

واژه‌های کلیدی:

رزین اپوکسی
نانومواد کربنی
رسانش حرارتی
بازدارندگی شعله
رسانش الکتریکی

بررسی بهبود عملکرد رزین‌های اپوکسی با استفاده از نانومواد کربنی

سید مرتضی نقیب*، سیامک ایمانیان

تهران، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده فناوری‌های نوین، گروه مهندسی نانوفناوری

چکیده ...

اپوکسی، یکی از مهمترین پلیمرهای گرماسخت، در طیف گسترده‌ای از کاربردها به عنوان چسب، پوشش و ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها به علت عملکرد فوق‌العاده، قابلیت عمل‌آوری و هزینه کم، استفاده می‌شود. نانومواد کربنی به دلیل خواص مناسب در رسانش حرارتی، بازدارندگی شعله، ثبات مکانیکی، رسانش الکتریکی و زیست‌سازگاری، توجه جهانی را به خود جلب کرده‌اند. در مقاله حاضر مرور پژوهش‌های گذشته در مورد بهبود عملکرد رزین اپوکسی با افزودن نانومواد کربنی ارائه شده است. ارتباط عملکرد ساختاری برای اپوکسی اصلاح شده با نانومواد مختلف کربنی از نزدیک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بهبود عملکرد مکانیکی، الکتریکی، رسانش حرارتی و بازدارندگی شعله برای اپوکسی رزین بررسی شده است. هدف این تحقیق، ارائه مطالب جامعی درباره رزین‌های اپوکسی چند منظوره شامل نانومواد کربنی تا به امروز و ارزیابی چشم‌انداز آینده آن است. همچنین ارتباط و مقایسه ساختار و عملکرد نانومواد کربنی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در نهایت، نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده و امید به تسهیل مقاله ارائه شده است

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

naghib@iust.ac.ir

۱ مقدمه

اپوکسی، یکی از مهم ترین پلیمرهای گرماسخت، در طیف گسترده‌ای از کاربردها به عنوان چسب، پوشش و ماده زمینه برای کامپوزیت‌ها به علت عملکرد فوق‌العاده، قابلیت عمل‌آوری و هزینه کم، استفاده می‌شود [۱]. همچنین به طور گسترده‌ای در کاربردهای هوافضا و خودرو، به عنوان زمینه برای ساخت کامپوزیت‌های تقویت شده و به عنوان چسب برای پیوند بین اجزای سازنده استفاده می‌شود. با وجود ارائه برخی خواص مطلوب، پلیمرهای گرماسخت معمولاً رسانش الکتریکی پایین و چقرمگی شکست (Fracture Toughness) کمی دارند که منجر به مقاومت ضعیف در برابر صاعقه و رشد ترک می‌شود [۲]. در صنعت هواپیمایی اپوکسی عمدتاً به عنوان ورقه استفاده می‌شود. استحکام ورق الیاف کربنی و اپوکسی، با وزن یکسان، نسبت به فولاد و آلومینیوم بسیار بالا است. در صنعت خودرو، اپوکسی عمدتاً به عنوان چسب استفاده می‌شود و در نتیجه جایگزین جوشکاری می‌شود. با این حال، ساختار شبکه سه بعدی اکثر رزین‌های اپوکسی با عملکرد بالا دارای طبیعت شکننده و مقاومت ضعیف در برابر ترک است؛ بنابراین استفاده از آن‌ها در ساخت قطعات مکانیکی محدودیت دارد. تلاش‌های متعددی مانند مخلوط کردن اپوکسی با فاز دوم (نانوذرات، نانولوله‌ها، نانوصفحات و غیره) و ترکیب آن‌ها برای بهبود چقرمگی (Toughness)، سختی و استحکام و حتی خواص چند منظوره انجام شده است [۱]. با این حال، اپوکسی دارای رسانش الکتریکی پایین است. استحکام کششی و سختی پایین به علت ریزشکاف‌ها، آن‌ها را آسیب‌پذیر و کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند [۳].

مهمترین ویژگی نانوپرکننده‌ها این است که حداقل یک بعد آن‌ها در مقیاس نانو (به طور معمول ۱ تا ۱۰۰ نانومتر) قرار دارد. در اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر، خواص مواد، متفاوت از خواص توده (Bulk) است زیرا اثرات محصور شدن کوانتوم بر خواص الکتریکی، حرارتی و نوری در این اندازه قابل توجه است. یکی دیگر از ویژگی‌های مهم نانومواد، کسر بسیار زیاد اتم در سطوح آن است. اتم‌های سطح به دلیل نیروهای نامتقارن (Asymmetrical) وارد بر آن‌ها رفتاری منحصر به فرد از خود نشان می‌دهند. اثر این نیروها بر روی هر اتم سطحی، تششی سطحی را ایجاد می‌کند که

فشار مرتبط با آن می‌تواند طول پیوند (Bond Length) در بلورها را تغییر دهد و بیشتر بر خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی تأثیر می‌گذارد [۴].

کشف نانوکامپوزیت‌های پلیمری، پنجره جدیدی در علم مواد باز کرده است. در ۲۰ سال گذشته، بسیاری از محققان صنعت و دانشگاه در این زمینه علمی به علت مزایای اقتصادی و وزن کم نانوکامپوزیت‌ها، جذب شده‌اند [۵]. به منظور بهبود خواص، انواع نانوپرکننده‌ها و مواد افزودنی از قبیل نانوذرات آهن و اکسید آهن، نانورشته‌های کربنی، نانولوله‌های کربنی، گرافن، نانوذرات رس، پلی‌آنیلین، سیلیکا، اکسید روی و آلومینا برای کنترل رفتار رزین اپوکسی استفاده شده است. در میان پرکننده‌های نانویی مختلف برای بهبود کارایی نانوکامپوزیت اپوکسی، نانومواد کربنی به دلیل خواص فیزیکی منحصر به فرد جذاب‌تر هستند [۳].

هدف این پژوهش ارائه مطلبی جامع از رزین‌های اپوکسی چند منظوره حاوی نانومواد کربنی تا به امروز و ارزیابی چشم‌انداز آینده آن است. همچنین ارتباط و مقایسه ساختار و عملکرد نانومواد کربنی مختلف مورد توجه قرار می‌گیرد. بهبود خواص مکانیکی، الکتریکی، رسانش حرارتی و بازدارندگی شعله اپوکسی-نانوپرکننده‌های کربنی، به طور دقیق بررسی شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده ارائه شده است.

۲ بهبود خواص

۱-۲ نانومواد کربنی استفاده شده در رزین اپوکسی

شکل ۱ ساختارهای مختلف نانومواد کربنی و نام‌گذاری آن‌ها را نشان می‌دهد. گرافن می‌تواند به عنوان پایه ساختمانی تمام اشکال گرافیتی کربن (مانند نانولوله‌های کربنی و فولرین‌ها) شامل یک لایه اتمی از اتم‌های کربن با هیبریداسیون sp^2 که در ساختار لانه زنبوری مرتب شده است، باشد [۳]. اخیراً استفاده از نانورق‌های گرافنی به عنوان پرکننده بسیار مورد مطالعه قرار گرفته است. مزیت اصلی، هزینه پایین آن‌ها نسبت به نانولوله‌های کربنی است که به دلیل هزینه پایین تولید است [۶]. نانوصفحات گرافنی می‌توانند ویژگی‌های هندسی بسیار متنوعی را با توجه به تابع اندازه و تعداد لایه‌های اتمی ارائه دهند. این ویژگی‌ها به طور قابل توجهی با سطح ویژه و نسبت مساحت سطح ویژه

بسیار کمتر است. استفاده از روش ساخت رسوب بخار شیمیایی، تولید الیاف کربنی با قیمت‌های تجاری مناسب را ممکن می‌سازد [۳].

