

پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و اکسید آهن اصلاح شده

محمد حسین کرمی^{۱*}، امید معینی جزینی^{۱*} و حید یزدانیان^۲، محمدعلی اطمینانی اصفهانی^۳

۱. اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

۲. تهران، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات

۳. تهران، دانشگاه ملی مهارت، گروه علوم مهندسی

چکیده ...

رزین اپوکسی به عنوان یکی از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت، به دلیل ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی و تخریب گرمایی، در حوزه‌های مختلفی از جمله پوشش‌ها، چسب‌ها، ترکیبات قالب‌سازی، صنایع فضایی و نانوکامپوزیت‌های پلیمری مقاوم حرارتی کاربرد گسترده‌ای دارد. نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با توزیع و پراکندگی مناسب در ماتریس اپوکسی، به بهبود یکنواختی ساختار و در نتیجه افزایش خواص مکانیکی و پایداری حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها کمک می‌کند. تحقیقات نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند به عنوان راهکاری مؤثر در صنایع مختلف، از جمله ساخت وساز و حفاظت در برابر تابش، بهبود ایمنی مواد پلیمری مورد استفاده قرار گیرند. نانوذرات اکسید آهن نوع آلفا به ویژه، به دلیل خواص بهتر ضدشعله، توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند. این پیشرفت‌ها نه تنها به بهبود عملکرد مواد کمک می‌کند، بلکه افق‌های جدیدی را برای توسعه مواد با کارایی بالا و چندمنظوره در صنعت فراهم می‌آورد. بررسی‌های انجام شده بر روی مورفولوژی سطوح شکست رزین اپوکسی و نانوذرات اکسید آهن نشان می‌دهد که توزیع نانوذرات در ماتریس اپوکسی تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی و دی‌الکتریک این کامپوزیت‌ها دارد. این پژوهش به بررسی تأثیر نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی می‌پردازد و همچنین پیشرفت‌های اخیر و نتایج مهم در زمینه ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده را تحلیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

رزین اپوکسی،
نانوذرات اکسید آهن
اصلاح شده،
مورفولوژی،
خواص مکانیکی،
تخریب گرمایی

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:

o.moini@eng.ui.ac.ir, mh.karami@eng.ui.ac.ir

۱ مقدمه

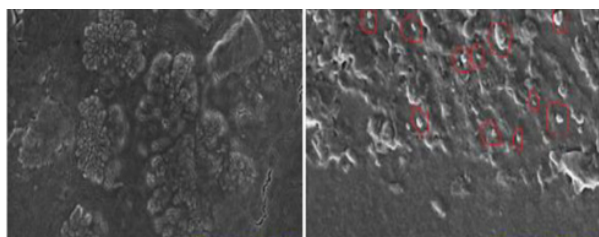
افزایش پایداری حرارتی رزین اپوکسی کمک کنند. این نانوذرات می‌توانند دماهای بالاتر را تحمل کرده، در نتیجه، عملکرد رزین را در شرایط حرارتی سخت بهبود بخشند. به‌طور کلی، استفاده از نانوذرات اکسید آهن در رزین‌های اپوکسی می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی نانوکامپوزیت در کاربردهای مختلف منجر شود [۶].

در این پژوهش به بررسی اثر نانوذرات اکسید آهن اصلاح‌شده بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی پرداخته می‌شود. همچنین در ادامه پژوهش پیشرفت‌های اخیر و نتایج مهم در زمینه ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن اصلاح‌شده، بررسی و تحلیل می‌شود.

۲ مورفولوژی

مورفولوژی سطوح شکست رزین اپوکسی و نانوذرات اکسید آهن بررسی شد (شکل ۱). نتایج نشان داد که بخش‌هایی از نانوذرات اکسید آهن در ماتریس اپوکسی منجر به خوشه‌ای شدن (Cluster) می‌شود. مشخص است که ذرات اکسید آهن در برخی نقاط به‌صورت کلوخه جمع شده‌اند و در برخی نقاط پراکنده هستند. بنابراین توزیع ذرات در ماتریس اپوکسی منجر به تشکیل خوشه می‌شود در نتیجه منجر به کاهش استحکام مکانیکی و کاهش در خصوصیات دی‌الکتریک و پایداری حرارتی می‌شود [۱].

پژوهشگران اثر نانوذرات آهن اصلاح‌شده با کربونیل را بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد در ابتدا ساختار این نانوکامپوزیت به‌صورت هسته‌پوسته است. همچنین مشاهده شد، ساختار نانوذرات آهن اصلاح‌شده در ماتریس رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت به‌صورت کروی است. در صورتی که درصد وزنی رزین اپوکسی بیش از ۳۰ درصد باشد، ساختار کروی نانوکامپوزیت اپوکسی تغییر می‌کند. با افزایش مقدار رزین اپوکسی که به‌صورت ساختار پوسته است، ضخامت پوسته به مقدار ۴۰ تا ۴۹۰ نانومتر افزایش می‌یابد [۲].



شکل ۱ آزمون میکروسکوپ الکترونی نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن [۱].

