

تحلیل و بررسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی / نانوالیاف کربنی اصلاح شده: مطالعه پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

۱ محمدحسین کرمی*، امید معینی جزینی*، محمدعلی اطمینانی اصفهانی^آ، وحید یزدانیان^آ
 ۱. اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی
 ۲. تهران، دانشگاه ملی مهارت، گروه صنایع شیمیایی
 ۳. تهران، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، گروه فناوری اطلاعات

چکیده ...

نانوکامپوزیت‌های پلیمری به‌عنوان جایگزینی مناسب برای مواد فلزی و پلیمری شناخته می‌شوند و در بسیاری از موارد عملکرد بهتری دارند. این مواد به‌ویژه به دلیل سبکی، استحکام بالا و هزینه کم در صنایع مختلف از جمله حمل‌ونقل، خودروسازی، هوافضا و ساخت کشتی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهند که افزودن نانوالیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی باعث بهبود قابل توجه خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، مدول و چقرمگی شکست می‌شود. همچنین نانوالیاف کربنی موجب افزایش پایداری حرارتی رزین‌ها و کاهش سرعت تخریب آن‌ها در دماهای بالا می‌شود. استفاده از روش‌های نوین همچون اصلاح سطحی نانوالیاف و روش‌های مخلوط‌سازی پیشرفته، بهبود قابل توجهی در پراکندگی نانوالیاف در ماتریس رزین اپوکسی و افزایش خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها به همراه دارد. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانوالیاف کربنی به‌ویژه در مقایسه با دیگر مواد تقویت‌کننده، عملکرد بهتری در حفظ خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی دارند. این تحقیق به تحلیل تأثیر نانوالیاف کربنی بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌پردازد. همچنین این پژوهش به مرور پیشرفت‌های اخیر و نتایج مهم در زمینه ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی خواهد پرداخت.

واژه‌های کلیدی:

رزین اپوکسی،
 نانوالیاف کربنی اصلاح شده،
 مورفولوژی،
 خواص مکانیکی،
 تخریب گرمایی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

karami.polymerpostdoc@gmail.com, o.moini@eng.ui.ac.ir

۱ مقدمه

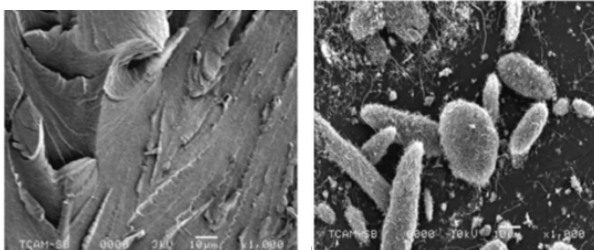
در این پژوهش به بررسی اثر نانو الیاف کربنی بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و هیبرید نانو کامپوزیت های اپوکسی پرداخته می شود. همچنین در ادامه این پژوهش، به بررسی پیشرفت های اخیر و نتایج مهم در مورد ساخت نانو کامپوزیت های اپوکسی می پردازد.

۲ مورفولوژی

پژوهشگران به بررسی اثر نانوالیاف کربنی بر مورفولوژی رزین اپوکسی پرداخته اند. نتایج نشان داده نانوالیاف کربنی به صورت خوشه ها یا دسته هایی با قطر حدود ۱۰ میکرومتر مشاهده می شوند که به عنوان نقاط تمرکز تنش درون نانوکامپوزیت های اپوکسی عمل می کنند [۸]. همچنین نانوالیاف کربنی، به طور یکنواخت و به خوبی در ماتریس رزین پراکنده شده اند. با این حال، نانوکامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی حاوی ۳ درصد وزنی، نشان دهنده تجمعات کلوخه ای هستند. با افزایش درصد وزنی نانوالیاف کربنی به بیش از یک درصد وزنی، پراکندگی نانوالیاف کربنی در ماتریس رزین اپوکسی ضعیف می شود [۹].

نتایج میکروسکوپ الکترونی نشان داده با افزودن الیاف نانوکربن به اپوکسی، سطح شکست به طور قابل توجهی زبرتر می شود که نشان دهنده این است که مسیر نوک ترک به دلیل وجود الیاف نانوکربن دچار انحراف می شود و این امر باعث می شود که گسترش ترک دشوارتر شود (شکل ۱). در سامانه حاوی ۲ درصد وزنی نانوالیاف کربنی، الیاف نانو به خوبی جدا شده و به طور یکنواخت در رزین اپوکسی قرار گرفته اند. اما زمانی که محتوای نانوالیاف کربنی به ۳ درصد وزنی افزایش می یابد، شکست ماده در ذره بزرگ که به نظر می رسد تجمعی از چندین نانولیف کربنی باشد، آغاز می شود [۱۰]. این شکست ناشی از تمرکز تنش ایجاد شده توسط نانوالیاف کربنی تجمع یافته است. در

امروزه کامپوزیت ها جایگزین مناسبی برای مواد فلزی و پلیمری شناخته می شوند و در بسیاری از موارد عملکرد بهتری دارند. دلیل اصلی برتری کامپوزیت ها، سبکی، استحکام و هزینه کمتر آن ها نسبت به مواد معمول است [۱]. کامپوزیت های زمینه پلیمری با قرار گرفتن الیاف یا ذرات تقویت کننده در زمینه پلیمری، خواص فیزیکی و مکانیکی بهتری نسبت به مواد پایه خود دارند. این کامپوزیت ها به دلیل ویژگی های شیمیایی خوب و مقاومت در برابر خوردگی، در صنعت حمل و نقل برای کاهش هزینه های سوخت و تولید استفاده می شوند [۲]. همچنین، به دلیل استحکام بالا، وزن سبک و هزینه تولید پایین، عمر مفید قطعات را افزایش می دهند و هزینه های تعمیر و نگهداری را کاهش می دهند. رزین اپوکسی پلیمر گرماسخت با هزینه عملکرد پایین است که به دلیل ویژگی هایی مانند استحکام بالا، مقاومت به خزش و چسبندگی مناسب، در سال های اخیر در ساخت کامپوزیت های پلیمری کاربرد گسترده ای یافته است [۳]. این رزین به ویژه در صنایع کشتی سازی، هوافضا و اتومبیل سازی مورد استفاده قرار می گیرد. تقویت کننده ها در کامپوزیت های زمینه پلیمری می توانند از منابع طبیعی و تجدیدپذیر مانند الیاف گیاهی، چوب های بازیافتی، ضایعات کشاورزی و الیاف مصنوعی مثل آرامید، کربن و شیشه تهیه شوند [۴]. در این کامپوزیت ها، الیاف باعث افزایش سختی و استحکام شده و خواص فاز زمینه را بهبود می دهند. خواص مکانیکی کامپوزیت ها به استحکام الیاف، پایداری شیمیایی، استحکام زمینه و اتصال قوی بین آن ها بستگی دارد که می تواند عملکرد کامپوزیت را بهبود بخشد [۵]. امروزه استفاده از ذرات بسیار ریز با توانایی ایجاد تغییرات چشمگیر تحت عنوان فناوری نانو، تأثیر زیادی بر علم مهندسی داشته است. یکی از این مواد، نانوذرات رس است که علاوه بر قیمت مناسب نسبت به نانو مواد دیگر، خواص مکانیکی و مقاومت به سایش قابل توجهی دارد. مهم ترین چالش در ساخت کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با نانوذرات، توزیع یکنواخت این ذرات در ماتریس پلیمری است [۶]. برای دستیابی به بهترین عملکرد، ضروری است که نانوذرات به طور یکنواخت در زمینه پلیمری پراکنده شوند تا تنش به طور مؤثر از زمینه ضعیف به نانوذرات مستحکم منتقل شود. این انتقال مؤثر تنش بین نانوذرات و پلیمر، عامل کلیدی در بهبود خواص این کامپوزیت ها است؛ بنابراین، فرایند تولید که تعیین کننده توزیع نانوذرات است، تأثیر زیادی بر ویژگی های نهایی کامپوزیت خواهد داشت [۷].



شکل ۱ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترونی (سمت چپ) رزین اپوکسی و سمت راست نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۳ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی.