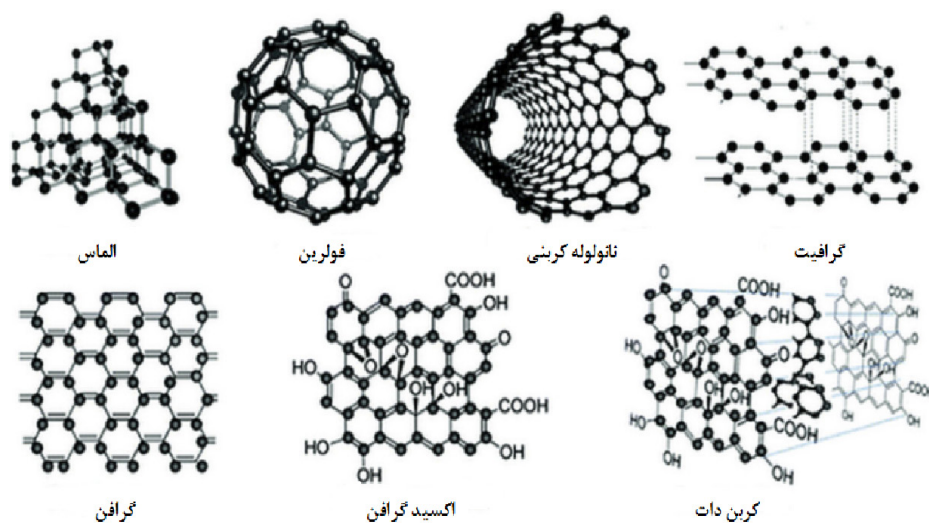
علاقه شدیدی به مطالعه ساختار و خصوصیات نانومواد کربنی وجود دارد. جدول ۱ خواص نانومواد کربنی معمولی، از جمله استحکام کششی، مدول کشسانی، انحنای شکستگی، تراکم، رسانش الکتریکی، رسانش حرارتی در دمای اتاق، پایداری حرارتی در هوا، قطر نمونه و سطح مخصوص را فهرست کرده است [۳].

۲-۲-۲ خواص بهبود یافته

اپوکسی دارای خواص مکانیکی خوب، خواص چسبندگی عالی، پایداری شیمیایی و مقاومت الکتریکی بالایی است. با این حال، چگالی بالای اتصالات عرضی (Crosslinking Density) اپوکسی به طور ذاتی استحکام کششی و مقاومت به ضربه را کاهش می‌دهد که ساختار بسیار شکننده‌ای را با مقاومت ضعیف نسبت به شروع و انتشار ترک ایجاد می‌کند. به منظور برآورده ساختن نیازهای خواص مکانیکی هواپیما و کاربردهای هوافضا، کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوپرکننده‌های کربنی تهیه شده‌اند. اثبات شده است که افزودن نانومواد کربنی به زمینه اپوکسی، روشی موثر برای افزایش سختی آن است [۹]. رسانش الکترومغناطیسی کم اپوکسی و به ویژه ضخامت آن از

ارتباط دارند [۷].

فولرین (Fullerene) مولکول کربن است که به شکل کره توخالی، بیضوی، لوله و بسیاری از اشکال دیگر وجود دارد. فولرین‌های کروی که باکی‌بال (Buckyballs) نیز نامیده می‌شوند، شبیه توپ فوتبال هستند. فولرین‌های استوانه‌ای نیز به نام نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotube (CNT)) نام‌گذاری شده‌اند. فولرین‌ها ساختاری مشابه با گرافیت دارند که از اتصال حلقه‌های شش ضلعی صفحات گرافنی انباشته شده، تشکیل می‌شوند. آن‌ها ممکن است حاوی حلقه‌های پنج ضلعی (Pentagonal) یا گاهی اوقات هفت ضلعی (Heptagonal) هم باشند. نانولوله‌های کربنی با توجه به تعداد حلقه‌های گرافن به دو نوع تقسیم می‌شود: نانولوله کربنی تک جداره (Single-Walled Nanotube (SWCNT)) و نانولوله کربنی چندجداره (Multi-Walled Nanotube (MWCNT)) [۸]. الیاف کربنی (Carbon Nanofibers (CNF))، نانوساختارهای استوانه‌ای با لایه‌های گرافنی هستند که می‌توان آن‌ها را با توجه به سه الگوی مختلف در قالب فنجان، مخروط یا صفحات قرار داد. قطر و طول آن‌ها به ترتیب از ۵۰ تا ۵۰۰ نانومتر و ۵۰ تا ۲۰۰ میکرومتر است. قدرت کششی حدود ۷ GPa دارند (کمی پایین‌تر از CNT) و قیمت سنتز آن‌ها در مقایسه با دیگر نانومواد



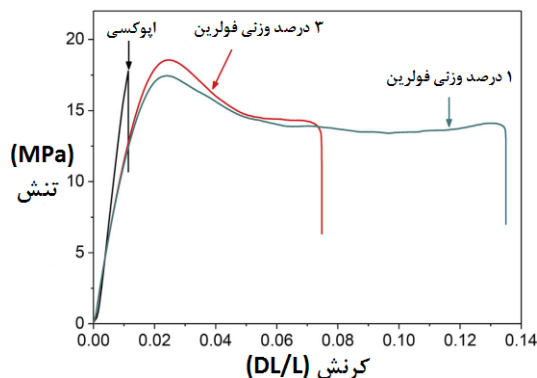
شکل ۱ انواع ساختارهای مختلف نانومواد کربنی و نام آن‌ها [۳].

جدول ۱ خواص معمولی نانومواد کربنی

خواص	فولرین	SWCNT	MWCNT	گرافن	الیاف کربنی
استحکام کششی (GPa)	-	۵۰-۵۰۰	۱۰-۶۰	۱۳۰	۳-۷
مدول الاستیک (TPa)	-	۱	۰/۱-۳	۱	۰/۵
کرنش نظیر شکست (%)	-	۵/۸	-	۲۰	۰/۰-۲/۵
چگالی (g/cm ³)	۱.۷	۱/۱-۳/۵	۱/۲-۸	-	۲/۲۵
رسانش الکتریکی (s/m)	۱۰ ^{-۳}	۱۰ ^۶	۱۰ ^۶	۶×۱۰ ^۵	۱۰ ^۳
رسانش حرارتی در دمای اتاق (W/m-K)	۰/۴	۶۰۰۰	۲۰۰۰	۵۰۰۰	۱۹۰۰
پایداری حرارتی (در هوا)	۶۰۰	>۷۰۰	>۷۰۰	۴۵۰-۶۵۰	-
قطر معمولی (nm)	۰/۷	۱	۲۰	-	۵۰-۵۰۰
سطح ویژه (m ² /g)	۴۲-۸۵	۱۰-۲۰	۱۰-۲۰	۲۶۷۵	۵۰

چالش‌های موجود در حفاظت از هواپیما در برابر صاعقه و تداخلات الکترومغناطیسی است. همچنین اپوکسی‌ها برای رسیدن به خواص مقاوم در برابر آتش‌سوزی برای تجهیزات معدن، ذخیره‌سازی و حمل و نقل نفت و گاز، نیازمند رسانش الکتریکی مناسبی هستند. از این رو، بهبود رسانش الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی اهمیت زیادی دارد [۱۰].

کششی نهایی ۱۷/۷ MPa نشان می‌دهد. مدول یانگ اندازه‌گیری شده آن ۱/۸ GPa است. کامپوزیت اپوکسی شامل ۱ درصد وزنی فولرن، افزایش استحکام کششی در حدود ۵٪ را نشان می‌دهد در حالی که با افزودن ۳ درصد وزنی فولرین تغییر چندانی نمی‌کند. مدول یانگ برای هر دو مقدار تقریباً ۲ GPa است که در نتیجه نسبت به اپوکسی خالص، ۱۳/۳ درصد افزایش نشان می‌دهد. تنش تسلیم ۱۳/۲ و ۱۲/۳ مگاپاسکال برای کامپوزیت اپوکسی به ترتیب با ۱ و ۳ درصد وزنی فولرین است. مهم‌ترین نتیجه این است که بیشترین شکل‌پذیری کامپوزیت با افزودن ۱ درصد وزنی فولرین با افزایش طول ۱۳/۲ درصد، رخ می‌دهد [۱۱].



شکل ۲ نتایج آزمون کشش رزین اپوکسی با افزودن ۱ و ۳ درصد وزنی فولرین [۱۱].

۳-۱ فولرین - اپوکسی

افزودن ۱ درصد وزنی فولرین به رزین اپوکسی باعث بهبود سختی تا ۲۰ برابر شده است. همچنین استحکام کششی، بیش از ۱۳ درصد افزایش یافته است و این نشان‌دهنده تغییر سازوکار شکست در تنش از حالت ترد (Brittle) به نرم (Ductile) است. علاوه بر این ضریب اصطکاک (Friction) از مقدار ۰/۹۱ در رزین اپوکسی ساده تا ۰/۱۵ در کامپوزیت بهینه شده کاهش می‌یابد. در کامپوزیت بهینه شده، نیروهای جانبی (Lateral Forces) با افزایش میزان مدول الاستیک و سختی به ترتیب تا ۴۳٪ و ۹۴٪ به میزان ۸۰٪ کاهش می‌یابد. کامپوزیت رزین اپوکسی تقویت شده با فولرین می‌تواند گزینه‌ای قوی برای کاربردهای پوشش باشد که در آن چقرمگی، اصطکاک کم، انعطاف‌پذیری و وزن کم، اهمیت دارند [۱۱].