رزین‌های اپوکسی به‌عنوان ماتریس‌های گرماسخت، در کامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل ویژگی‌های مکانیکی بالا، انقباض کم، مقاومت قابل‌توجه در برابر مواد شیمیایی و خوردگی و چسبندگی مناسب، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در طول فرایند پخت، این رزین‌ها از حالت خطی به شبکه سه‌بعدی گرماسخت تبدیل می‌شوند. ویژگی‌های فیزیکی پخت رزین‌های اپوکسی به عوامل مختلفی از جمله ساختار، درجه پخت، شرایط پخت و زمان و دمای پخت وابسته است. بنابراین، برای دستیابی به رزینی با کارایی و عملکرد بالا، لازم است ارتباط بین ساختار و شبکه‌سازی و خواص نهایی آن را درک کنیم. خواص کامپوزیت‌ها بیشتر تحت تأثیر اندازه ذرات پراکنده، غلظت آن‌ها و نوع واکنش با ماتریس پلیمر قرار دارد [۱]. به همین دلیل، استفاده از نانوذرات مختلف در ماتریس پلیمری، به‌عنوان رویکردی مؤثر برای تقویت خواص مکانیکی و حرارتی پلیمرها شناخته می‌شود. رزین‌های اپوکسی نسبت به گرمانرم‌ها دارای مقاومت بالاتری در برابر حرارت هستند [۲]. با این حال، این رزین‌ها معایبی نیز دارند. این مشکلات می‌توانند کاربردهای رزین‌های اپوکسی را محدود کنند. برای رفع این معایب، استفاده از نانوذرات اکسید آهن اصلاح‌شده پیشنهاد شده است. نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان افزودنی در رزین‌های اپوکسی دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. این نانوذرات می‌توانند تأثیرات قابل‌توجهی بر مورفولوژی، خواص مکانیکی و خواص حرارتی رزین اپوکسی داشته باشند [۳]. در زمینه مورفولوژی، نانوذرات اکسید آهن می‌توانند با توزیع و پخش یکنواخت در رزین اپوکسی منجر به افزایش چسبندگی و کاهش عیوب ساختاری در رزین شوند [۴]. نانوذرات آهن می‌توانند بر ساختار شیمیایی اپوکسی تأثیر بگذارند. این نانوذرات ممکن است با ماتریس اپوکسی واکنش نشان دهند و خواص مکانیکی و شیمیایی آن را تغییر دهند. همچنین، توزیع و پخش یکنواخت نانوذرات در ماتریس اپوکسی به عوامل مختلفی از جمله اندازه نانوذرات، روش تولید و شرایط فرایند بستگی دارد. در صورت توزیع مناسب، نانوذرات می‌توانند به بهبود خواص اپوکسی کمک کنند، اما در صورت توزیع نامناسب، ممکن است تأثیر منفی بر خواص آن داشته باشند.

از نظر خواص مکانیکی، افزودن نانوذرات اکسید آهن به رزین اپوکسی می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی، سختی و مقاومت به‌ضربه شود. این نانوذرات به‌عنوان تقویت‌کننده عمل کرده و می‌توانند خواص مکانیکی کلی ماده را بهبود بخشند [۵]. در خصوص خواص حرارتی، نانوذرات اکسید آهن می‌توانند به

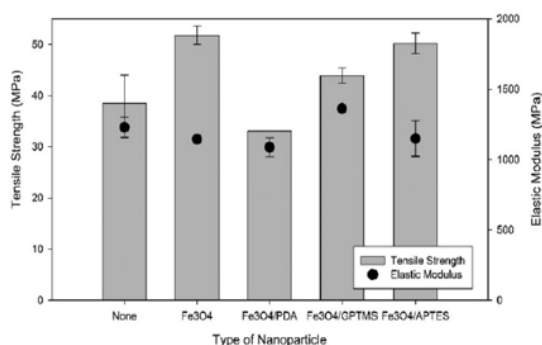
این نانوکامپوزیت می شود [۶].

اثر نانوذرات بیسموت آهن و نانوذرات بیسموت آهن حاوی نانوالیاف بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج مورفولوژی نشان داد با افزایش پرکننده در ماتریس اپوکسی، چگالی نانوکامپوزیت افزایش می یابد و فاصله بین مولکولی افزایش می یابد و در نتیجه کلوخه ای شدن اتفاق می افتد. حضور نانوذرات بیسموت آهن در ماتریس اپوکسی، منجر به کلوخه ای شدن ذرات شده است. ولی نانوالیاف سطح مشترک بزرگ تری ایجاد می کنند و می توانند مسیرهای پیوسته ای در ماتریس به وجود آورند [۷].

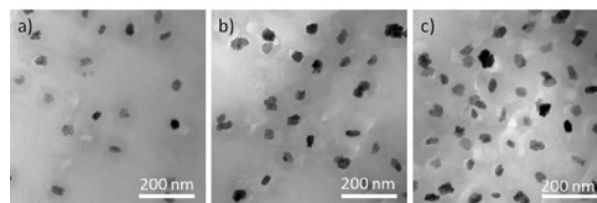
پژوهشگران اثر نانوذرات آهن اصلاح شده با آمینوفیل فرمالدهید، بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که افزودن نانوذرات آهن اصلاح شده به ماتریس اپوکسی، به طور قابل توجهی ویژگی های شکست را تغییر می دهد. سطح شکست کامپوزیت های اپوکسی با بارگذاری ذرات اصلاح شده ناهموارتر می شوند. این تغییرات به دلیل انعکاس و ممانعت از پیشرفت ترک ها توسط نانوذرات است که منجر به محدود شدن پیشرفت ترک ها می شود. همچنین، پیوند محکم بین ذرات و ماتریس اپوکسی نشان دهنده عدم وجود جداسازی قابل توجه است. در نهایت، این نتایج نشان می دهند که نانوذرات به خوبی با غلظت های بیش از ۵ درصد در ماتریس قرار می گیرند، بدون اینکه کلوخه ای شدن ایجاد شود [۸].

۳ خواص مکانیکی

پژوهشگران استحکام رزین اپوکسی خالص نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و پلی دوپامین و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و دو نوع اصلاح کننده سیلانی (GPTMS, APTES) بررسی کردند (شکل ۳). نتایج نشان داد اضافه کردن نانوذرات به رزین اپوکسی، مقدار استحکام کششی را از ۳۸/۵۰ به ۵۵/۷۷ مگاپاسکال افزایش داده که معادل



شکل ۳ استحکام مکانیکی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی [۹].



شکل ۲ تصاویر آزمون میکروسکوپ الکترونی (a). نانوکامپوزیت ۱ درصد وزنی (b). نانوکامپوزیت ۳ درصد وزنی (c). نانوکامپوزیت ۵ درصد وزنی [۳].

اثر نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با آمینوفیل فرمالدهید بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۲). نتایج نشان داد اثر ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی از این نانوذرات منجر به بهبود پراکنش می شود و کلوخه ای شدن در ماتریس رزین اپوکسی دیده نمی شود. حضور نانوذرات اصلاح شده منجر به کمتر شدن آنتالپی و پراکنش نانوذرات در اپوکسی می شود [۳].