درجات پراکندگی به دست آمده وجود دارد [۱۴]. در مورد رزین اپوکسی تقویت شده با نانوالیاف اصلاح نشده، درجه پراکندگی ضعیف است. زمانی که نانوالیاف کربنی با گروه آمینی اصلاح شدند، نتایج نشان داد به طور یکنواخت تری در ماتریس اپوکسی توزیع شده‌اند [۱۵].

مورفولوژی دو نوع نانوالیاف کربنی اصلاح شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد (شکل ۱) اصلاح سطح بر اثر حرارت می‌تواند منجر به تغییرات مورفولوژی نانوالیاف کربنی در ماتریس رزین اپوکسی شود. همچنین مشخص است نانوالیاف کربنی نوع ۱۱۰۰، اتصال بهتری در مقایسه با نانوالیاف کربنی نوع ۲۵۰۰ دارد [۱۰].

۳ خواص مکانیکی

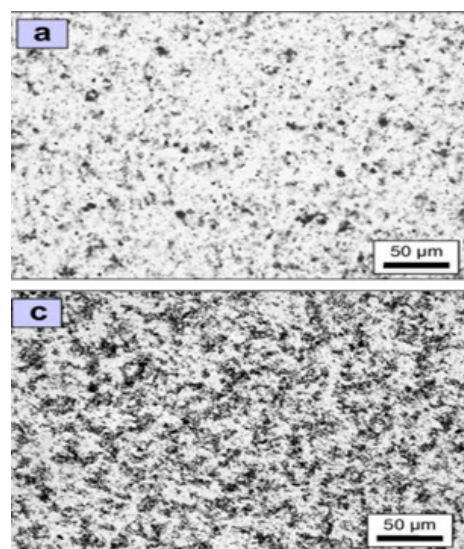
اثر نانوالیاف کربنی اصلاح شده با اسیدسولفوریک با رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می‌دهد که افزودن نانوالیاف کربن به ماتریس اپوکسی تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها دارد. به طور خاص، با افزودن ۰/۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی به رزین اپوکسی، افزایش تقریباً ۳ درصد در استحکام و ۶ درصد در مدول مشاهده می‌شود، همچنین با افزودن ۲ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی، افزایش ۲۰ درصد و ۱۹ درصد در استحکام و مدول به ترتیب ثبت شده است [۱۱]. با این حال، با افزایش بیشتر محتوای نانوالیاف کربنی، هر دو خاصیت شروع به کاهش می‌کنند. این نتایج با داده‌های گزارش شده توسط Choi و همکارانش در مورد کامپوزیت‌های تقویت شده با نانوالیاف کربن مطابقت دارد. به طور کلی، به نظر می‌رسد که پراکندگی نانوالیاف در ماتریس اپوکسی تأثیر زیادی بر بهبود خواص مکانیکی دارد و تجمع نانوالیاف می‌تواند منجر به نقاط تمرکز تنش و کاهش خواص مکانیکی شود. همچنین، وجود حفره‌ها و کاهش قابلیت انعطاف پذیری با افزایش محتوای نانوالیاف کربنی از دیگر عواملی است که بر خواص مکانیکی تأثیر می‌گذارد [۱۲].

در پژوهشی دیگر، اثر درصدهای ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج چقرمگی شکست نشان داد (شکل ۳) با افزودن نانوالیاف کربنی تا مقدار دو درصد وزنی، مقدار چقرمگی شکست افزایش یافت. با افزایش مقدار نانوالیاف کربنی به بیش از ۲ درصد وزنی، چقرمگی شکست کاهش پیدا خواهد کرد [۱۳]. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف

فرایند پراکنش فراصوت، اعمال فشار صوتی متناوب، تعداد زیادی حفره ایجاد می‌کند که می‌تواند به شکستن ذرات تجمع یافته نانوالیاف کربنی در رزین مایع کمک کند. اما زمانی که محتوای نانوالیاف کربنی بیش از ۳ درصد وزنی باشد، مخلوط سازی فراصوت نمی‌تواند به طور کامل از تجمع یا کلوخه‌ای شدن نانوالیاف کربنی جلوگیری کند [۱۱].

در پژوهشی دیگر اثر نانوالیاف کربنی بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد به طور کلی، نانوتقویت کننده به خوبی در ماتریس رزین اپوکسی پراکنده شده است، اما وجود برخی کلوخه‌ای شدن و نواحی خالی از نانوالیاف نیز مشاهده شد. با حضور ۱/۵ درصد وزنی، مساحت نواحی خالی از نانوالیاف چند میکرون بود و زمانی که درصد نانوتقویت کننده به ۵ درصد وزنی افزایش یافت، اندازه آن به ۱ میکرون مربع کاهش یافت [۱۲]. همچنین با افزایش درصد وزنی، مقدار کلوخه‌ای شدن شروع به افزایش قابل توجهی کرد. با این حال خیس شدن نانوالیاف هم در زمانی که به خوبی پراکنده بودند و هم در زمانی که کلوخه‌ای شده بودند، مشاهده شد. همچنین استفاده از روش ورقه سازی منجر به کاهش کلوخه‌ای شدن و خیس شدن نانوالیاف (۵ درصد وزنی) شد [۱۳].

میکروسکوپ نوری با (TOM) در بزرگ‌نمایی پایین به عنوان روشی ساده برای شناسایی تأثیر عوامل مختلف بر توزیع کلی نانوالیاف کربنی (CNFs) در مونومر اپوکسی غیربیخته استفاده شد (شکل ۲). برای هر ترکیب مورد مطالعه، نانو تقویت کننده‌ها به شدت کلوخه ای شدند. با این حال، تفاوت‌های واضحی بین



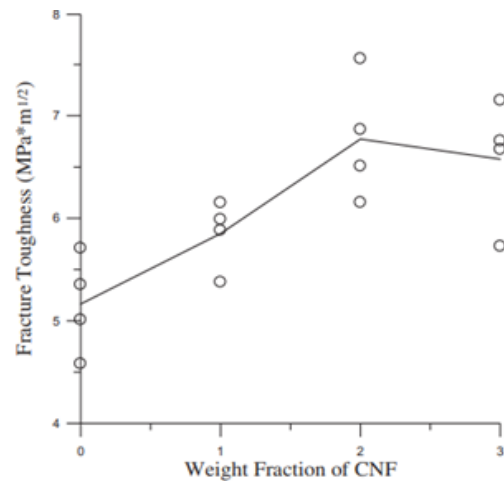
شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ نوری (a). نانوکامپوزیت اپوکسی، (b). نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با آمین.

این مقدار سختی برای کامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌ایمید افزایش نیافته است [۱۵]. علت این است که افزودن پلی‌ایمید گروه‌هایی با اکسیژن بیشتر تولید می‌کند. بنابراین، نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم آمینه فرصت‌های بیشتری برای تشکیل پیوندهای هیدروژنی از طریق هیدروژن در گروه‌های آمینه با اکسیژن در شبکه پلی‌ایمید دارد که به گروه‌های اپوکسی اجازه می‌دهد با گروه‌های آمینه به همراه سخت‌کننده پلی‌آمینوآمید پیوند برقرار کنند. از طرف دیگر، در اپوکسی حاوی پلی‌ایمید گروه‌های حاوی اکسیژن وجود ندارد. بنابراین، گروه‌های آمینه در دی‌اکسیدتیتانیوم با گروه‌های سخت‌کننده برای تعامل با گروه‌های آمینه در رزین اپوکسی رقابت می‌کنند [۱۶].

برای ارزیابی سینتیک پخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، بررسی خواص مکانیکی ضروری است، زیرا افت خواص می‌تواند بر سامانه پخت تأثیر بگذارد. نتایج نشان می‌دهد ۰/۲۵ درصد وزنی نانو الیاف کربنی بیشترین استحکام کششی را ایجاد می‌کند. همچنین، افزودن نانوالیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی موجب افزایش مدول کششی می‌شود و بیشترین افزایش در ۱ درصد وزنی مشاهده می‌شود. برای توزیع مناسب نانو الیاف، از دستگاه هم‌زن فراصوت استفاده شده و مقدار بهینه ۰/۲۵ درصد وزنی تعیین شد. همچنین، گرانیوی نانوکامپوزیت‌ها با زمان هم‌زن و انرژی مصرفی دستگاه تغییر می‌کند [۱۷].