نتایج آزمون کشش در شکل ۲ ارائه شده است. نمونه مرجع اپوکسی، منحنی تنش-کرنش مشخصه مواد شکننده را تقریباً بدون تغییر شکل پلاستیک و استحکام

۳-۲ بازدارندگی شعله

از فولرین همچنین به عنوان عاملی برای بازدارندگی شعله استفاده شد و مقدار شاخص محدودکننده اکسیژن (Limiting Oxygen Index (LOI)) از ۲۲/۵ برای اپوکسی خالص به ۳۰ برای کامپوزیت اپوکسی - BEN-(C60-O)/ BEN-(C60-O)-CL88 رسید. ضخامت ورق (Brucite) ۲/۵۴ nm و قطر متوسط ۶۰۰-۵۰۰ nm CL88 است. ساختارهای C60-O و BEN در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۲].

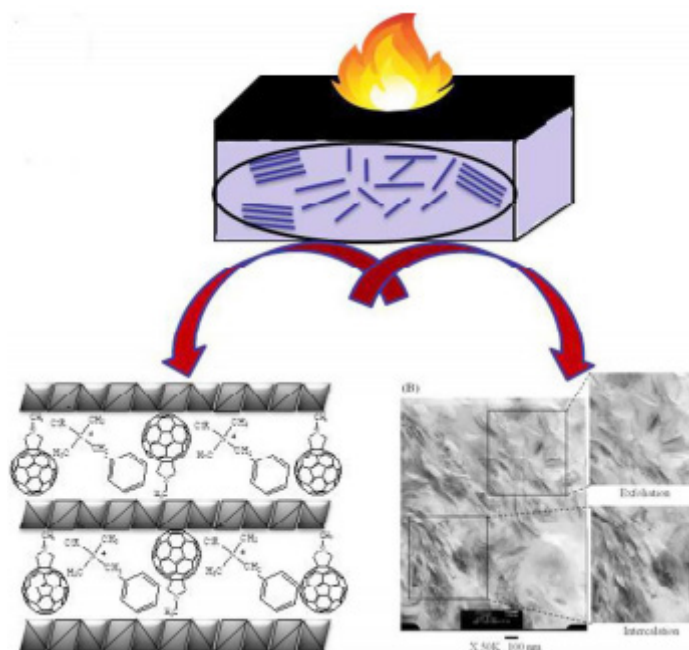
۴ نانولوله کربنی - اپوکسی

۴-۱ خواص مکانیکی

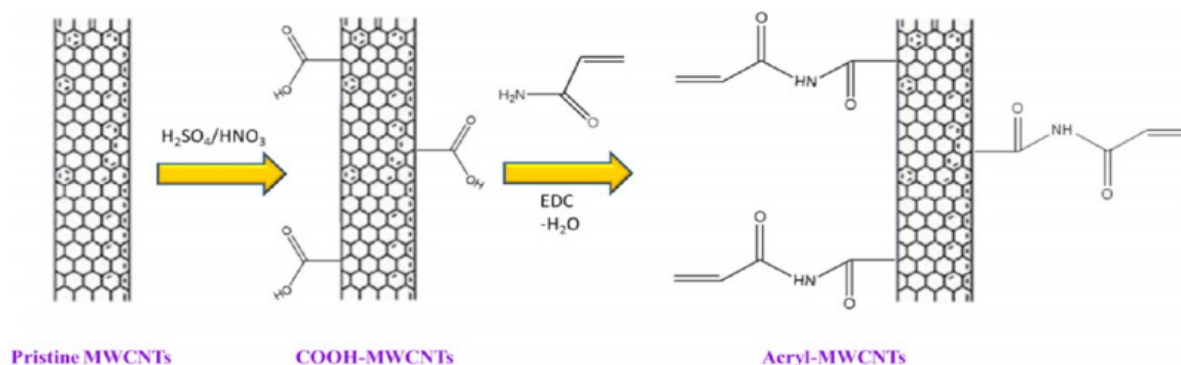
چنگ و همکاران با استفاده از CNT هم‌راستا شده، کامپوزیت‌های اپوکسی - نانولوله کربنی یک سویه‌ای با استحکام کششی ۲۳۱ MPa و مدول الاستیک ۲۳۱ GPa تولید کردند [۱۳، ۱۴]. نانولوله‌های کربنی تک جداره عامل دار شده به صورت شیمیایی، به منظور بهبود پراکندگی و اتصال فصل مشترک نانولوله و اپوکسی کاربرد دارند و باعث بهبود مقاومت کششی و مدول یانگ به ترتیب از ۸۳/۲ به ۹۵ MPa و ۲/۰۳ تا ۲/۶۳ GPa شدند [۱۴]. در مطالعه دیگری از دو نوع گروه عاملی برای

عامل دار کردن نانولوله کربنی چند جداره استفاده شد. شکل ۴ این عامل‌ها را معرفی می‌کند. در این مطالعه مقادیر استحکام خمشی و مدول‌های MWCNT acrylMWCNTs و COOH-MWCNTs در کامپوزیت مبتنی بر CF Carbon Fiber /VE Vinyl Ester در مقادیر مختلف MWCNT (۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ phr) برای بررسی اثرات تقویت آن‌ها، مقایسه شد [۱۵].

پنج نمونه برای هر کامپوزیت آزمایش شد. استحکام خمشی در شکل ۵ نشان داده شده است. استحکام خمشی کامپوزیت هنگامی که محتوای MWCNT اولیه از ۰ به ۰/۵ افزایش یافت از ۳۶۸/۳ به ۴۰۶/۸ MPa (تقریباً ۱۰/۴ درصد بیشتر از کامپوزیت CF/VE) و مدول خمشی از ۴۵/۵ به ۴۷/۸ GPa (تقریباً ۵/۱ درصد بیشتر از کامپوزیت CF/VE) افزایش یافت. هرچند با تغییر مقدار MWCNT از ۰/۵ به ۰/۷۵ و ۱ phr استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی - نانولوله کربنی چند جداره، کمی کاهش می‌یابد. روند مشابهی برای مدول خمشی آن‌ها نیز مشاهده می‌شود. هنگامی که پرکننده به محتوای بحرانی می‌رسد، فاصله بین نانولوله‌های کربنی چند جداره بسیار کم می‌شود به طوری که نیروهای واندروالس قابل توجه شده، نانولوله‌ها ممکن است کلوخه شوند که سطح تماس موثر بین نانولوله و زمینه پلیمر را کاهش می‌دهد. در



شکل ۳ طرح‌واره رس اصلاح شده، ریزساختار کامپوزیت اپوکسی و رفتار سوختن [۱۲].



شکل ۴ روند اصلاح سطح نانولوله کربنی چند جداره [۱۵].

نانولوله) را نشان می‌دهد. رسانش مستقیم، حاصل از اتصال الکترومغناطیسی پرکننده‌های رسانا در پلیمر دی-الکتریک زمینه است. همانطور که در شکل ۶ مشخص است MWCNT توسط رسانش PEPA احاطه شده است. که در این حالت به عنوان یک جسم یکپارچه، دارای قطبیت بالاتری نسبت به اپوکسی MWCNT-e است. رسانش PEPA بالاتر از اپوکسی است زیرا پلیمر قطبی‌تری است و به عنوان نانولوله عامل‌دار دارای قطبیت بالاتری نسبت به اپوکسی MWCNT-e است. به همین دلیل است که اتصال الکترومغناطیسی MWCNT-a به زمینه اپوکسی، رسانش الکتریکی ac و دی‌الکتریک بالاتری نسبت به MWCNT-e ایجاد می‌کند [۱۶].

