating performance of power cables. The main novelty of this study lies in presenting an integrated framework for graphene applications across three key cable components: copper-graphene composite conductors, protective semiconducting layers, and graphene-modified polymeric insulations. The reviewed studies indicate that the addition of trace amounts of graphene can increase conductor conductivity beyond 100% of annealed copper international standards, improve mechanical strength, and simultaneously mitigate phenomena such as space charge accumulation and water treeing in polymeric insulations. Furthermore, the role of graphene in electric field homogenization, partial discharge reduction, and the enhancement of HVDC cable reliability is emphasized. Finally, challenges related to scalability, uniform graphene distribution, and industrialization requirements are discussed, and future research directions for the development of next-generation high-performance power cables are outlined.

Keywords: Graphene, Power cables, Cu/Graphene composites, Cross-linked polyethylene, advanced conductive and insulating materials.