ژانگ و همکاران بررسی کردند عدم حضور الیاف کوتاه کربنی در نانوکامپوزیت اپوکسی باعث افزایش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود. همچنین این تغییرات دمایی، می‌تواند بر درجه پخت رزین اپوکسی تأثیر بگذارد [۱۸].

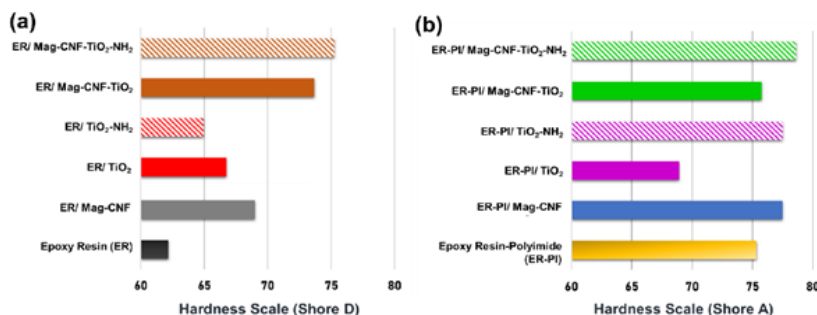
هابرت و همکاران نیز ضریب رسانایی گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی را در حضور نانوالیاف کربن اصلاح‌شده با گروه سیلانی و نانوالیاف کربنی اکسیدشده بررسی کردند. نتایج نشان داد نمونه اصلاح‌شده با گروه سیلانی دارای ضریب رسانایی گرمایی بیشتری است که به دلیل افزایش مقاومت گرمایی در فصل



شکل ۳ نمودار چقرمگی شکست رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی.

کربنی و اپوکسی بررسی شد. تغییر نتایج آزمون استحکام کششی نشان داد که تغییر کسر وزنی رزین اپوکسی می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی شود. همچنین به‌طور کلی، با افزایش درصد وزنی اپوکسی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. این افزایش به دلیل شبکه‌ای شدن اپوکسی است که منجر به افزایش استحکام کششی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. بنابراین از طریق واکنش کوپلیمر شدن شبکه‌ای شده آمینو و اپوکسی، بخش انعطاف‌پذیر در کیتوسان و ساختار سخت در رزین اپوکسی به‌صورت شبکه به یکدیگر متصل می‌شوند و شبکه ایجادشده نقش هم‌افزایی در تقویت و استحکام نانوکامپوزیت‌های ساخته‌شده ایفا می‌کند [۱۴].

پژوهشگران نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌ایمید، نانوالیاف کربنی با دی‌اکسیدتیتانیوم (نانوکامپوزیت آمینه‌شده) را سنتز کردند (شکل ۴). نتایج آزمون مقدار سختی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات دی‌اکسیدتیتانیوم آمینه‌شده کمتر از نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی دی‌اکسیدتیتانیوم است و همچنین



شکل ۴ نمودارهای آزمون سختی (a). نانوکامپوزیت اپوکسی با آزمون سختی نوع (A, B). نانوکامپوزیت اپوکسی با آزمون سختی نوع (A, B).

مکانیکی برای درصدهای کمتر از نانو الیاف منجر شود. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد بهینه‌سازی توزیع نانوالیاف و فرایند پخت می‌تواند به بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها منجر شود [۱۶].

۴ پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

اثر نانوالیاف کربنی بر رزین اپوکسی و نانوآلک بررسی شد. تحلیل نتایج نشان می‌دهند فرایند تخریب حرارتی این ترکیبات شامل چهار مرحله مشخص است که هر یک به واکنش‌های تخریبی خاصی مربوط می‌شود. مرحله اول، که در دمای ۳۶۳ تا ۳۹۳ کلوین اتفاق افتاده است، مربوط به ازدست‌دادن رطوبت و ناخالصی‌های غیرمتصل مربوط می‌شود. مراحل بعدی شامل تخریب گروه‌های پروپیل و بیسفنول در دماهای بالاتر است که منجر به کاهش وزن قابل توجهی می‌شود. افزودن نانوالیاف کربنی به کامپوزیت‌های اپوکسی و نانوآلک، پایداری حرارتی آن‌ها را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش بازده ذغال و دماهای شروع تخریب می‌شود [۱۷]. این یافته‌ها اهمیت نانوالیاف کربنی را به‌عنوان مواد تقویت‌کننده در بهبود خواص حرارتی کامپوزیت‌های مبتنی بر اپوکسی نشان می‌دهند برای کاربردهایی که نیاز به عملکرد در دماهای بالا و مقاومت در خواص ضدشعله، حیاتی است. به‌طور کلی، این نتایج می‌توانند به بهینه‌سازی فرمول‌بندی‌های اپوکسی و نانوآلک و طراحی مواد با خواص حرارتی بهبودیافته برای صنایع مختلف از جمله ساخت‌وساز، خودروسازی و هوافضا کمک کنند [۱۸].

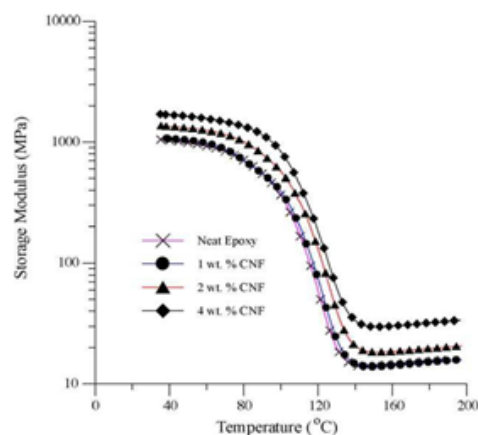
پژوهشگران اثر نانوالیاف کربنی بر تخریب گرمایی و پایداری گرمایی کامپوزیت رزین اپوکسی و پلی‌یورتان بررسی کردند (جدول ۱). نتایج نشان داد حضور نانوالیاف کربنی باعث کاهش دمای اولیه تخریب گرمایی و دمای ۵۰ درصد کاهش وزن نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌شود. همچنین حضور نانوالیاف کربنی منجر به بهبود پایداری گرمایی و افزایش ذغال باقی‌مانده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب کامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌یورتان تا دمای ۳۴۱ درجه سانتی‌گراد پایدار است و در حدود ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل در سه مرحله تجزیه می‌شود [۱۹]. مرحله اول کاهش وزن در دماهای ۲۲۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد به‌دلیل تجزیه بخش پلی‌ال است. کاهش وزن عمده در دماهای ۳۷۷ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد که به تجزیه زنجیره اصلی مربوط می‌شود. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی نیز تا ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار هستند و سپس در دماهای بالاتر تجزیه می‌شوند [۲۰].

مشترک است [۱۹].

مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی بررسی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد با افزودن نانوالیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی، مدول ذخیره افزایش می‌یابد. همچنین افزودن ۴ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی، منجر به افزایش ۷۰ درصدی مقدار مدول ذخیره در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌شود. همچنین با افزودن نانوالیاف کربنی به رزین اپوکسی، دمای انتقال شیشه‌ای از ۱۱۲ درجه سانتی‌گراد به ۱۱۹ درجه سانتی‌گراد، افزایش می‌یابد [۲۰].

پژوهشگران به بررسی خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی به روش قالبگیری خلأ پرداختند. نتایج نشان داد مقاومت برشی نمونه ۰/۱ درصد در مقایسه با نمونه خالص، ۲۳ درصد افزایش داشته است. همچنین نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانوالیاف کربنی، تنها ۸ درصد افزایش جزئی نسبت به نمونه رزین اپوکسی خالص داشت. این افزایش کوچک در نمونه نانوکامپوزیت ۱ درصدی، به‌دلیل پراکندگی ناهمگن نانوالیاف کربنی، درون ماتریس پلیمری یا ترشدن ناهمگن الیاف با ماتریس پلیمری است [۱۴].