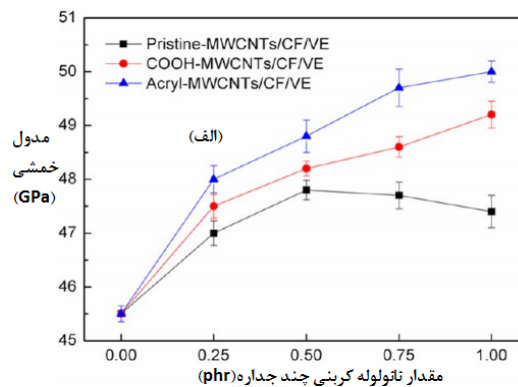
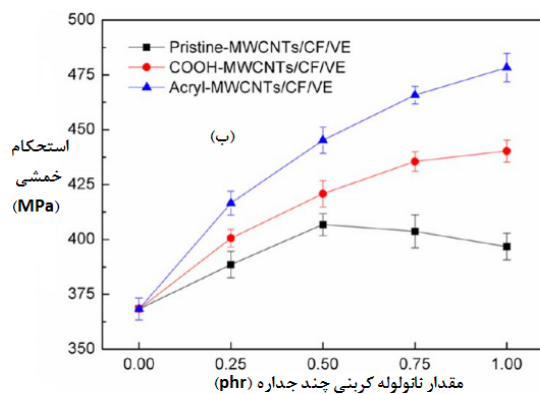
۴-۳ خواص حرارتی

Qiu و Wang اثر افزودن CNT بر رسانش حرارتی کامپوزیت‌های شیشه‌ای پلیمر-الیاف را بررسی کردند.

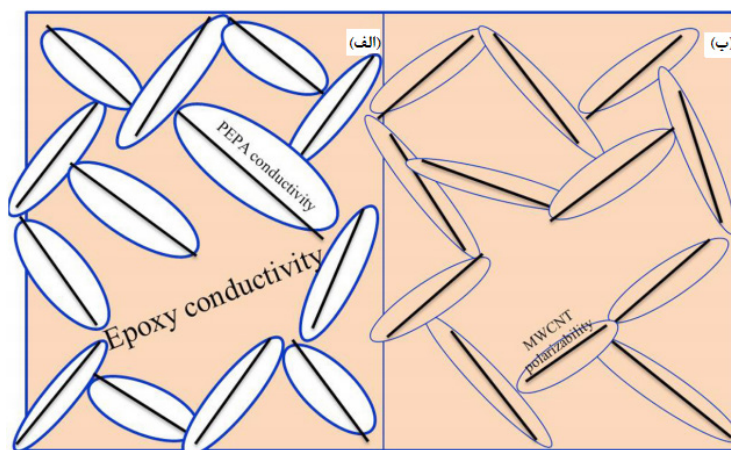
نتیجه، تقویت زمینه توسط نانولوله کاهش می‌یابد و منجر به بازده تقویتی پایین‌تر می‌شود [۱۵].

۴-۲ خواص الکتریکی

عامل دار کردن شیمیایی نانولوله‌های کربنی چندجداره منجر به تشکیل رابط با تعامل قوی‌تر می‌شود. اما این امر موجب کاهش قابل توجهی در رسانش الکتریکی کامپوزیت نسبت به نانولوله‌های عامل‌دار نشده می‌شود. دلیل فیزیکی این امر می‌تواند به صورت کیفی در شکل ۶ مشخص شود. در روش استاتیک، هنگامی که برای شروع رسانش الکتریکی تماس مستقیم با نانولوله‌ها رخ می‌دهد، "پوشش PEPA" از تماس مستقیم MWCNT جلوگیری می‌کند (شکل ۶ الف))، که کاهش رسانش dc کامپوزیت اپوکسی ER/MWCNT-a (با ۰/۳ درصد وزنی نانولوله) را در مقایسه با کامپوزیت آمین ER/MWCNT-e (با ۰/۰۳ درصد وزنی



شکل ۵ (الف) مدول خمشی و (ب) استحکام خمشی کامپوزیت CF/VE- نانولوله کربنی چند جداره [۱۵].



اثر هدایت اپوکسی - PAPE < هدایت اپوکسی

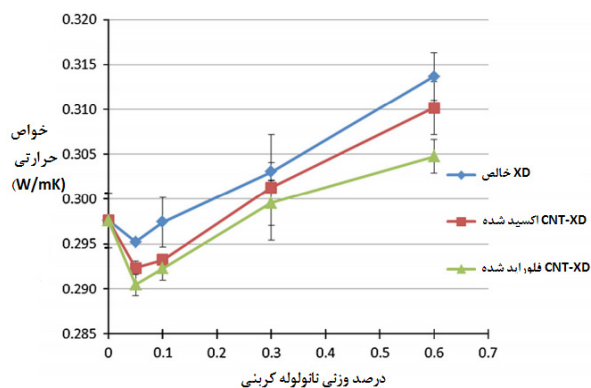
شکل ۶ طرح‌واره (الف) کامپوزیت آمین ER/MWCNT-e و (ب) کامپوزیت اپوکسی ER/MWCNT-a [۱۶].

و یکنواختی را پس از سوزش نشان می‌دهد. این اثر به سطح ویژه بسیار بالای نانولوله‌های CO_x نسبت داده می‌شود. باقی‌مانده‌های سوختن سطح، منجر به رفع آتش شد به این معنی که اپوکسی، کمتر قابل احتراق می‌شود. ظهور ساختار شبکه‌ای در سطح خارجی نمونه (شکل ۸ ب) درست پس از احتراق، به عنوان مانع حرارتی برای جدا کردن مواد سوزاننده از اکسیژن عمل کرده و همچنین از تغذیه شعله از گازهای قابل احتراق (شکل ۸ ج) جلوگیری می‌کند [۲۰].

۵ افزودنی‌های گرافنی - اپوکسی

۵-۱ خواص مکانیکی

پراکندگی گرافن در اپوکسی موجب افزایش چشمگیر



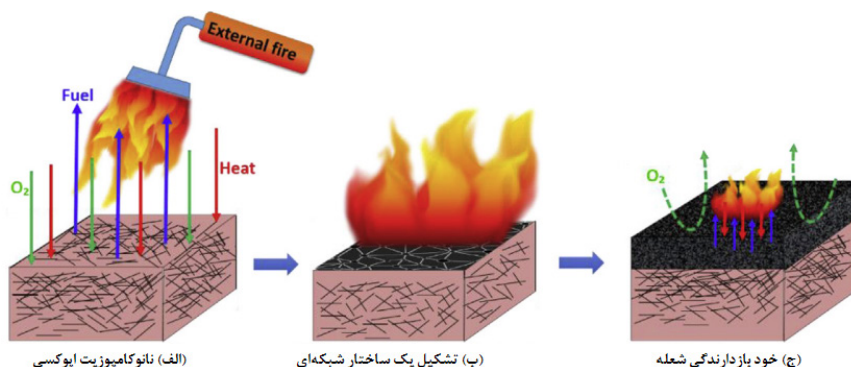
شکل ۷ رسانش حرارتی در مقابل درصد وزنی CNT برای اپوکسی XD [۱۹].

آن‌ها دریافتند که افزودن ۳ درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چندجداره، رسانش حرارتی را تا ۱/۵ برابر بیشتر از کامپوزیت‌های شیشه‌ای پلیمر-الیاف شفاف افزایش می‌دهد [۱۷]. برخی از کامپوزیت‌های اپوکسی-نانولوله کربنی تک‌جداره، با ۱ درصد وزنی، افزایش ۱۲۵ درصدی و بالاتر را در رسانش حرارتی در دمای اتاق، نشان می‌دهند [۱۷, ۱۸].

رسانش حرارتی به عنوان تابع وزن کسری CNT برای کامپوزیت‌های اپوکسی-XD خالص در شکل ۷ نشان داده شده است. اپوکسی خالص، رسانش حرارتی W/mK ۰/۲۹۷ را نشان می‌دهد. رسانش حرارتی XD-CNT، با ۰/۶ درصد وزنی، ۵/۵ درصد نسبت به اپوکسی خالص افزایش یافته است. در مقابل رسانش حرارتی XD-CNT اکسید شده با ۰/۶ درصد وزنی ۴/۳ درصد افزایش یافته است. و برای XD-CNT فلوراید شده، با ۰/۶ درصد وزنی، ۴/۳ درصد افزایش یافته است [۱۹].