پژوهشگران اثر نانوذرات اکسید آهن را بر مورفولوژی اپوکسی وینیل استر بررسی کردند. برای بهبود پراکنش نانوذرات اکسید آهن در سه زمان ۵، ۱۱ و ۲۰ دقیقه از امواج فراصوت استفاده شدند. نتایج نشان داد بهترین پراکنش نانوذرات اکسید آهن در زمان ۱۱ دقیقه اتفاق می افتد. همچنین در این پژوهش مشخص شد برای داشتن پراکنش مناسب در ماتریس اپوکسی، استفاده از زمان های بیشتری برای انجام فرایند پراکنش نانوذرات پیشنهاد می شود [۴].

اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه های سیلانی (APTES)، بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد در مقادیر ۳ و ۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسید آهن در ماتریس رزین اپوکسی، کلوخه ای شدن نانوذرات اتفاق می افتد. همچنین در مقادیر ۱ و ۳ درصد وزنی از نانوذرات آهن اصلاح شده توسط گروه های سیلانی، کلوخه ای شدن در نانوذرات دیده نشد. این بهبود در مورفولوژی به دلیل برهم کنش مناسب بین نانوذرات آهن اصلاح شده و رزین اپوکسی است [۵].

در پژوهشی دیگر، حضور نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه سیلانی (APTMS) بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد نانوذرات اصلاح نشده در ماتریس اپوکسی منجر به کلوخه ای شدن می شود. حضور نانوذرات آهن اصلاح شده در ماتریس اپوکسی، منجر به بهبود اندازه ذرات به زیر ۱۰۰ نانومتر و پراکنش بهتر شده است. اصلاح سطح نانوذرات اکسید آهن توسط گروه های سیلانی، منجر به افزایش سازگاری نانوذرات با ماتریس اپوکسی شده است. همچنین اصلاح سطح منجر به کاهش خواص آب دوستی

بررسی شد (جدول ۱). نتایج نشان داد حضور نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده منجر به افزایش مدول رزین اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌شود. حضور ۳ درصد وزنی از نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده، منجر به افزایش مدول رزین اپوکسی به مقدار ۶۰ درصد می‌شود. با افزایش مقدار درصد وزنی نانوذرات اصلاح شده به ۵ درصد، کلوخه‌ای شدن در فصل مشترک نانوذرات اصلاح شده و رزین اپوکسی اتفاق می‌افتد و در نتیجه مدول نانوکامپوزیت اپوکسی کاهش پیدا می‌کند. همچنین دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده ۳ درصد، در مقایسه با دیگر نمونه‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل پراکنش مناسب نانوذرات اصلاح شده توسط گروه‌های سیلانی است. دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی، تغییرات زیادی ندارد که به دلیل عدم پراکنش مناسب نانوذرات در ماتریس اپوکسی است [۱۲].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با آمینوفیل فرمالدهید، بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد حضور ۴ درصد وزنی از این نانوذرات می‌تواند منجر به افزایش استحکام کششی به مقدار ۹۴/۳ مگاپاسکال در مقایسه با رزین اپوکسی (۷۵ مگاپاسکال) شود. همچنین با افزودن نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده به رزین اپوکسی، مدول یانگ کاهش پیدا می‌کند. امکان دارد کاهش در

۳۴/۵ درصد بهبود است. حضور پلی‌دوپامین در نانوکامپوزیت اپوکسی منجر به کاهش خواص مکانیکی شد که به دلیل کلوخه‌ای شدن ذرات است. همچنین حضور دو نوع گروه سیلانی هم منجر به افزایش خواص مکانیکی شده است؛ ولی گروه سیلانی APTES افزایش بیشتری داشت. در بین تمام نمونه‌ها، خواص مکانیکی رزین اپوکسی در حضور نانوذرات اکسید آهن نتایج بهتری دارد [۹].

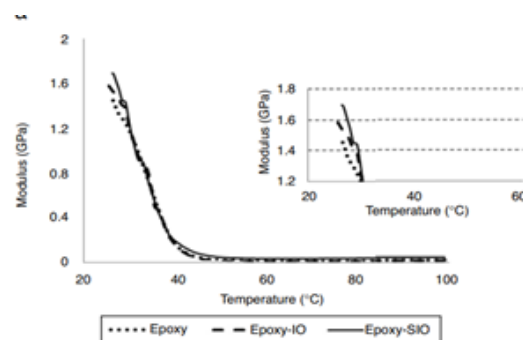
در پژوهش دیگر، اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه سیلانی بر دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۴). نتایج آزمون دینامیکی مکانیکی نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اصلاح شده به ترتیب برابر با ۴۴ و ۴۹ درجه سانتی‌گراد است. همچنین اصلاح سطح نانوذرات منجر به افزایش مدول ذخیره نانوکامپوزیت حاوی نانوذرات اصلاح شده در مقایسه با رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت حاوی نانوذرات اصلاح نشده می‌شود [۱۰].

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی پر شده با نانوذرات اکسید آهن و اکسید گرافن کاهش یافته (RGO) انجام شد. نتایج تحقیق نشان داد که پیوند قوی کربن sp² در ساختار گرافن، منجر به توزیع خوب پرکننده‌ها می‌شود و به تقویت خواص مکانیکی کامپوزیت کمک می‌کند. تعامل در مرز ماتریس و پرکننده منجر به انتقال بار مکانیکی مؤثر از ماتریس به پرکننده می‌شود و در نتیجه استحکام و سفتی کامپوزیت افزایش می‌یابد. با افزودن ۰/۲۵ phr از هیبرید نانوذرات به رزین اپوکسی، بیشترین مقدار افزایش در استحکام کششی (۵۶ درصد) و استحکام خمشی (۸۱ درصد) مشاهده شد. همچنین مشاهده شد که با افزایش درصد حضور نانوذرات در ماتریس اپوکسی، نانوکامپوزیت کلوخه‌ای می‌شود و خواص مکانیکی کاهش پیدا می‌کند [۱۱].

اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه‌های سیلانی (APTES)، بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی

جدول ۱ مدول و دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۱۲].

نمونه	مدول (GPa)	دمای انتقال شیشه‌ای (°C)
رزین اپوکسی خالص	۱/۴۵	۴۳
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن ۱ درصد	۱/۴۸	۴۳/۱
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن ۳ درصد	۱/۵۸	۴۴/۳
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن ۵ درصد	۱/۵۹	۴۳/۶
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن اصلاح شده ۱ درصد	۱/۵۷	۴۳/۳
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن اصلاح شده ۳ درصد	۱/۷۴	۴۶/۲
نانوکامپوزیت اپوکسی / اکسید آهن اصلاح شده ۵ درصد	۱/۶۹	۴۳/۶



شکل ۴ نمودار مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی [۱۰].

پژوهشگران تخریب گرمایی رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و پلی‌دوپامین و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و دو نوع اصلاح‌کننده سیلانی (GPTMS, APTES) را بررسی کردند (جدول ۲). نتایج نشان داد میانگین دمای اولیه تخریب گرمایی رزین اپوکسی خالص در حدود ۳۳۸/۶۷ درجه سانتی‌گراد است. پلیمر در آن دما اولین مرحله فرایند تخریب گرمایی را با شکستن شبکه اپوکسی آغاز می‌کند. به نظر می‌رسد نرخ تخریب گرمایی با تقویت شدن با APTES و GPTMS کاهش یافته است؛ زیرا دمای بالاتری برای تخریب مورد نیاز بود. همچنین حضور نانوذرات اکسید آهن در ماتریس رزین اپوکسی منجر به افزایش ذغال باقی‌مانده شد. نانوذرات اکسید آهن در محدوده دمایی آزمایش شده تجزیه نشدند. همچنین دمای اولیه تخریب گرمایی رزین اپوکسی در حضور نانوذرات اکسید آهن کاهش می‌یابد. کاهش پایداری حرارتی نانوکامپوزیت اپوکسی به دلیل افزایش انتقال حرارت در سراسر کامپوزیت در حضور نانوذرات فلزی نسبت داده می‌شود که به نوبه خود منجر به تسریع در تجزیه حرارتی ماده شده است. همچنین حضور اصلاح‌کننده سیلانی منجر به افزایش ذغال باقی‌مانده شده است [۱۲].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات اکسید آهن بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد با افزودن ۰/۵ و ۱ درصد از نانوذرات اکسید آهن (III) به ماتریس اپوکسی، پایداری گرمایی به ترتیب ۴ و ۱۷ درصد در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش چگالی شبکه‌ای شدن رزین اپوکسی است. در دمای ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با افزودن ۱۵ درصد حجمی از الیاف شیشه‌ای به رزین اپوکسی، پایداری حرارتی ۴۷ درصد کاهش می‌یابد. حضور هم‌زمان نانوذرات اکسید آهن و الیاف شیشه در ماتریس رزین اپوکسی منجر به

خواص مکانیکی به دلیل تغییر چگالی اتصال عرضی رزین اپوکسی ناشی از افزودن نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده باشد. همچنین، دمای انتقال شیشه‌ای (T_g)، نانوکامپوزیت ساخته شده بیشتر از رزین اپوکسی خالص است. افزایش T_g به این دلیل است که گروه آمینه روی سطح ذره، چگالی اتصال عرضی ماتریس اپوکسی را افزایش می‌دهد و به آن اجازه می‌دهد در دماهای بالاتر برای غلبه بر نیروهای بین مولکولی حرکت کند. بنابراین، دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد [۱۳]. پژوهشگران اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه‌های سیلانی (APTES) بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد مقدار مدول برای نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده، نانوکامپوزیت و رزین اپوکسی به ترتیب برابر با ۱/۴۷، ۱/۶۱ و ۱/۷۵ گیگاپاسکال است. این بهبود در خواص مکانیکی به دلیل اصلاح نانوذرات با گروه سیلان است که منجر به چسبندگی سطحی قوی‌تر بین نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده و ماتریس اپوکسی می‌شود [۱۴].

در پژوهشی دیگر، ضریب اتلاف نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۱۰ درصد وزنی از نانوذرات اکسید آهن بررسی شد. نتایج نشان داد دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت در مقایسه با رزین اپوکسی خالص سمت دماهای بالاتر جابه‌جا می‌شود و در نتیجه باعث بهبود میرایی و خواص مکانیکی می‌شود [۱۵-۱۶]. پژوهشگران گرانی رزین اپوکسی خالص را با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با سیکلودکستین بررسی کردند. نتایج نشان داد گرانی رزین اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل پراکنش مناسب ذرات در ماتریس رزین اپوکسی است که منجر به بهبود برهم‌کنش قوی بین رزین اپوکسی و نانوذرات اصلاح شده می‌شود [۱۷].

۴ پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

جدول ۲ داده‌های به دست آمده از تحلیل گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۱۲].

نام نمونه	دمای اولیه تخریب گرمایی (°C)	درصد ذغال باقی‌مانده
رزین اپوکسی	۳۳۸/۶۷	۳/۸۷
اپوکسی/نانوذرات اکسید آهن	۳۳۱/۶۲	۴/۶۵
اپوکسی/نانوذرات اکسید آهن/پلی‌دوپامین	۳۳۷/۳۵	۵/۴۳
اپوکسی/نانوذرات اکسید آهن/GPTMS	۳۳۲/۴۷	۶/۶۸
اپوکسی/نانوذرات اکسید آهن/پلی‌دوپامین/APTES	۳۳۵/۸۰	۴/۶۲

تحقیق نشان داد که دمای اولیه ی تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی نسبت به رزین اپوکسی خالص متفاوت است. همچنین، درصد ذغال باقی مانده در نانوکامپوزیت اپوکسی بیشتر از رزین اپوکسی خالص است. بنابراین، حضور نانوذرات باعث افزایش پایداری گرمایی می شود [۱۶].