در پژوهشی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۱/۵، ۳، و ۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی مورد بررسی قرار گرفت. نانوکامپوزیت حاوی ۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی، خواص مکانیکی بهتری در مقایسه با رزین اپوکسی خالص نشان داد. همچنین، افزودن نانوالیاف کربنی، واکنش پخت رزین اپوکسی را محدود کرد. مقدار درصد وزنی استفاده‌شده از نانوالیاف کربنی، می‌تواند مدول الاستیک را افزایش دهد. از آنجا که رزین تقویت‌شده با نانو به‌طور کامل پخته نشده بود، نیاز پخت بیشتر از (Post-curing Treatment)، پخت اصلی نانوکامپوزیت بود [۱۵]. این امر می‌تواند به بهبود خواص



شکل ۵ نمودار مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی.

جدول ۱ داده‌های به‌دست‌آمده از آزمون تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی.

نام نمونه	دمای اولیه تخریب گرمایی (°C)	دمای ۵۰ درصد کاهش وزن (°C)	دمای ۸۰ درصد کاهش وزن (°C)	درصد ذغال باقی‌مانده در دمای ۸۰۰ (°C)
اپوکس-پلی‌یورتان	۳۴۸/۵	۳۹۲/۱	۴۴۰/۵	۸/۷۴
اپوکسی-پلی‌یورتان-نانوالیاف کربنی	۳۳۲/۹	۳۷۱	۷۱۱/۵	۳۱/۰۸

در پژوهشی دیگر، اثر نانوالیاف کربنی و گلیسیدیل پلی‌هدرال الیگومریک سیلوکسان بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. در جدول ۲، مقادیر دماهای تخریب حرارتی مربوط به دمای ۵ و ۱۰ درصد کاهش و مقادیر ذغال باقیمانده در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این مقادیر برای محیط اکسیژن و نیتروژن اندازه‌گیری شده است [۲۱]. در محیط تخریب گرمایی در محیط اکسیژن، فرایند تخریب حرارتی دو مرحله‌ای برای نمونه‌های تحلیل شده قابل مشاهده است. همچنین افزودن گروه‌های سیلیکونی و نانوالیاف کربنی در ماتریس رزین اپوکسی، به‌طور قابل‌توجهی سازوکار تخریب فرمول‌بندی را تغییر نمی‌دهد. در محیط اکسیژن، مقدار ذغال باقی‌مانده برای رزین اپوکسی خالص در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد، به مقدار صفر می‌رسد. همچنین در هر دو محیط، افزایش مقدار ذغال باقیمانده برای نمونه رزین اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی و گروه سیلیکونی است. بنابراین رزین اپوکسی تقویت‌شده در حضور نانوالیاف کربنی و گروه‌های سیلیکونی منجر به افزایش پایداری گرمایی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌شود [۲۲].

پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی سنتز شده در حضور لیاف کربن اصلاح‌شده با اسیدسولفوریک بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش محتوای پرکننده، پایداری حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. این اثر به دلیل حضور نانوالیاف کربنی اصلاح‌شده در ماتریس اپوکسی است که به نظر می‌رسد اثر تثبیت‌کننده‌ای در برابر تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی ایجاد می‌کند [۲۳]. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی سنتز شده با ۳ درصد وزنی نانوالیاف کربنی اصلاح‌شده، حدود ۱۸ درصد ذغال باقی‌مانده پس از تخریب گرمایی کامل در دمای ۵۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شده است؛ درحالی‌که برای نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌نشده در حضور ۳ درصد وزنی نانوالیاف کربنی، حدود ۱۰ درصد ذغال باقی می‌ماند [۲۴]. تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی دو نوع نانوالیاف کربنی اصلاح‌شده در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۵۰۰ درجه سانتی‌گراد بررسی شد. نتایج نشان داد اصلاح سطح نانوالیاف کربنی در مرحله اول تخریب گرمایی، تأثیری ندارد. همچنین تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در دو مرحله

جدول ۲ داده‌های آزمون گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی به‌دست‌آمده از آزمون گراموزن‌سنجی.

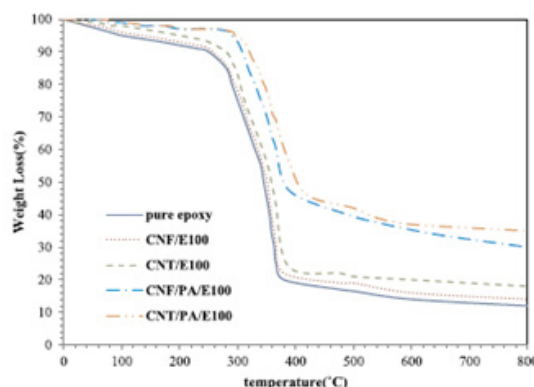
نمونه	دمای ۵ درصد کاهش وزن	دمای ۱۰ درصد کاهش وزن	درصد ذغال باقی‌مانده در دمای ۸۰۰ (°C)	دمای ۵ درصد کاهش وزن	دمای ۱۰ درصد کاهش وزن	درصد ذغال باقی‌مانده در دمای ۸۰۰ (°C)
محیط نیتروژن			محیط اکسیژن			
رزین اپوکسی	۳۴۳	۳۷۳	صفر	۳۵۴	۳۷۵	۱۱
رزین اپوکسی / ۵ درصد وزنی پلی‌سیلوکسان	۳۵۰	۳۷۶	۲	۳۶۳	۳۷۷	۱۶
رزین اپوکسی / ۵ درصد وزنی نانوالیاف کربنی	۳۶۸	۳۷۷	۲	۳۵۷	۳۷۳	۲۴
رزین اپوکسی / ۵ درصد وزنی پلی‌سیلوکسان / ۵ درصد وزنی نانوالیاف کربنی	۳۷۵	۳۸۵	۴	۳۶۹	۳۸۱	۲۶

کربنی با دی‌اکسیدتیتانیوم (نانوکامپوزیت آمینه‌شده) را سنتز کردند (شکل ۷). نتایج آزمون تخریب گرمایی نشان می‌دهد سازوکار تخریب گرمایی دومارحله‌ای است. تخریب گرمایی رزین اپوکسی و پلی‌آمید به ترتیب در محدوده دمایی ۳۰۵ تا ۳۱۲ درجه سانتی‌گراد و ۵۱۰ تا ۵۱۵ درجه سانتی‌گراد است [۲۷]. همچنین ذغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت اپوکسی کمتر از ذغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌آمید است. به احتمال زیاد به دلیل تغییرات غیرمنتظره در ساختارهای شیمیایی رزین اپوکسی که در واکنش‌های مکانیک پیش‌بینی نشده است، ممکن است منجر به واکنش‌های ناموفق شود. بنابراین می‌تواند، عملکرد رزین اپوکسی، پلی‌ایمید و ترکیبات پرکننده پلیمری را مختل کنند [۲۸].

اثر ۲۱ و ۴ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد افزودن نانوالیاف کربنی و مقادیر اضافه‌شده تأثیری بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی نداشته است. این تحقیقات بر روی رزین اپوکسی (SC-101)، از نوع دی‌گلیسیدیل‌اتریس فنول انجام شده است [۲۹].

۵ پیشرفت‌های اخیر

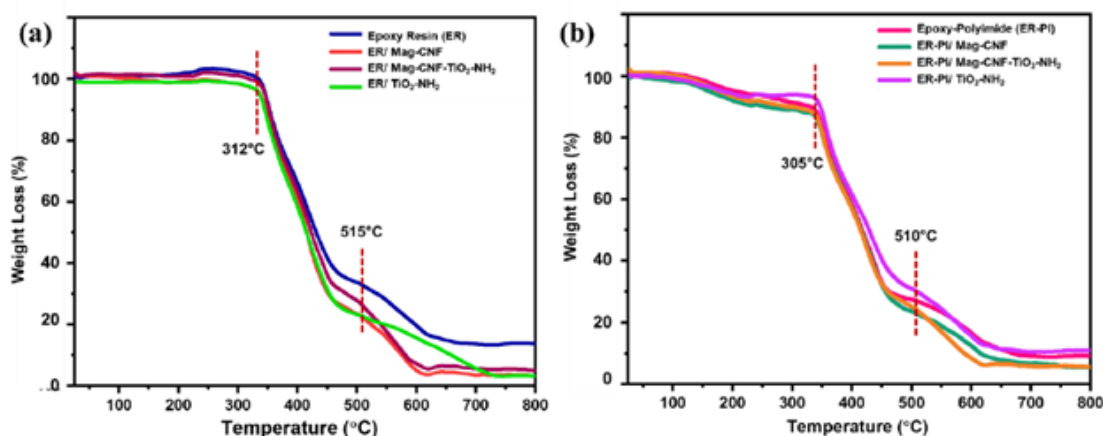
اثر نانوالیاف کربنی و نانوسیلیکا بر خواص انتقال حرارت رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن ۰/۴ درصد وزنی از نانوذرات به رزین اپوکسی، منجر به افزایش ۶۷ درصدی در هدایت حرارتی و ۴۳ درصدی در استحکام ضربه‌ای نسبت به رزین اپوکسی خالص شده است. این بهبودها به دلیل ویژگی‌های گرافیتی کربن یک‌بعدی و اندازه بهینه نانوذرات سیلیکا است که مسیرهای بیشتری برای دفع حرارت فراهم



شکل ۶ نمودار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی.