۴-۴ بازدارندگی شعله

برای غلبه بر اشتعال‌پذیری رزین‌های اپوکسی با قرار دادن (Doped) اکسیژن (CO_x) و نیتروژن (CN_x) روی نانولوله کربنی با استفاده از روش CVD، نانوکامپوزیت اپوکسی-نانولوله کربنی با ۲ درصد وزنی سنتز شد. نانوکامپوزیت اپوکسی باعث کاهش اشتعال می‌شود. نتایج تعیین میکرو احتراق کالری سنجی و شاخص محدودکننده اکسیژن نشان داد که خواص بازدارندگی شعله برای نانوکامپوزیت‌ها به ویژه برای CO_x با LOI بسیار بالا (۳۵ درصد) بهبود یافته است و سطح همگن



شکل ۸ طرح بازدارندگی شعله [۲۰].

از $1 \mu\text{m}$ توزیع شده‌اند. شکل ۹ (د) نشان می‌دهد که اندازه جانبی GnP-5 بسیار بزرگتر از قطر CTBN است و سطح GnP-5 از نزدیک با CTBN ارتباط برقرار می‌کند (نشانگرها را ببینید)، که سازگاری خوب بین GnP-5 و CTBN را نشان می‌دهد [۲۲].

خواص کششی و خمشی اپوکسی خالص و کامپوزیت اپوکسی - CTBN - GnP در شکل ۱۰ (الف) و (ب) دیده می‌شود، مدول کششی و خمشی اپوکسی پس از اضافه کردن ۱۰ درصد وزنی CTBN کاهش یافته است؛ در حالی که مدول کششی و خمشی کامپوزیت اپوکسی - CTBN پس از افزودن GnP به علت مدول بالای GnP به تدریج بهبود یافت و در ۳ درصد وزنی GnP-5 به بیشترین مقدار رسید. این افزایش تقویت کنندگی به علت افزایش محتوای نانوصفحات بزرگتر (GnP-5) با توجه به نسبت سطح ویژه بالاتر و پراکندگی بهتر GnP-5، همان‌طور که انتظار می‌رفت، افزودن ۱۰ درصد وزنی CTBN در زمینه اپوکسی منجر به کاهش استحکام کششی و خمشی شد (شکل ۱۰ (ج) و (د)). همان‌طور که برای کامپوزیت‌های سه‌تایی، ترکیب ۱ و ۳ درصد وزنی GnP-C750، استحکام مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی - CTBN، را کمی افزایش داد. در مقابل، مقاومت کششی و خمشی زمینه اپوکسی - CTBN به سختی با افزودن ۱ درصد وزنی GnP-5 تغییر می‌کند، در حالی که با افزودن ۳ درصد وزنی GnP-5، در استحکام کششی و خمشی، کمی کاهش مشاهده شد [۲۲].

خواص مکانیکی می‌شود و با اضافه شدن گرافن به میزان ۰/۳ درصد وزنی، مدول یانگ، استحکام کششی و چقرمگی شکست به ترتیب تا ۲۴٪، ۳۱٪، ۲۹٪ افزایش می‌یابد [۲۱]. عملکرد شکست کامپوزیت اپوکسی با ۰/۱ درصد وزنی گرافن خالص در مقایسه با افزودنی‌های دیگری مثل نانولوله‌های کربنی تک و چند جداره نشان می‌دهد که کامپوزیت تقویت شده با گرافن، بالاترین چقرمگی شکست را دارد [۲۲].

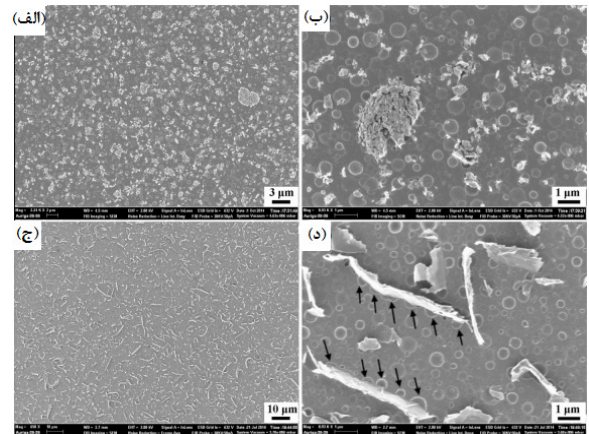
در کار دیگری از دو نوع گرافن با مشخصات جدول (۲) استفاده شد. شکل ۹ تصاویر SEM از وضعیت پراکندگی (GnP) Graphene Nanoplatelet و CTBN بزرگ‌نمایی کم و زیاد نشان می‌دهد. شکل ۹ (الف) و (ج) نشان می‌دهد که GnP-C750 پراکندگی نسبتاً خوبی در ماتریس دارد، اگر چه برخی از کلوخه‌های اولیه را می‌توان به دلیل سطح ویژه بالای GnP-C750 متوجه شد. در مقابل، GnP-5 به صورت یکنواخت و به طور تصادفی در زمینه پلیمر پراکنده شده‌اند. بزرگ‌نمایی‌های بالا (شکل ۹ (ب) و (د)) به وضوح نشان می‌دهد که ذرات CTBN به طور یکنواخت در زمینه با ابعاد کمتر

جدول ۲ مشخصات نانورق‌های گرافن خالص

دسته‌بندی	قطر	ضخامت (nm)	سطح ویژه (m^2/g)
GnP-C750	کوچکتر از $1 \mu\text{m}$	۵-۷	۷۵۰
GnP-5	تقریباً $5 \mu\text{m}$	۵-۷	۱۵۰

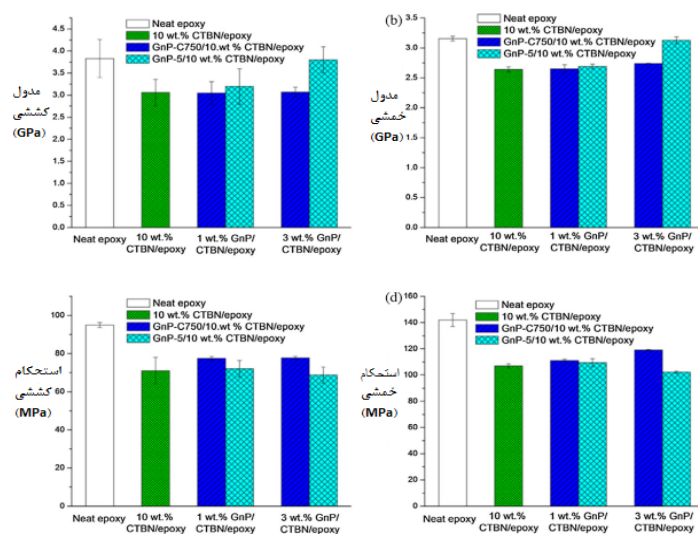
5 وجود دارد. توزیع یکنواخت GnP-5 در زمینه اپوکسی پس از استفاده از روش‌های مختلف توزیع، شامل دستگاه پروب امواج صوتی (Tip Sonication) و فرایند مخلوط کردن با High Shear Mixer به دست آمد، درحالی‌که برای کامپوزیت‌های GnP-C750 در درصد‌های بالای افزودنی، کلوخه‌هایی مشاهده شدند. نتایج خواص مکانیکی نشان داد که نانورق‌های بزرگتر (GnP-5) باعث تقویت و بهبود بیشتر مدول کامپوزیت در مقایسه با GnP-C750 می‌شوند. با این حال، کاهش استحکام در کامپوزیت‌های اپوکسی - GnP-5، به علت تعاملات ضعیف بین GnP-5 و زمینه اپوکسی بود [۲۳].