در پژوهشی دیگر، تخریب گرمایی نانوذرات اکسید آهن و اکسیدگرافن کاهش یافته بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد تخریب رزین اپوکسی خالص در محدوده بین دمای ۳۳۰ تا ۴۳۰ درجه سانتی گراد اتفاق می افتد (جدول ۳). این تخریب گرمایی در رزین اپوکسی خالص، به دلیل تخریب حرارتی در زنجیره اصلی است. با افزودن هیبرید نانوذرات، تخریب گرمایی نانوکامپوزیت به دمای بالاتری (۳۴۵ درجه سانتی گراد) در مقایسه با رزین اپوکسی خالص انتقال پیدا می کند. این افزایش در دمای تخریب گرمایی نانوکامپوزیت، به دلیل تعامل خوب بین ماتریس اپوکسی و هیبرید نانوپرکننده ها است. لایه های سخت نانوذرات اکسیدگرافن کاهش یافته به همراه نانوذرات اکسید آهن می تواند به عنوان مانعی برای تخریب گرمایی رزین اپوکسی عمل کنند. همچنین حضور هم زمان این نانوذرات، ورود اکسیژن را محدود می کند؛ در نتیجه باعث کاهش تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی می شود [۱۷].

اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه های سیلانی (APTES)، بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد اولین تخریب گرمایی برای همه نمونه ها در محدوده دمایی ۳۰۰ تا ۴۳۰ درجه سانتی گراد اتفاق می افتد. حضور نانوذرات اکسید آهن پایداری گرمایی رزین اپوکسی را افزایش می دهد. همچنین حضور نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با گروه سیلانی، در ماتریس اپوکسی منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی در

افزایش پایداری حرارتی می شود. این افزایش به دلیل آن است که رزین اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن از نگهداری رطوبت در ماتریس اپوکسی جلوگیری کرده، بنابراین قادر به انتقال حرارت در هنگام افزایش دما می شود [۱۳].

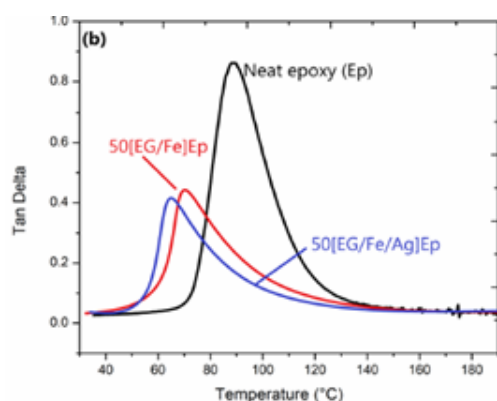
اثر نانوذرات آهن و فیلوسیلیکات بر دمای تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد حضور هم زمان این دو ماده منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی می شود. همچنین مقدار درصد ذغال باقی مانده رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی به ترتیب برابر با ۱۴/۵ و ۲۰/۶ است. این بدان معناست که اصلاح نانوذرات آهن با مواد دیگر منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی شده است. ذغال باقی مانده با لایه فشرده تر و پیوسته تر می تواند مانند سپر محافظت بهتری از سطح ماتریس اپوکسی انجام دهد و می تواند به طور موثر انتقال گرما، اکسیژن و مواد فرار قابل احتراق از منبع گرما به ماتریس اپوکسی را محدود کند و از افزایش تخریب حرارتی رزین اپوکسی جلوگیری کند [۱۴].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده با کربونیل بر خواص حرارتی رزین اپوکسی بررسی شد. در ابتدا تخریب گرمایی رزین اپوکسی در دمای بیش از ۲۸۰ درجه سانتی گراد اتفاق می افتد. همچنین درصد ذغال باقی مانده رزین اپوکسی خالص در دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد، ۰/۲ است. با افزایش مقدار نانوذرات اصلاح شده، مقاومت گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی افزایش می یابد. در واقع پوسته اپوکسی، منجر به کاهش تخریب گرمایی هسته نانوذرات اصلاح شده می شود. بنابراین پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی افزایش می یابد [۱۵].

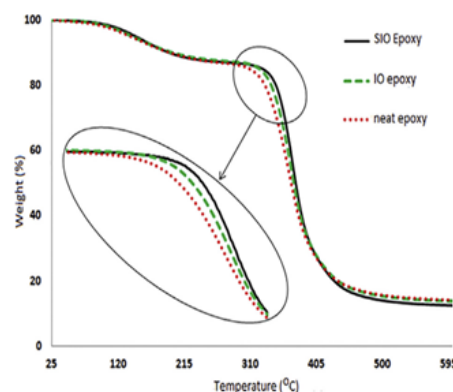
تحلیل تخریب گرمایی رزین اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدگرافن کاهش یافته و نانوذرات آهن انجام شد. نتایج این

جدول ۳ داده های به دست آمده از تحلیل گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی [۱۷].

نمونه (phr)	دمای اولیه تخریب گرمایی (°C)	بیشینه دمای تخریب گرمایی (°C)	درصد ذغال باقی مانده در دمای ۶۵۰ (°C)
رزین اپوکسی	۳۳۱	۳۷۲	۸/۱۱
۰/۱	۳۴۶	۳۷۷	۹/۲۲
۰/۲۵	۳۴۵	۳۷۷	۹/۸۹
۰/۵	۳۴۶	۳۸۲	۱۱/۵۴
۱	۳۴۵	۳۷۸	۱۱/۶۵
۵	۳۴۷	۳۸۱	۱۵/۳۰



شکل ۶ نمودار مشتق توزیع حرارتی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی [۲۰].



شکل ۵ نمودار گرمایزنی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت های اپوکسی [۱۸].

نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی استر، الیاف شیشه و نانوذرات اکسید آهن بررسی شد. همچنین نانوذرات اکسید آهن با گروه های سیلانی اصلاح شد. نتایج نشان داد پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص بهبود می یابد. این بهبود در خواص گرمایی به دلیل پراکنش مناسب نانوذرات و الیاف شیشه توسط گروه های سیلانی است [۲۱].