اتفاق می‌افتد. مرحله اول تخریب گرمایی در محدوده دمایی بین ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد و همچنین مرحله دوم تخریب گرمایی در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۲۵].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوالیاف کربنی و نانولوله‌های کربنی چنددیواره بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی و پلی‌آکریلونیتریل بررسی شد (شکل ۶). نتایج نشان داد، بهبود پایداری دما در حضور هم‌زمان نانوذرات می‌تواند به دلیل هدایت حرارتی بالای این نانوپرکننده‌ها باشد که می‌تواند مسیر انتقال حرارت داخل کامپوزیت را افزایش دهد و از تشکیل نقاط حرارتی درون کامپوزیت جلوگیری کند. به این ترتیب از تخریب حرارتی جلوگیری می‌شود. علاوه بر این، در نانوکامپوزیت ساخته‌شده، حضور منافذ در نانوذرات ممکن است حرکات حرارتی پلیمر را کاهش دهند. بنابر تخریب زنجیره‌های پلیمر نیز با افزایش محتوی نانوپرکننده‌ها به آرامی صورت می‌گیرد [۲۶]. پژوهشگران نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌آمید، نانوالیاف



شکل ۷ نمودارهای تخریب گرمایی (a). رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، (b). رزین اپوکسی حاوی پلی‌آمید و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی.

مولیدون دی سولفید، مکسن و نانوالیاف کربنی برای افزایش خواص مکانیکی رزین اپوکسی استفاده کردند [۳۳]. این هیبرید نانوکامپوزیت می‌تواند منجر به افزایش خواص حرارتی رزین اپوکسی و انتقال حرارت مداوم و جهت‌دار را درون ماتریس رزین اپوکسی ایجاد کرده است. همچنین، نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده پتانسیل بالایی در کاربردهای سایشی نشان دادند. این مطالعه راهنمایی مهم برای توسعه کامپوزیت‌های پلیمری با عملکرد بالا در زمینه پیشرفته سایشی ارائه می‌دهد [۳۴].

در حال حاضر، نانولوله‌های کربنی (CNTs) و گرافن (GA) به دلیل خواص منحصر به فرد خود به طور گسترده‌ای به عنوان مواد پرکننده برای بهبود عملکرد کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRE) استفاده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد هر دو دسته نمونه حاوی ترکیبات فرار زیاد (۶۴٪) و عنصر کربن (۳۰٪) هستند و تخریب گرمایی در دمای ۳۰۰ تا ۴۶۵ درجه سانتی‌گراد با کاهش وزن ۳۸ تا ۴۰ درصد قرار دارد [۳۵]. همچنین، سینتیک تخریب گرمایی نشان داد انرژی‌های فعال‌سازی بین ۱۶۲ تا ۱۹۰ کیلوژول بر مول (روش‌های خطی) و ۱۷۱ تا ۱۷۷ کیلوژول بر مول (روش‌های غیرخطی) برآورد شده است. بر اساس این نتایج، CNTs و گرافن اضافه‌شده به کامپوزیت‌های GFRE به عنوان کاتالیزورهای خودکار عمل کرده و به بهبود کمیت ترکیبات فرار به دست آمده کمک می‌کنند، در حالی که ترکیب آن‌ها به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط حرارتی قرار می‌گیرد [۲۹].

پژوهشگران با استفاده از نانوالیاف کربنی و کیتوسان موفق به ساخت هشداردهنده آتش با ساختار شبکه‌ای رزین اپوکسی شدند. نتایج نشان داد در صورت داشتن محتوای اپوکسی کمتر از ۳۵ درصد، به مدت ۱ ثانیه زنگ خطر را فعال کرده و این زنگ خطر را به مدت بیش از ۳۵ دقیقه پس از حذف منبع آتش حفظ می‌کند [۳۰]. این یافته‌ها قابلیت نانوکامپوزیت ساخته‌شده را در کاربردهای مواد مقاوم در برابر آتش نشان می‌دهد و روشی ساده برای طراحی و ساخت کامپوزیت‌هایی با مقاومت در برابر آتش، انعطاف‌پذیری مکانیکی و قابلیت‌های هشداردهنده خطر برای آتش را ارائه می‌دهد [۳۱].

در سال ۲۰۲۵، استفاده از روش آسیاب گلوله‌ای برای سنتز رزین اپوکسی و نانوالیاف کربنی استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از آسیاب گلوله‌ای به عنوان روشی مؤثر برای تنظیم و بهبود خواص الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی با نانوالیاف کربنی، به ویژه از طریق کاهش اندازه ذرات، می‌تواند به توسعه مواد جدید با کاربردهای الکتریکی پیشرفته کمک کند [۳۲]. سنتز نانوالیاف کربنی در حضور سیلیس به عنوان افزودنی‌هایی

می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای این افزودنی‌های جدید برای ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی به عنوان نانوکامپوزیتی با عملکرد بسیار مناسب و نیمه‌هادی است [۲۸]. در پژوهشی دیگر اثر نانوالیاف کربنی بر رزین اپوکسی و نوالاک بررسی شد. نتایج نشان داد افزودن نانوالیاف کربنی به کامپوزیت‌های اپوکسی/نوالاک، پایداری حرارتی آن‌ها را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش ذغال باقی‌مانده و دماهای شروع تخریب می‌شود. این یافته‌ها اهمیت نانوالیاف کربنی را به عنوان مواد تقویت‌کننده در بهبود خواص حرارتی کامپوزیت‌های مبتنی بر اپوکسی نشان می‌دهند، که برای کاربردهایی که نیاز به عملکرد در دماهای بالا و خواص ضد شعله دارند، حیاتی است [۲۹].

پژوهشگران، تأثیر آسیاب گلوله‌ای الیاف نانوکربن بر خواص الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد آسیاب گلوله‌ای به عنوان روش نوین می‌تواند به کنترل خواص الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی الیاف نانوکربن کمک کند. تأثیر زمان آسیاب بر اندازه دانه‌های پودر الیاف نانوکربن مشخص شد و خواص الکتریکی این کامپوزیت‌ها در دامنه فرکانسی ۰/۰۹ هرتز تا ۱ مگاهرتز اندازه‌گیری شد [۳۰]. یافته‌ها حاکی از آن است که خواص الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربن به طور قابل توجهی به اندازه ذرات پرکننده‌ای که در طی آسیاب ایجاد می‌شود، وابسته است. بنابراین، آسیاب گلوله‌ای می‌تواند به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود خواص الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی مورد استفاده قرار گیرد [۳۱].

پژوهشگران، نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور الیاف نانوکربن اسیدی‌شده و کوپلیمر قطعه ای حاوی پلی‌استایرن قطعه‌ای (پلی‌اتیلن-کو-پلی‌بوتیلن قطعه‌ای استایرن) به روش محلولی را سنتز کردند. نتایج نشان می‌دهد که با بارگذاری ۱۰ درصد وزنی از کوپلیمر و ۰/۷۵ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی، کامپوزیت‌ها بالاترین سفتی شکست معادل ۱/۳۹ کیلوژول بر متر مربع را ارائه می‌دهند که نسبت به اپوکسی خالص ۵۰۰ درصد افزایش یافته است؛ در حالی که استحکام کششی به طور جزئی افزایش یافته و بدون ازدست‌دادن استحکام حفظ شده است. بنابراین نانوالیاف کربن خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی را در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، افزایش می‌دهد [۳۲].