تجزیه و تحلیل XPS از GnP-5 و GnP-C750 برای تعیین ساختار شیمیایی آن‌ها انجام شد (شکل ۱۱). XPS می‌تواند نوع اتم‌ها را بر روی سطح نمونه‌ها و همچنین نوع پیوندهای شیمیایی را شناسایی کند. نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهند که غلظت اتمی اکسیژن برای GnP-C750، ۸/۷۹ درصد است که بیش از دو برابر بیشتر از غلظت اکسیژن (۴/۰۱ درصد) برای GnP-5 است و همچنین نسبت اکسیژن به کربن، فراوانی عنصر اکسیژن GnP-C750 را تأیید کرد [۲۳]. عوامل حاوی اتم‌های اکسیژن (مانند اپوکسید، کربوکسیل و هیدروکسیل) بر روی GnP-C750 بیشتر از GnP-5 هستند و به همین دلیل GnP-C750 می‌تواند با

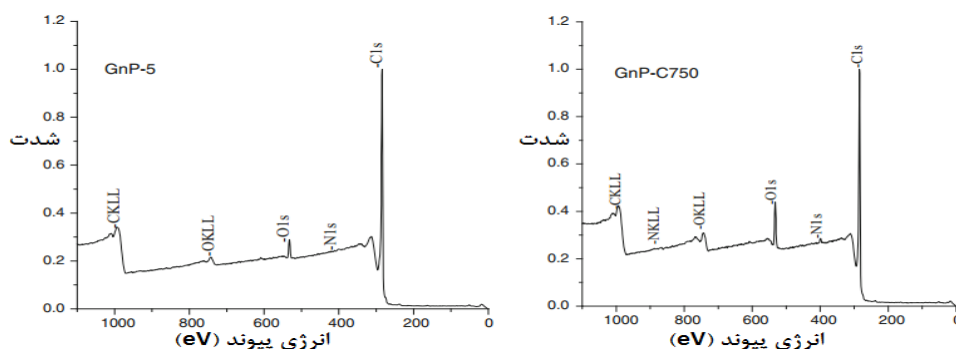


شکل ۹ تصاویر SEM: از پراکندگی ۳ درصد وزنی GnP-C750 در کامپوزیت GnP-C750/CTBN- اپوکسی با، (الف) بزرگ‌نمایی کم و (ب) بزرگ‌نمایی بالا، از پراکندگی ۳ درصد وزنی GnP-C5 در کامپوزیت GnP-C750/CTBN- اپوکسی با، (ج) بزرگ‌نمایی کم و (د) بزرگ‌نمایی بالا [۲۲].

قبلاً نیز Fuzhong Wang و همکارانش اثر اندازه و پراکندگی GnP بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را بررسی کرده بودند. تحلیل GnP با XPS (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که گروه‌های عاملی اکسیژن بیشتری در GnP-C750 نسبت به GnP-



شکل ۱۰ خواص کششی و خمشی اپوکسی خالص، کامپوزیت اپوکسی شامل ۱۰ درصد وزنی CTBN و کامپوزیت اپوکسی - GnP/CTBN [۲۲].



شکل ۱۱ تحلیل XPS برای GnP-5 و GnP-C750 [۲۳].

و اثر کربنی شدن کاتالیستی (Catalytic Carbonization) قوی در طول احتراق، عوامل ایده‌آلی هستند [۲۵].
Osman Eksik و همکارانش، روش جدیدی برای افزایش رسانش حرارتی نانوکامپوزیت اپوکسی با استفاده از توپ‌های پلی‌متیل-متاکریلات (Poly-Methyl-Methacrylate (PMMA) Balls پوشش داده شده با گرافن گزارش دادند. قطر PMMA در محدوده ۲۰۰-۳۰۰ nm با استفاده از پلیمری شدن تعلیقی سنتز شد. این توپ‌ها با کاهش شیمیایی اکسید گرافن پوشش داده شد تا افزودنی پوسته هسته ایجاد شده و در اپوکسی پراکنده شود. اندازه‌گیری‌های رسانش حرارتی نمونه‌های بالک از نانوکامپوزیت اپوکسی-PMMA با پوشش گرافنی (GPMMA) انجام شده و با نمونه‌های پایه شامل نانورق‌های گرافنی (نه در شکل هسته پوسته) پراکنده در رزین اپوکسی، مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن ۱ درصد وزنی GPMMA رسانش حرارتی را ۷ برابر افزایش می‌دهد. در مقابل، افزودن ۱ درصد وزنی نانوساختارهای گرافن (نه در شکل هسته پوسته) رسانش حرارتی نانو کامپوزیت را تنها در حدود ۳ برابر افزایش می‌دهد. این بهبود در عملکرد حرارتی به علت پراکندگی بیشتر و بهبود مسیر رسانش فونون (Phonon)

زمینه پلیمر سازگارتر باشد. غلظت بالاتر اکسیژن در GnP-C750، به علت لبه‌های بیشتر و آن هم به علت اندازه کوچک‌تر است [۲۳].

۲-۵ خواص الکتریکی

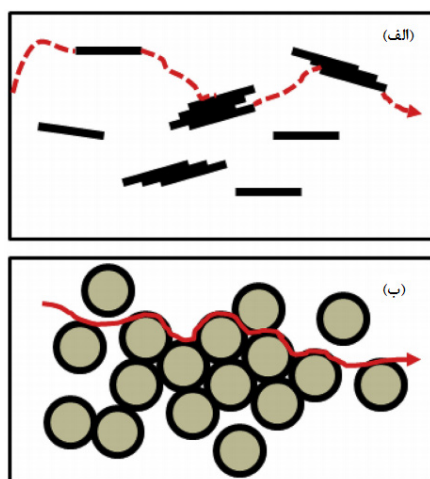
انتخاب محتوای گرافن مورد استفاده در مواد کامپوزیتی چند بعدی براساس آستانه نفوذ نانوکامپوزیت‌های عامل دار شده با NH_2 است. شکل ۱۲ رسانش الکتریکی نانوکامپوزیت رزین اپوکسی تقویت شده با مقدار گرافن ۵، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد وزنی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود رسانش الکتریکی در محدوده ۸ تا ۱۲ درصد وزنی به شدت افزایش می‌یابد. می‌توان تأیید کرد که آستانه نفوذ در محدوده زیر ۸ درصد وزنی برای گرافن به مقدار ۱۰-۵ S/m می‌رسد. رسانش الکتریکی تا ۱۰-۴ S/m برای غلظت ۱۲ درصد وزنی گرافن، افزایش می‌یابد [۲۴].

۳-۵ خواص حرارتی

گرافن دو بعدی با سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی و ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی، قابلیت بیشتری را نسبت به افزودنی‌های بازدارنده شعله برای پلیمرها دارد. در میان عامل‌های شیمیایی گرافن، به نظر می‌رسد ترکیبات سفر یا نیتروژن به دلیل ویژگی‌های زیست‌سازگاری

جدول ۳ ترکیب اتمی GnP-5 و GnP-C750 بر اساس تحلیل XPS

عنصر (درصد اتمی)	C	O	N	O به C
GnP-5	۹۵/۸۲	۴/۰۱	۰/۱۷	۰/۰۴۱۸
GnP-C750	۸۹/۴۸	۸/۷۹	۱/۷۳	۰/۰۹۸۲



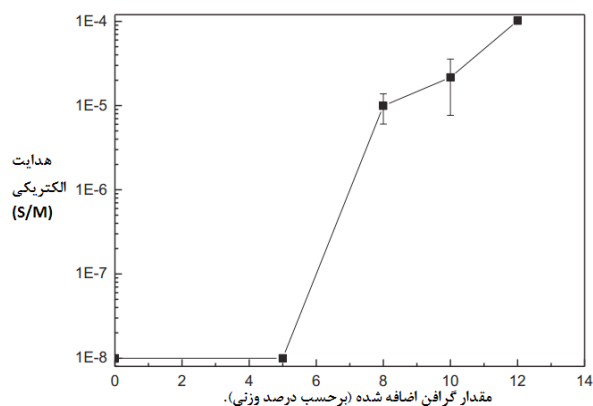
شکل ۱۳ سازوکار رسانش گرما: (الف) کامپوزیت اپوکسی - GPL و (ب) کامپوزیت اپوکسی - GPMMA [۲۶].

پلیمرها، اکسید گرافن کاهش یافته (Reduced Graphene Oxide (RGO)، اغلب به واسطه سازگاری سطحی ضعیف خود با ماتریس، محدود شده است. در پژوهشی، بازدارنده شعله جدیدی حاوی عناصر فسفر، نیتروژن و سیلیکون برای عامل دار کردن RGO استفاده شد. زنجیره‌های بازدارنده شعله باعث بهبود پراکندگی و سازگاری RGO در زمینه اپوکسی می‌شود. در نتیجه، خواص مکانیکی، حرارتی و بازدارنده شعله کامپوزیت پایه اپوکسی با افزودن عامل جدید بازدارنده شعله RGO، بهبود می‌یابد. قله انتشار گرما، انتشار گرمای کل و تولید دود کل، به ترتیب تا ۳۴، ۱۴ و ۳۰ درصد در مقایسه با رزین خالص کاهش می‌یابد. تجزیه و تحلیل بر اساس تحلیل زغال (Char Analyses) نشان می‌دهد که افزایش در بازدارندگی شعله به علت سوختن لایه‌های بالایی، با استحکام و پایداری حرارتی بالای گرافن، اثر ذغال شدن عناصر فسفر و نیتروژن و اثر افزایش عنصر سیلیکون در پیوند زنجیره‌ها در برابر شعله است [۲۵].