۵ پیشرفت های اخیر

پژوهشگران نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات کبالت آهن، بورون نیتريد، فینلن دی آمین و فسفاژن را سنتز کردند. نتایج نشان داد این ترکیب نه تنها دمای تخریب گرمایی کمتری را هنگام آزمون شعله نشان می دهد، بلکه در حفظ کربن باقی مانده و کاهش چگالی دود نیز عملکرد عالی دارد. این نوآوری می تواند به عنوان راهکاری مؤثر در بهبود ایمنی در برابر پوشش ضد آتش مورد استفاده قرار گیرد [۱۷].

نتایج تحقیقات نشان می دهد که استفاده از نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و اکسید گرافن کاهش یافته در پوشش های اپوکسی حاوی ذرات روی، به طور قابل توجهی عملکرد ضد خوردگی را بهبود می بخشد. با ساخت این نانوکامپوزیت، حفاظت کاتدی به مدت ۴۰ روز افزایش و چگالی جریان خوردگی به میزان قابل توجهی کاهش یافته است. این نوآوری می تواند راه حلی مؤثر برای چالش های موجود در پوشش های ضد خوردگی سنتی باشد. بنابراین، این مطالعه افق های جدیدی را برای توسعه پوشش های ضد خوردگی با کارایی بالا در صنعت فراهم می آورد [۱۸].

در پژوهشی دیگر، به بررسی اثربخشی نانوذرات اکسید آهن و ذرات دوده در مقیاس های میکرو و نانو که در ماتریس اپوکسی به منظور کاهش تابش گاما سنتز شده اند، پرداخته شده است. این

مقایسه با نمونه ی دیگر می شود. دمای ۵۰ درصد کاهش وزن نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده به ترتیب برابر با ۳۷۲ و ۳۷۷ درجه سانتی گراد است. دلیل بهبود تخریب گرمایی این نانوکامپوزیت، حضور ذرات سیلیکا است که منجر به بهبود فصل مشترک رزین اپوکسی با نانوذرات اکسید آهن شده است [۱۸].

رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی حاوی تأخیر انداز شعله آمونیوم پلی فسفات و نانوذرات اکسید آهن بررسی شد. نتایج نشان داد حضور تأخیر انداز شعله منجر به بهبود رفتار تخریب گرمایی کامپوزیت اپوکسی در مقایسه با نمونه رزین اپوکسی خالص می شود. همچنین حضور هم زمان تأخیر انداز شعله و نانوذرات اکسید آهن منجر به بهبود پایداری گرمایی رزین اپوکسی می شود. این بهبود به دلیل ذغال باقی مانده است که بر روی سطح نانوکامپوزیت تشکیل و مانع تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی می شود [۱۹].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات آهن و نانوذرات نقره بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات نقره پایداری کمتری در مقایسه با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات نقره دارد. این بدان معناست حضور نانوذرات اکسید آهن به بهبود پراکنش کمک کرده است؛ در نتیجه تخریب گرمایی بهبود پیدا کرده است. همچنین از منحنی مشتق توزیع حرارتی (DTG) مشخص شد (شکل ۶) حضور نانوذرات در نانوکامپوزیت ها منجر به جابه جایی منحنی های نانوکامپوزیت در مقایسه با رزین اپوکسی خالص نشده است. این مطلب نشان دهنده این موضوع است که افزایش در پایداری گرمایی کامپوزیت ها، زمانی اتفاق می افتد که از نانوذرات استفاده شده باشد [۲۰].

تحلیل گرمایزنی رزین اپوکسی حاوی پلی استر و

خالص می شود [۲۳].

در پژوهشی از اکسیدگرافن و نانوذرات اکسید آهن و اولئات برای تقویت رزین اپوکسی استفاده شد. نتایج نشان داد پراکندگی این ترکیب در حضور میدان مغناطیسی، اثرات مغناطیسی-نوری قابل توجهی را به همراه دارد. با تنظیم گرانی و انتخاب ترکیب بهینه، نمونه ها تحت شرایط مختلفی آزمایش شدند. نتایج تحقیقات نشان داد نانوکامپوزیت اپوکسی ساخته شده در میدان مغناطیسی، خواص سایشی (Wear) مناسبی دارند [۲۴].

مطالعات نشان می دهد افزودن ۱ درصد وزنی نانوسیلیکا به فرمول بندی پوشش اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن به طور قابل توجهی پایداری حرارتی و عملکرد کلی پوشش را بهبود می بخشد. دمای تخریب گرمایی ۵۰ درصد کاهش وزن برای نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا و نانوذرات اکسید آهن (۳۴/۵۲۸ درجه سانتی گراد)، پایداری گرمایی بهتری را در مقایسه با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن (۵۳/۴۷۰ درجه سانتی گراد) دارد. هر دو فرمول بندی دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی هستند؛ ولی نمونه حاوی نانوذرات سیلیکا، ویژگی های برتری را نشان می دهد. این یافته ها نشان می دهند افزودن نانوسیلیکا برای توسعه پوشش های اپوکسی با عملکرد بالا مفید است [۲۵]. پژوهشگران، به منظور بهبود عملکرد پوشش های رزین اپوکسی برای محافظت از سازه های بتنی در برابر خوردگی شیمیایی و سایش سطحی از نانوذرات اکسید آهن و گرافیت استفاده کردند. نتایج نشان داد پوشش های نانوی اصلاح شده نسبت به پوشش های اصلاح نشده بهبود قابل توجهی در عملکرد نشان می دهند. همچنین افزودن ۳ درصد وزنی از نانوذرات اکسید آهن به گرافیت، بهترین مقادیر چسبندگی را در مقایسه با نمونه خالص ارائه می دهد [۲۶].

در پژوهشی دیگر اثر نانوذرات آهن فسفینه شده بر رزین اپوکسی و پلی اتیلن ایمین بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد به طور هم زمان خواص مقاومتی، استحکام و دمای انتقال شیشه ای در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می یابد. همچنین با سنتز این نانوکامپوزیت، خواص ضدشعله بهبود می یابد. این پژوهش ایده های جدیدی برای ساخت نانوکامپوزیت های اپوکسی با کارایی چند منظوره و بالا به صنعت ارائه می دهد [۲۷].