کامپوزیت‌های رزین اپوکسی به دلیل مقاومت بالا در برابر خوردگی، توجه زیادی را در کاربردهای صنعت فضایی جلب کرده‌اند. با این حال، عملکرد ضعیف سایشی ماتریس اپوکسی به دلیل شکنندگی و خواص حرارتی ضعیف آن، کاربرد وسیع این مواد را محدود می‌کند. پژوهشگران از نانوذرات

کامپوزیت‌های پلیمری سه‌گانه با افزودن نانوالیاف کربنی اسیدی و پلی‌استایرن بلوک-پلی (اتیلن-کو-بوتیلن)-بلوک-پلی‌استایرن به رزین اپوکسی با استفاده از روش پردازش محلول تهیه شده است. نتایج نشان می‌دهد زمانی که سولفون پلی‌استایرن-بلوک-پلی (اتیلن-کو-بوتیلن)-بلوک-پلی‌استایرن و نانوالیاف کربنی به ترتیب ۱۰ درصد وزنی و ۰/۷۵ درصد وزنی باشد، نانوکامپوزیت ساخته‌شده به بالاترین مقدار چقرمگی شکست (Fracture Toughness) در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌رسند [۲۲].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوالیاف کربنی بر رزین اپوکسی و ملامین بررسی شد. نتایج نشان داد ترکیب نانوالیاف کربن و اپوکسی در اسفنج ملامین می‌تواند به‌عنوان راهکار مؤثر برای ایجاد محافظت از مایکروویو عمل کند. این فناوری می‌تواند در کاربردهای مختلفی از جمله در سامانه‌های الکترونیکی هوشمند و تجهیزات ارتباطی مورد استفاده قرار گیرد [۲۳].

پژوهشگران از رسوب کربنات کلسیم بر روی پوشش اپوکسی حاوی نانوالیاف کربن استفاده کردند. نتایج نشان می‌دهد که هر دو نوع جریان AC و DC با قطبش آندی، رسوب‌گذاری را بر روی سطوح پوشش‌داده‌شده با اپوکسی حاوی نانوالیاف کربن محدود می‌کنند. همچنین نوع جریان اعمال‌شده بر روی شکل رسوب در کاتد تأثیر گذاشت. نتایج این تحقیق برای اولین بار نشان می‌دهد چگونه می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف جریان الکتریکی بر روی پوشش‌های کامپوزیتی الکترودهای پذیر، شکل و توزیع رسوب کربنات کلسیم را کنترل کرد و از تخریب پوشش‌های آلی در پتانسیل‌های بالای قطبش جلوگیری کرد [۲۴].

استفاده از پرکننده‌های هیبریدی آمینه‌شده در کامپوزیت‌های اپوکسی رزین حاوی پلی‌آمید منجر به بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی این کامپوزیت‌ها می‌شود. این بهبودها شامل افزایش استحکام مکانیکی و قابلیت محافظت در برابر امواج الکترومغناطیسی است. همچنین، تجزیه و تحلیل‌های حرارتی نشان می‌دهد پیوندهای شیمیایی بین پلی‌آمید و اپوکسی رزین قوی بوده و این امر به افزایش کارایی کامپوزیت‌ها کمک کرده است [۲۵].

پژوهشگران به‌منظور افزایش خواص مکانیکی، تأثیر نانوالیاف کربنی را بر روی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد افزودن نانوالیاف کربنی گرانیوی رزین اپوکسی را افزایش می‌دهد. همچنین مشاهده شد مقادیر خیس‌پذیری بین رزین و نانوالیاف کربنی بهبود یافته است. از دیگر نکات مهم در این پژوهش، بررسی اثر دمای پخت نانوکامپوزیت اپوکسی بود.

برای بهبود خواص انتقال حرارت ترکیبات قالب‌گیری اپوکسی انجام شد. نتایج نشان داد افزودن ۰/۴ درصد وزنی از نانوالیاف کربنی نانوذرات سیلیکا منجر به افزایش ۶۷ درصدی در هدایت حرارتی و ۴۳ درصدی در استحکام ضربه نسبت به رزین اپوکسی خالص می‌شود. بنابراین حضور هم‌زمان دو نانوذره باعث هم‌افزایی شده و خواص انتقال حرارت را در قالب‌های اپوکسی بهبود بخشیده است [۳۳-۳۵].

در پژوهشی دیگر، با استفاده از نانوالیاف طبیعی مانند سلولز و کیتوسان، خواص مکانیکی رزین اپوکسی را بهبود بخشیدند. نتایج نشان داد که افزودن نانوالیاف به رزین اپوکسی، خواص مکانیکی آن را به میزان ۲۷ تا ۳۹ درصد بهبود بخشیده است. نانوالیاف کیتین به دلیل نسبت ابعادی بالا و چسبندگی بین سطحی قوی، بهترین تقویت‌کننده‌ها بودند [۲۸]. این نانوالیاف باعث افزایش استحکام کششی و قابلیت کشش در هنگام شکست شدند و در نتیجه، نانوکامپوزیت‌های ساخته‌شده را نسبت به رزین اپوکسی خالص مقاوم‌تر کردند. همچنین، ساختار شبکه‌ای نانوالیاف با کاهش ضریب انبساط حرارتی و افزایش دماهای انتقال شیشه‌ای، به بهبود خواص حرارتی کمک کرد. این روش به‌طور مؤثری نانوالیاف زیستی را در رزین اپوکسی ضدآب پراکنده کرده و خواص مکانیکی و حرارتی آن را بهبود بخشیده و معایب رایج رزین اپوکسی مانند شکنندگی و انبساط حرارتی را برطرف کرده است [۱۸].

زیست نانوکامپوزیت‌های تهیه‌شده از رزین‌های اپوکسی زیستی و نانوالیاف سلولزی، به‌عنوان مواد پایدار و سازگار با محیط زیست، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. در پژوهشی، با استفاده از سامانه رزین اپوکسی محلول در آب شامل رزین اپوکسی زیستی پلی‌گلیسرول پلی‌گلیسیدیل‌اتر و رزین اپوکسی انعطاف‌پذیر پلی‌اتیلن‌گلیکول‌دی‌گلیسیدیل‌اتر و سخت‌کننده زیستی ساکاروز پروپیل‌اتر شده، زیست نانوکامپوزیت سنتز شد [۱۹]. نتایج نشان داد نانوکامپوزیت دارای پراکندگی عالی نانوالیاف کربوکسی‌متیل سلولز بوده و با افزایش محتوای آن، استحکام کششی و مدول افزایش می‌یابد که این امر به دلیل اثر تقویتی فوق‌العاده این نانوالیاف است. این یافته‌ها نشان‌دهنده قابلیت بالای این زیست نانوکامپوزیت در دستیابی به مواد پایدار و کاهش وابستگی به منابع نفتی است [۲۰].

اپوکسی به دلیل خواص عالی خود مانند استحکام کششی بالا، سختی زیاد، پایداری شیمیایی قوی و عملکرد حرارتی ممتاز، در کاربردهای عملی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱]. با این حال، شکنندگی آن محدودیت‌هایی را برای پتانسیل‌های بیشتر ایجاد کرده است. در این تحقیق،

جدول ۳ مهم‌ترین نکات در پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی اصلاح‌شده.