۶ اپوکسی - CNF

۱-۶ خواص مکانیکی

بررسی اثر افزودنی‌های CNF به زمینه SC-15 در خواص مکانیکی، افزایش ۱۷ درصدی استحکام کششی و ۱۵ درصدی سختی کششی را نشان می‌دهد [۲۷]. در پژوهش دیگری، انرژی شکست اپوکسی اصلاح شده



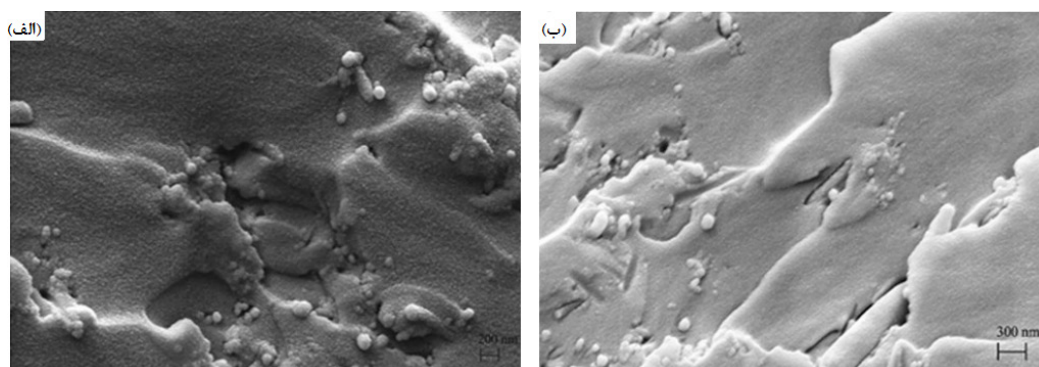
شکل ۱۲ رسانش الکتریکی نانوکامپوزیت رزین اپوکسی - گرافن [۲۴].

برای افزودنی هسته پوسته GPMMA است. همان‌طور که در شکل ۱۳ (ب) نشان داده شده است، ذرات هسته پوسته گرافن، مسیر رسانش فونون پیوسته‌تری را در مقایسه با مورد معمول (شکل ۱۳ (ب)) ایجاد می‌کنند. در موارد معمول، پراکندگی فونون در رابط گرافن-پلیمر، انتقال فونون را محدود می‌کند. مسیر آزاد فونون‌ها در هر ماده، تحت تأثیر فرایندهای پراکندگی مختلف است که می‌توانند در طول رسانش فونون اتفاق بیفتند. فونون‌های صوتی حرارتی، به واسطه موارد دیگری همچون خطوط اتصال، پراکنده می‌شوند [۲۶].

Yan-Jun Wan و همکارانش، کامپوزیت اپوکسی-اکسید گرافن و اکسید گرافن عامل دار شده با (Diglycidyl Ether of Bisphenol-A (DGEBA) که در سطوح مختلف بارگذاری پرکننده را تهیه کردند. ارتباط بین سطح اصلاح شده، ریزساختار، پراکندگی و تعامل بین فضایی ورق‌ها و خواص مکانیکی و حرارتی این ترکیبات مورد بررسی قرار گرفت. عملکرد و کارکرد لایه DGEBA به طور موثر به بهبود سازگاری و انتشار نانورق‌های GO در زمینه اپوکسی کمک می‌کند. تجزیه و تحلیل سطح شکستگی نشان داد که اثر متقابل بین DGEBA-f-GO و زمینه، بهبود یافته است. علاوه بر این، دمای انتقال شیشه‌ای و پایداری حرارتی کامپوزیت اپوکسی-DGEBA-f-GO، افزایش و خواص مکانیکی و حرارتی در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیتی اپوکسی-GO بهبود یافته است [۱].

۴-۵ بازدارندگی شعله

به‌عنوان جایگزین افزودنی مقاوم در برابر شعله برای



شکل ۱۴ تصاویر FESEM از سطوح شکست برای: (الف) ۰/۰۵ درصد وزنی CNF و (ب) ۰/۱ درصد وزنی CNF در نانوکامپوزیت اپوکسی - CNF [۲۸].

۷ نتیجه گیری

توسعه اپوکسی با کارایی بالا مبتنی بر نانومواد کربنی در حال حاضر، تحقیقات زیادی در زمینه خواص مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی، رسانش حرارتی و مقاومت به شعله در کامپوزیت اپوکسی - نانوپرکننده کربنی متمرکز شده است. با این حال، هنوز چالش‌هایی وجود دارد. بهبود عملکرد کامپوزیت اپوکسی از طریق نانومواد کربنی به طور عمده به سه عامل مهم بستگی دارد: خواص ذاتی پرکننده‌ها، پراکندگی و تعامل بین پرکننده‌ها و اپوکسی. با این حال، چگونگی بهبود تعامل بین مواد کربن و زمینه اپوکسی، و جهت‌گیری پرکننده در اپوکسی، برای بررسی بیشتر مورد نیاز است.

نکته کلیدی بررسی تأثیرات نانومواد کربنی بر دمای انتقال شیشه‌ای واکنش‌های شیمیایی و میزان بهبود خواص کامپوزیت اپوکسی است. تحقیق در مورد رزین‌های اپوکسی براق، نیمه‌انعطاف‌پذیر و سفت و سخت و همچنین بررسی تأثیر طول، عرض و ضخامت نانومواد کربنی، مورد نیاز است.

با توجه به مسائل زیست محیطی در حال رشد، توسعه مونومر اپوکسی یا الیگومر (Oligomer) مبتنی بر زیست مواد مشتق شده از منابع تجدیدپذیر برای جایگزینی اپوکسی سنتی یکی از روندهای توسعه است. یکی دیگر از انواع اپوکسی سازگار با محیط زیست، رزین اپوکسی قابل بازیافت است که زنجیره‌ها را می‌توان در شرایط خاص از شبکه اپوکسی جدا کرد. این نوع اپوکسی می‌تواند مانند مواد پلیمری گرمانرم بازیافت شود.

برای استفاده از کامپوزیت‌های اپوکسی، به خصوص

توسط نانورشته‌های کربنی جهت‌دار و تصادفی، بررسی شده است. اضافه کردن ۱/۶ درصد وزنی CNF جهت‌دار، انرژی شکست را حدود ۱۶۰۰ درصد افزایش داد. در مقابل افزودن ۱ درصد وزنی CNF تصادفی، منجر به افزایش ۲۷ درصدی انرژی شکست شد [۱۰]. در شکل ۱۴ تصاویر FESEM از نمونه با پرکننده به مقدار کم ارائه شده است. این تصویر نشان می‌دهد که CNF به خوبی در زمینه پراکنده شده است. تصاویر FESEM از سطوح شکست برای ۰/۱ و ۰/۰۵ درصد وزنی CNF در زمینه اپوکسی نشان داده شده است. هیچ کلوخه‌شدگی وجود ندارد و پراکندگی یکنواخت نانوپرکننده‌ها مشاهده می‌شود. در این موارد، بیرون کشیدگی و قطع (Pull-Out) نانو رشته‌ها منجر به افزایش استحکام نانوکامپوزیت می‌شود. پس از اضافه کردن بیشتر پرکننده (تا ۰۵/۲۵ درصد وزنی)، زمان دستگاه تولید امواج صوتی (Sonication) افزایش می‌یابد اما هنوز هم بعضی از کلوخه‌ها وجود دارد و نانورشته‌های کربنی به خوبی پراکنده نمی‌شوند [۲۸].

۲-۶ رسانش الکتریکی

حضور نقص در امتداد الیاف، نقش مهمی در خواص الکتریکی رزین‌های اپوکسی-آمین تقویت شده با CNF را نشان می‌دهد. بهبود ساختار CNF، رسانش الکتریکی رزین‌ها را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهد و منجر به افزایش رسانش در غلظت‌های بسیار پایین CNF می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۱/۶ درصد وزنی نانورشته‌های کربنی جهت‌دار، رسانش الکتریکی این نانوکامپوزیت‌ها را تا حدود هفت مرتبه به ۱۰-۲۰ افزایش می‌دهد [۱۰].