استفاده از آلزینات حاوی ذرات آهن در ماتریس اپوکسی به طور قابل توجهی خواص ضدشعله رزین اپوکسی را بهبود بخشیده و خواص ضد دود را افزایش می دهد. ساخت این کامپوزیت باعث کاهش دمای تخریب اولیه و حداکثر نرخ کاهش وزن می شود و در عین حال، میزان تولید حرارت و دود را به طور چشمگیری

تحقیق به تحلیل تأثیر این نانومواد بر کاهش تابش گاما و بهبود خواص اپوکسی می پردازد. نتایج نشان می دهد افزودن نانوذرات اکسید آهن قابلیت حفاظتی هیبرید نانوکامپوزیت را به طور قابل توجهی افزایش می دهد و این مواد به دلیل استحکام مکانیکی عالی، برای کاربردهای عملی در حفاظت در برابر تابش مناسب هستند. این تحقیق پتانسیل نانوکامپوزیت اپوکسی را به عنوان مواد کارآمد و قابل اعتماد برای محافظت در برابر تابش گاما در زمینه های مختلف، از جمله نیروگاه های هسته ای و تأسیسات پزشکی، برجسته می کند [۱۹].

به منظور ساخت الیاف ضد آب از نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن و اسیدلوریک استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد الیاف ضد آب ساخته شده دارای خواص چسبندگی بالا هستند. همچنین از دیگر کاربردهای این نانوکامپوزیت، می توان به جداسازی آب از روغن، پایداری مکانیکی و خواص ضدشعله اشاره کرد [۲۰].

پژوهشگران، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن از نوع آلفا را سنتز کردند. نتایج نشان داد با حضور نانوذرات می توان به طور قابل توجهی پایداری حرارتی و تشکیل ذغال باقی مانده را در رزین اپوکسی افزایش داد و در نتیجه مقاومت در برابر آتش را بهبود بخشید. همچنین مقایسه دو نوع نانوذرات اکسید آهن از نوع آلفا و گاما نشان داده که نانوذرات نوع آلفا خواص ضدشعله بهتری در مقایسه با نوع گاما دارند. تحلیل ذغال باقی مانده نشان می دهد که نانوذرات اکسید آهن نوع آلفا به بهبود فشردگی لایه ذغال کمک کرده، در نتیجه اثر هم افزایی بهتری در مقاومت در برابر آتش ایجاد کرده است. بنابراین، استفاده از نانوذرات اکسید آهن به عنوان ماده ای مقاوم در برابر آتش می تواند به طور مؤثرتری خطر آتش سوزی مواد پلیمری را کاهش دهد [۲۱].

اثر نانوذرات اکسید آهن و پلی پیرول بر خواص ضدشعله رزین اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص بررسی شد. نتایج نشان داد حضور ۰/۲ درصد وزنی از نانوذرات اکسید آهن و پلی پیرول در ترکیب با رزین اپوکسی به همراه ۹/۸ درصد وزنی آمونیوم پلی فسفات، می تواند بهبود قابل توجهی در خواص ضدشعله نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص ایجاد کند. بنابراین استفاده از این ترکیب می تواند به توسعه مواد مقاوم تر و ایمن تر در صنایع مختلف کمک کند [۲۲]. پژوهشگران اثر نانوذرات رس هیبریدی حاوی ذرات آهن بر رزین اپوکسی و پلی فسفاترین بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد ساخت این نانوکامپوزیت منجر به افزایش خواص ضدشعله نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی

نانوذرات اکسید آهن اصلاح شده، جمع آوری شده است.

۶ نتیجه گیری

نتایج بررسی های انجام شده بر روی مورفولوژی سطوح شکست رزین اپوکسی و نانو ذرات اکسید آهن نشان می دهد که توزیع نانو ذرات در ماتریس اپوکسی تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی و دی الکتریک این کامپوزیت ها دارد. کلوخه ای شدن نانو ذرات اکسید آهن در برخی نقاط منجر به کاهش استحکام مکانیکی و پایداری حرارتی می شود. در مقابل، اصلاح نانو ذرات با کربونیل و گروه های سیلانی بهبود قابل توجهی در پراکنش و سازگاری نانو ذرات با ماتریس اپوکسی ایجاد کرده، از کلوخه ای شدن جلوگیری می کند. افزودن نانو ذرات به رزین اپوکسی به طور قابل توجهی می تواند استحکام کششی و مدول آن را افزایش دهد. به ویژه، نانو ذرات اکسید آهن اصلاح شده با

کاهش می دهد. همچنین، این نانو کامپوزیت منجر به بهبود ۱۳/۵ درصدی استحکام ضربه در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می شود. این ویژگی های مطلوب، آلزینات حاوی ذرات آهن را به راهبردی مؤثر برای تولید ترکیبات اپوکسی با ایمنی بالا برای افزایش خواص ضد شعله، تبدیل می کند [۲۸].

در پژوهشی دیگر مشخص شد افزودن ۱ درصد وزنی از فنیل فسفینات آهن، گرافن و نانوسیلیکا به رزین اپوکسی منجر به بهبود قابل توجهی در خواص ضد شعله، مکانیکی و عایق الکتریکی می شود. همچنین حضور ذرات در ماتریس اپوکسی منجر به افزایش مقدار ۴۴/۵ درصدی در استحکام کششی و افزایش مقدار ۶۱/۱ درصدی در مدول کششی می شود. این کار راهبردی یکپارچه برای توسعه و ساخت نانو کامپوزیت اپوکسی با خواص چند منظوره با عملکرد بالا را فراهم می کند [۳۲-۲۹]. در جدول ۴، مهم ترین نکات در ساخت نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی

جدول ۴ مهم ترین نکات در پیشرفت های اخیر در نانو کامپوزیت های اپوکسی حاوی نانو ذرات اکسید آهن اصلاح شده.