نتایج مهم	سال	نام نمونه
کامپوزیتی با خواص مکانیکی مناسب و نیمه‌هادی	۲۰۲۵	اپوکسی-نانو الیاف کربنی-نانوسیلیکا
بهبود خواص حرارتی	۲۰۲۵	اپوکسی-نووالاک-نانو الیاف کربنی
بهبود خواص الکتریکی با روش آسیاب گلوله‌ای	۲۰۲۵	اپوکسی-نانوالیاف کربنی
افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۴	اپوکسی-نانوالیاف کربنی-کوپلیمر قطعه‌ای
افزایش خواص مکانیکی، افزایش خواص گرمایی	۲۰۲۴	اپوکسی-نانوذرات مولیبدن‌دی‌سولفید-مکسن-نانوالیاف کربنی
بهبود فراریت و افزایش خواص گرمایی	۲۰۲۴	اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-گرافن-الیاف شیشه
هشداردهنده آتش-افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۴	اپوکسی-نانوالیاف کربنی-کیتوسان
افزایش خواص الکتریکی با روش سنتز آسیاب گلوله‌ای	۲۰۲۵	اپوکسی-نانوالیاف کربنی
بهبود خواص انتقال حرارت ترکیبات قالب‌گیری اپوکسی	۲۰۲۵	اپوکسی-پلی‌آکریلونیتریل-نانوذرات سیلیکا-نانوالیاف کربنی
افزایش خواص مکانیکی، بهبود پراکنش	۲۰۲۵	اپوکسی-نانوالیاف-سلولز-کیتوسان
زیست اپوکسی-بهبود پراکنش-افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۵	اپوکسی-نانوالیاف کربوکسی متیل سلولز
افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۵	رزین اپوکسی-سولفون پلی‌استایرن-بلوک-پلی(اتیلن-کو-بوتیلن)-بلوک-پلی‌استایرن (SSEBS) - نانوالیاف کربن اسیدی‌شده (CNFs)
پوشش‌های کامپوزیتی الکتروهدایت‌پذیر	۲۰۲۴	اپوکسی-نانو الیاف کربن-کربنات کلسیم
بهبود خواص مکانیکی	۲۰۲۴	اپوکسی رزین-پلی‌آمید تقویت‌شده با نانوالیاف کربنی مغناطیسی حاوی نانوذرات دی‌اکسید تیتانیوم (نانوکامپوزیت آمینه‌شده)
سامانه‌های الکترونیکی هوشمند و تجهیزات ارتباطی	۲۰۲۵	رزین اپوکسی-ملامین-نانوالیاف کربنی
وابستگی خواص مکانیکی به دمای پخت	۲۰۲۵	رزین اپوکسی-نانو الیاف کربنی
افزایش هدایت الکتریکی	۲۰۲۴	رزین اپوکسی-آسفالتن-نانوالیاف کربنی
افزایش پایداری حرارتی و خاصیت محافظتی در برابر نوترون‌ها	۲۰۲۴	رزین اپوکسی-نانوالیاف کربن-نانوذرات اکسید ساماریوم
افزایش هم‌زمان خواص خمشی و بین‌لایه‌ای نانوالیاف کربنی	۲۰۲۴	رزین اپوکسی-نانوالیاف کربنی-نانوالیاف آرامید کربوکسیله‌شده

نانوالیاف کربنی، منجر به افزایش استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌ها تا مقدار ۱۸ درصد شد [۲۷]. کامپوزیت‌های هیبریدی تولیدشده با استفاده از نانوالیاف کربنی، بالاترین هدایت الکتریکی را نشان داد و همچنین هدایت‌های درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای را به ترتیب ۱۷۳ درصد و ۱۹۸ درصد در مقایسه با کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی کربن بهبود بخشید [۲۸].

همچنین مشخص شد خواص مکانیکی به‌طور قابل‌توجهی به دمای پخت وابسته است. افزودن دما در این سامانه، منجر به افزایش تغییر شکل خمشی و سختی شد [۲۶]. به‌منظور بهبود خواص الکتریکی رزین اپوکسی حاوی آسفالتن از نانوالیاف کربنی استفاده شد. نانوالیاف کربنی با هدف هزینه کمتر و پایداری از پیش‌سازهای آسفالتن، به‌عنوان لایه‌های بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندمنظوره قرار گرفت. تقویت با

۶ نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های مختلف، می‌توان نتیجه گرفت نانوالیاف کربنی تأثیرات قابل‌توجهی بر بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی کامپوزیت‌های اپوکسی دارند. افزودن نانوالیاف کربنی به ماتریس رزین اپوکسی باعث بهبود خواص مکانیکی مانند استحکام کششی، مدول و چقرمگی شکست می‌شود. همچنین، این نانوالیاف موجب افزایش پایداری حرارتی رزین‌های اپوکسی و کاهش سرعت تخریب آن‌ها در دماهای بالا می‌شوند. این بهبودها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد نانوالیاف کربنی از جمله هدایت حرارتی بالا و توانایی تقویت ساختار رزین‌ها است. علاوه بر این، استفاده از روش‌های نوین مانند اصلاح سطحی نانوالیاف و استفاده از هم‌زن مافوق صوت، موجب بهبود پراکندگی نانوالیاف در ماتریس رزین اپوکسی و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی و حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. همچنین، افزودن نانوذرات سیلیکا به ترکیب نانوالیاف کربنی باعث بهبود بیشتر خواص حرارتی و الکتریکی این مواد می‌شود. این تحقیقات نشان می‌دهند نانوالیاف کربنی به‌ویژه در مقایسه با دیگر مواد تقویت‌کننده مانند پلی‌یورتان یا پلی‌آمید، عملکرد بهتری در حفظ خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی دارند. از این رو استفاده از نانوالیاف کربنی در صنایع حساس به دما مانند خودروسازی، هوافضا و ساخت‌وساز می‌تواند به طراحی مواد جدید با عملکرد بالا و دوام بیشتر در شرایط دمایی شدید منجر شود. در نهایت این تحقیقات به توسعه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با خواص بهبودیافته کمک کرده و پتانسیل بالایی برای استفاده در فناوری‌های پیشرفته و صنایع مختلف دارند.

پژوهشگران نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوالیاف کربن و اکسیدساماریوم را سنتز کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد نانوکامپوزیت ساخته‌شده با استفاده از نانوالیاف کربن و اکسیدساماریوم به‌عنوان مواد جذب‌کننده نوترون، بهبود قابل‌توجهی در خواص مکانیکی و حرارتی نسبت به کامپوزیت‌های سنتی دارد [۲۹]. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، نسبت‌های بهینه نانوذرات می‌تواند به افزایش پایداری حرارتی و خاصیت محافظتی در برابر نوترون‌ها کمک کند. این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مرجع و راهنما برای طراحی و بهینه‌سازی مواد محافظتی در سامانه‌های حفاظت از تابش هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد. در نهایت، توسعه این نوع کامپوزیت‌ها می‌تواند به پیشرفت‌های قابل‌توجهی در فناوری‌های هسته‌ای کوچک و ایمن منجر شود [۳۰].

در پژوهشی دیگر، به‌منظور افزایش خواص مکانیکی رزین اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی از نانوالیاف آرامید کربوکسیله‌شده استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد نانوالیاف آرامید به‌طور مؤثری می‌توانند خواص مکانیکی رزین اپوکسی و کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن را بهبود بخشند [۳۱]. با افزودن تنها ۰/۴۲ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع از نانوالیاف آرامید منجر به بهبود قابل‌توجهی در مدول ذخیره، استحکام خمشی و مدول خمشی می‌شود. همچنین، حضور نانوالیاف آرامید در نانوکامپوزیت می‌تواند در بهبود استحکام برشی بین لایه‌ای و سختی شکست بین لایه‌ای در مقایسه با سایر نانومواد کربنی عملکرد بهتری داشته باشد. این تحقیق می‌تواند به‌طور هم‌زمان خواص خمشی و بین لایه‌ای نانوالیاف کربنی را افزایش دهد. در جدول ۳ مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی اصلاح‌شده جمع‌آوری شده است [۳۲-۳۵].