زمینه‌های در حال ظهور اپوکسی-نانومواد کربنی در سال‌های اخیر بر روی پوشش، زیست‌سازگاری و تجزیه پذیری زیست محیطی، نانوآب‌رسانی و گاز و مواد حافظه شکلی متمرکز شده است. استفاده به‌عنوان پوشش‌های چند لایه، مانند پوشش‌های ضدضربه یا ضدانفجار، ضدخوردگی برای محیط‌های دریایی و پوشش‌های جذب میکروویو برای صنایع هوافضا و برق، کامپوزیت‌های اپوکسی-نانومواد کربن را مهم ساخته است.

در مناطق با فناوری پیشرفته، اپوکسی چند منظوره با تغییر نانومواد کربن، مرحله بعدی است که موضوع تحقیق در آینده خواهد بود. به‌عنوان مثال، کامپوزیت اپوکسی به‌طور گسترده‌ای برای کاربردهای هوافضا و خودرو استفاده شده است. این کاربردها نه تنها خواص مکانیکی بالا، پایداری حرارتی، بلکه همچنین خواص ضدغفونی کننده بالا، خواص ضد شعله، خواص تریبولوژیکی و قابلیت تجزیه زیستی نیز دارند.

مراجع

1. Wan Y.-J., Tang L.-C., Gong L.-X., Yan D., Li Y.-B., Wu L.-B., "Grafting of Epoxy Chains onto Graphene Oxide for Epoxy Composites with Improved Mechanical and Thermal Properties," *Carbon*, 69, 467-480, **2014**.
2. Ladani R. B., Wu S., Kinloch A. J., Ghorbani K., Zhang J., Mouritz A. P., Wang H., "Improving the Toughness and Electrical Conductivity of Epoxy Nanocomposites by Using Aligned Carbon Nanofibres," *Composites Science and Technology*, 117, 146-158, **2015**.
3. Liu S., Chevali V. S., Hui Z. Xu, D., Wang H., "A Review of Extending Performance of Epoxy Resins Using Carbon Nanomaterials," *Composites Part B: Engineering*, 136, 197-214, **2017**.
4. Vajtai R., Springer Handbook of Nanomaterials: Springer Science & Business Media, **2013**.
5. Kuilla T., Bhadra S., Yao D., Kim N. H., Bose S., Lee J. H., "Recent Advances in Graphene Based Polymer Composites," *Progress in Polymer Science*, 35, 1350-1375, **2010**.
6. Prolongo S., Moriche R., Jiménez-Suárez A., Sánchez M., Ureña A., "Advantages and Disadvantages of the Addition of Graphene Nanoplatelets to Epoxy Resins," *European Polymer Journal*, 61, 206-214, **2014**.
7. Yang S.-Y., Lin W.-N., Huang Y.-L., Tien H.-W., Wang J.-Y., Ma C.-C. M., Li S., Wang Y., "Synergetic Effects of Graphene Platelets and Carbon Nanotubes on the Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Composites," *Carbon*, 49, 793-803, **2011**.
8. Zhao Y., Barrera E. V., "Asymmetric Diamino Functionalization of Nanotubes Assisted by BOC Protection and Their Epoxy Nanocomposites," *Advanced Functional Materials*, 20, 3039-3044, **2010**.
9. Baruah P., Karak N., "Bio-based Tough Hyperbranched Epoxy/graphene Oxide Nanocomposite with Enhanced Biodegradability Attribute," *Polymer Degradation and Stability*, 129, 26-33, **2016**.
10. Ladani R. B., Wu S., Kinloch A. J., Ghorbani K., Zhang J., Mouritz A.P., Wang C.H., "Improving the Toughness and Electrical Conductivity of Epoxy Nanocomposites by Using Aligned Carbon Nanofibres," *Composites Science and Technology*, 117, 146-158, **2015**.
11. Okonkwo A.O., Jagadale P., Herrera J. E. G., Hadjiev V. G., Saldaña J. M., Tagliaferro A., Hernandez F., "High-toughness/low-friction Ductile Epoxy Coatings Reinforced with Carbon Nanostructures," *Polymer Testing*, 47, 113-119, **2015**.
12. Tsai T.-Y., N. Bunekar, Huang C.-C., Huang Y.-S., Chen L.-C., "Novolac Cured Epoxy Resin/fullerene Modified Clay Composites: Applied to Copper Clad Laminates," *RSC Advances*, 5, 95649-95656, **2015**.
13. Cheng Q., Wang J., Jiang K., Li Q., Fan S., "Fabrication and Properties of Aligned Multiwalled Carbon Nanotube-reinforced Epoxy Composites," *Journal of Materials Research*, 23, 2975-2983, **2008**.
14. Cheng Q., Wang J., Wen J., Liu C., Jiang K., Li Q., Fan S., "Carbon Nanotube/epoxy Composites Fabricated by Resin Transfer Molding," *Carbon*, 48, 260-266, **2010**.
15. Liao W.-H., Tien H.-W., Hsiao S.-T., Li S.-M., Wang Y.-S., Huang Y.-L., Wu Y., "Effects of Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalization on the Morphology and Mechanical and Thermal Properties of Carbon Fiber/vinyl Ester Composites," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5, 3975-3982, **2013**.
16. Kotsilkova R., Ivanov E., Bychanok D., Paddubskaya A., Demidenko M., Macutkevicius J., Maksimenko S., Kuzhir P., "Effects of Sonochemical Modification of Carbon Nanotubes on Electrical and Electromagnetic Shielding Properties of Epoxy Composites," *Composites Science and Technology*, 106, 85-92, **2015**.
17. Wang S., Qiu J., "Enhancing Thermal Conductivity of Glass Fiber/polymer Composites Through Carbon Nanotubes Incorporation," *Composites Part B: Engineering*, 41, 533-536, **2010**.
18. Biercuk M., Llaguno M. C., Radosavljevic M., Hyun J., Johnson A. T., Fischer J. E., "Carbon Nanotube Composites for Thermal Management," *Applied Physics Letters*, 80, 2767-2769, **2002**.
19. Gardea F., Lagoudas D. C., "Characterization of Electrical and Thermal Properties of Carbon Nanotube/epoxy Composites," *Composites Part B: Engineering*, 56, 611-620, **2014**.
20. Shabestari M. E., Kalali E. N., González V. J., Wang D.-Y., Fernández-Blázquez J. P., Basella J., "Effect of Nitrogen and Oxygen Doped Carbon Nanotubes on Flammability of Epoxy Nanocomposites," *Carbon*, 121, 193-200, **2017**.
21. Atif R., Shyha I., Inam F., "The Degradation of Mechanical Properties Due to Stress Concentration Caused by Retained Acetone in Epoxy Nanocomposites," *RSC Advances*, 6, 34188-34197, **2016**.
22. Wang F., Drzal L. T., Qin Y., Huang Z., "Enhancement

- of Fracture Toughness, Mechanical and Thermal Properties of Rubber/epoxy Composites by Incorporation of Graphene Nanoplatelets," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 87, 10-22, **2016**.
23. Wang F., Drzal L. T., Qin Y., Huang Z., "Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Graphene Nanoplatelet/epoxy Composites," *Journal of Materials Science*, 50, 1082-1093, **2015**.
24. Moriche R., Sánchez M., Jiménez-Suárez A., Prolongo S., Ureña A., "Electrically Conductive Functionalized-GNP/epoxy Based Composites: From Nanocomposite to Multiscale Glass Fibre Composite Material," *Composites Part B: Engineering*, 98, 49-55, **2016**.
25. Feng Y., He C., Wen Y., Ye Y., Zhou X., Xie X., Mai Y., "Improving Thermal and Flame Retardant Properties of Epoxy Resin by Functionalized Graphene Containing Phosphorous, Nitrogen and Silicon Elements," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 103, 74-83, **2017**.
26. Eksik O., Bartolucci S. F., Gupta T., Fard H., Borca-Tasciuc T., Koratkar N., "A Novel Approach to Enhance the Thermal Conductivity of Epoxy Nanocomposites Using Graphene Core-shell Additives," *Carbon*, 101, 239-244, **2016**.
27. Pervin F., Zhou Y., Rangari V. K., Jeelani S., "Testing and Evaluation on the Thermal and Mechanical Properties of Carbon Nano Fiber Reinforced SC-15 Epoxy," *Materials Science and Engineering: A*, 405, 246-253, **2005**.
28. Shokrieh M. M., Esmkhani M., Vahedi F., Shahverdi H. R., "Improvement of Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Resin with Carbon Nanofibers," *Iranian Polymer Journal*, 22, 721-727, **2013**.