مراجع

- Jesiy S. G., Vijayan P. P., Vahabi H., Maria H. J., C.S. A., Thomas S., Sustainable Hybrid Green Nanofiller Based on Cellulose Nanofiber for Enhancing the Properties of Epoxy Resin, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 694, 134082, **2024**.
- O'Leary M., Hartley R., Radhakrishnan A., Mavrogordato M., McMahon T., Kratz J., Interlaminar Properties of Carbon Fibre/Epoxy Laminates Produced Through a Semi-Curing Process, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108488, **2024**.
- Guadagno L., Naddeo C., Raimondo M., Thermal, Mechanical, and Electrical Performance of Structural Epoxy Resins Filled with Carbon Nanofibers, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 13095–13106, **2023**.
- Mikinka E., Whittaker T., Synaszko P., Whittow W., Zhou G., Dragan K., The Influence of Impact-Induced Damage on Electromagnetic Shielding Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Polymer Composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108464, **2024**.
- Yan J., Xu M., Hu X., Liu L., Xiao X., Li B., A Multifunctional Epoxy Composites Based on Cellulose Nanofiber/Carbon Nanotube Aerogels: Simultaneously Enhancing Fire-Safety, Thermal Conductive and Photothermal Performance, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108514, **2024**.
- Xu Y., Liu S., Xu S., Liu G., Li G., Flexible and Flame Retardant Cotton Fiber-Reinforced CS/CNF/EP Composites For a Sensitive Fire Warning, *Chemical Engineering Journal*, 500, 156960, **2024**.
- Saputri D. D., Saraswati T. E., Raharjo W. W., Anggoro P. A., Reinforcement of Epoxy Resin-Polyimide Composites Using Magnetic-Carbon Nanofiber and Titanium Dioxide as Hybrid Filler for Electromagnetic Interference Shielding Material, *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, 28(5), 1012–1031, **2024**.
- Bai G., Niu C., Lang L., Liang X., Gu W., Wei Z., Chen K., Bohinc K., Guo X., In-Situ Formation of Dual-Gradient Hydrogels through Microfluidic Mixing and Co-Extrusion for Constructing an Engineered Antibacterial Platform, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 187, 108497, **2024**.
- Klinthoophthamrong N., Thanawan S., Schrodj G., Mougine K., Goh K.-L., Amornsakchai T., Synergistic Toughening of Epoxy Composite with Cellulose Nanofiber and Continuous Pineapple Leaf Fiber as Sustainable Reinforcements, *Nanomaterials*, 13, 1703, **2023**.
- Chaturvedi R., Pappu A., Tyagi P., Patidar R., Khan A., Mishra A., Gupta M.K., Thakur V.K., Next-Generation High-Performance Sustainable Hybrid Composite Materials from Silica-Rich Granite Waste Particulates and Jute Textile Fibres in Epoxy Resin, *Industrial Crops and Products*, 177, 114527, **2022**.
- Parvizi R., Jalilian M., Dearn K. D., Epoxy Composites Reinforced with Nanomaterials and Fibres: Manufacturing, Properties, and Applications, *Polymer Testing*, 146, 108761, **2025**.
- Shokralla E.A., Dielectric Relaxation and Thermal Stability of Epoxy/Polyurethane-Carbon Nanofiber Composites, *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 6(3), 38-47, **2024**.
- Guadagno L., Pantelakis S., Strohmayer A., Raimondo M., High-Performance Properties of an Aerospace Epoxy Resin Loaded with Carbon Nanofibers and Glycidyl Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane, *Aerospace*, 9, 222, **2022**.
- Panta J., Rider A.N., Wang J., Yang C.H., Stone R.H., Taylor A.C., Brack N., Cheevers S., Zhang Y.X., High-Performance Carbon Nanofiber Reinforced Epoxy-Based Nanocomposite Adhesive Materials Modified with Novel Functionalization Method and Triblock Copolymer, *Composites Part B: Engineering*, 249, 110401, **2023**.
- Guadagno L., Naddeo C., Raimondo M., Thermal, Mechanical, and Electrical Performance of Structural Epoxy Resins Filled with Carbon Nanofibers, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 13095–13106, **2023**.
- Ran Y., Li Y.D., Zeng J.B., Dynamic Crosslinking Towards Well-Dispersed Cellulose Nanofiber Reinforced Epoxy Vitri-mer Composites, *Composites Communications*, 33, 101228, **2022**.
- Çakır M.V., The Synergistic Effect of Hybrid Nano-Silica and GNP Additives on the Flexural Strength and Toughening Mechanisms of Adhesively Bonded Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 122, 103333, **2023**.
- Chu Y.R., Otgonbayar Z., Park G.S., Enhancing the Thermal Conductivity of Epoxy Molding Compounds by Adding SiO₂-Embedded Carbon Nanofibers for Semiconductor Packaging Applications, *Macromolecular Research*, 33, 105–116, **2025**.

19. Wu H., Yi S., Fan L., Wei S., Mao H., Zhang W., Lin L., Li H., Construction and Evaluation of a Heterostructured Composite with Dual Functionality for Enhancing Flame Retardancy and Thermal Insulation Efficiency, *Materials Today Communications*, 45, 112235, **2025**.
20. Bannov A.G., Golovakhin V., Gudyma T.S., Kurmashov P.B., Influence of Ball Milling on the Electrical Properties of Epoxy Composites Filled with Carbon Nanofibers, *Diamond and Related Materials*, 152, 111909, **2025**.
21. Sun W., Gao D., Dianyu E., Synergistic Toughening of Epoxy Resin by Block Ionomers and Carbon Nanofibers, *Engineering Fracture Mechanics*, 311, 110584, **2024**.
22. Zhou Y., Zhang Y., Wang J., He Y., Yuan J., Men X., Well-Aligned MXene@MoS₂/Carbon Nanofiber Aerogels Reinforced Epoxy Composites with Splendid Thermal and Tribological Performance, *Carbon*, 213, 118222, **2023**.
23. Yousef S., Eimontas J., Striugas N., Thermal Decomposition of CNTs and Graphene-Reinforced Glass Fibers/Epoxy and Their Kinetics, *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 869–889, **2024**.
24. Xu Y., Liu S., Xu S., Liu G., Li G., Flexible and Flame Retardant Cotton Fiber-Reinforced CS/CNF/EP Composites for a Sensitive Fire Warning, *Chemical Engineering Journal*, 500, 156960, **2024**.
25. Bannov A.G., Golovakhin V., Gudyma T.S., Kurmashov P.B., Influence of Ball Milling on the Electrical Properties of Epoxy Composites Filled with Carbon Nanofibers, *Diamond and Related Materials*, 152, 111909, **2025**.
26. Chu Y.R., Otgonbayar Z., Park G.S., et al., Enhancing the Thermal Conductivity of Epoxy Molding Compounds by Adding SiO₂-Embedded Carbon Nanofibers for Semiconductor Packaging Applications, *Macromolecular Research*, 33, 105–116, **2025**.
27. Hatano R., Tominaga Y., Imai Y., et al., Preparation Process for Biomass Nanofiber/Bisphenol A-Type Epoxy Resin Composites with Superior Mechanical and Thermal Properties, *Cellulose*, **2025**.
28. Watanabe J., Sugane K., Shibata M., Preparation and Properties of Bionanocomposites Based on Aminated Sucrose-Cured Epoxy Resins and Carboxymethyl Cellulose Nanofibers, *Journal of Polymers and the Environment*, **2025**.
29. Sun W., Gao D., Dianyu E., Synergistic Toughening of Epoxy Resin by Block Ionomers and Carbon Nanofibers, *Engineering Fracture Mechanics*, 311, 110584, **2024**.
30. Yan Y., Ni Q.Q., Carbon Nanofiber-Filled Shape-Memory Epoxy Sponge for Adjustable Microwave Shielding, *Materials Chemistry and Physics*, 315, 129053, **2024**.
31. Edvardsen L., Grandcolas M., Lædre S., Yang J., Lange T., Bjørge R., Gawel K., The Role of Electrical Current Mode in Calcium Carbonate Deposition on Conductive Carbon Nanofiber-Epoxy Coating, *Journal of Applied Polymer Science*, **2024**.
32. Parente J.M., Silva A.P., Reis P.N.B., Impact of Cure Temperature and Suspension Viscosity on the Mechanical Properties of Carbon Nanofiber-Reinforced Epoxy Resin Nanocomposites, *Procedia Structural Integrity*, 61, **2024**.
33. Hussain A., Keyvani P., Cummings R., Multifunctional Hybrid Composites from Novel Asphaltene-Based Carbon Nanofiber Mats and Woven Carbon Fiber, *Journal of Materials Science*, 59, 17018–17042, **2024**.
34. Yu B., Wang W., Zhou G., Song Y., Peng M., Rapid and Scalable Synthesis of Novel Carboxylated Aramid Nanofibers for Simultaneously Improving the Strength and Toughness of Carbon Fiber/Epoxy Laminates, *Composites Science and Technology*, 245, 110320, **2024**.
35. Badeli A., Ehsani M., Karimi M., Grafted-IPN Epoxy/polyurethane Prepolymer; Synthesis, Morphological, Mechanical, and Thermal Properties Investigation of Cured Networks, *Polymer*, 325, 128295, **2025**.