نام نمونه	سال	نتایج مهم
اپوکسی-بورو نیتريد-فنیل دی آمین-فسفاژن-کبالت آهن	۲۰۲۵	پوشش ضد شعله
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-اکسید گرافن کاهش یافته	۲۰۲۵	پوشش ضد خوردگی
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-نانو ذرات دوده	۲۰۲۴	کاربردهای هسته ای، محافظت در برابر تابش پرتو گاما
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-لوریکاسید	۲۰۲۴	افزایش خواص ضد شعله، افزایش خواص چسبندگی
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن از نوع آلفا	۲۰۲۴	خواص ضد یخ زدگی
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن از نوع آلفا و نانو ذرات اکسید آهن نوع گاما	۲۰۲۴	خواص بهتر ضد آتش نوع آلفا در مقایسه با نوع گاما
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-پلی پیرول-آمونوم پلی فسفات	۲۰۲۴	افزایش خواص ضد شعله
اپوکسی-ذرات آهن-نانو ذرات رس-پلی فسفاژن	۲۰۲۵	افزایش خواص ضد شعله
اپوکسی-نانو ذرات اکسید روی-نانو ذرات اکسید آهن	۲۰۲۵	بهبود خواص در کاربرد کاتالیزور نوری
اپوکسی-نانو ذرات اکسید گرافن-نانو ذرات اکسید آهن	۲۰۲۳	بهبود خواص سایشی در میدان مغناطیسی
اپوکسی-نانو ذرات سیلیکا-نانو ذرات اکسید آهن	۲۰۲۳	افزایش خواص ضد خوردگی به عنوان پوشش
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-زایلن دی آمین	۲۰۲۳	بهبود عملکرد پوشش های مقاوم در برابر خوردگی
اپوکسی-فنیل فسفینات آهن-نانو ذرات اکسید گرافن	۲۰۲۳	بهبود رسانایی گرمایی
اپوکسی-ضایعات آهن-الیاف شیشه	۲۰۲۳	استفاده و بهینه سازی از مواد زائد در صنعت
اپوکسی-نانو ذرات اکسید آهن-گرافیت	۲۰۲۳	افزایش خواص ضد خوردگی
اپوکسی-پلی آکریلو نیتریل-نانو ذرات اکسید گرافن-نانو ذرات اکسید آهن	۲۰۲۳	پوشش های خود ترمیم شونده (Self-Healing Ability)
اپوکسی-پلی اتیلن ایمین-نانو ذرات آهن فسفینه شده	۲۰۲۲	افزایش خواص ضد شعله
اپوکسی-آهن-آلزینات	۲۰۲۲	افزایش خواص ضد شعله-بهبود خواص مکانیکی
اپوکسی-فنیل فسفینات آهن-گرافن-نانوسیلیکا	۲۰۲۴	افزایش خواص ضد شعله-بهبود خواص مکانیکی

گروه‌های سیلانی (APTES) بهبود بیشتری در خواص مکانیکی نسبت به سایر نمونه‌ها ایجاد کرده‌اند. با این حال، افزایش درصد وزنی نانوذرات می‌تواند منجر به کلوخه‌ای شدن و کاهش خواص مکانیکی شود. به‌طور کلی، نتایج نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی است که می‌تواند در کاربردهای صنعتی و مهندسی مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد افزودن نانوذرات اکسید آهن و اصلاح‌کننده‌های سیلانی به ماتریس رزین اپوکسی، به‌طور قابل‌توجهی پایداری حرارتی این کامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد. به‌ویژه، حضور نانوذرات اکسید آهن و ترکیب آن‌ها با دیگر مواد مانند پلی‌دوپامین و الیاف شیشه، منجر به بهبود رفتار تخریب گرمایی و افزایش دمای اولیه تخریب می‌شود. همچنین، افزایش درصد ذغال باقی‌مانده در دماهای بالا نشان‌دهنده بهبود در ساختار و عملکرد حرارتی این نانوکامپوزیت‌ها است. نتایج تحقیقات اخیر در زمینه

نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسید آهن اصلاح‌شده نشان‌دهنده پیشرفت‌های قابل‌توجهی در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی این مواد است. این نانوکامپوزیت‌ها با افزودن نانوذرات مختلف، از جمله اکسید آهن، گرافن و پلیمرهای خاص، به‌طور مؤثری خواص ضدشعله، ضدخوردگی و پایداری حرارتی را افزایش می‌دهند. استفاده از این نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر در صنایع مختلف، از جمله ساخت‌وساز، حفاظت در برابر تابش و افزایش ایمنی سامانه‌های پلیمری، مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه، نانوذرات اکسید آهن نوع آلفا به‌دلیل خواص بهتر ضدآتش خود، توجه بیشتری را جلب کرده‌اند.

مراجع

- Jesija 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**.
- Klinthoophamrong N., Thanawan S., Schrodj G., Mouglin 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**.
- Gharieh A., Sharifian A., Dadkhah S., Enhanced Long-Term Corrosion Resistance and Self-Healing of Epoxy Coating with HQ-Zn-PA Nanocomposite, *Scientific Reports*, 15, 8154, **2025**.
- Zhang L., Yang D., Li Z., Zhai Z., Li X., de La Vega J., Wang D.-Y., Ultrafine Iron Oxide Decorated Mesoporous Carbon Nanotubes as Highly Efficient Flame Retardant in Epoxy Nanocomposites Via Catalytic Charring Effect, *Sustainable Materials and Technologies*, 39, e00845, **2024**.
- Ali Z., Yaqoob S., D'Amore A., Impact of Dispersion Methods on Mechanical Properties of Carbon Nanotube (CNT)/Iron Oxide (Fe_3O_4)/Epoxy Composites, *Journal of Carbon Research*, 10, 66, **2024**.
- Qi C., Dam-Johansen K., Weinell C.E., Wu H., Effect of Iron Powder on Xinc Reactivity and Anticorrosion Performance of Xinc-Rich Epoxy Coatings, *Progress in Organic Coatings*, 190, 108403, **2024**.
- Shariatmadar M., Gholamhosseini P., Abdorrezaee Z., Ghorbanzadeh S., Feizollahi S., Hosseini F.S., Azad Shahraki F., Mahdavian M., Leveraging Polyaniline Grafted Micaceous Iron Oxide as a Dual Active-Barrier Pigment for Anti-Corrosion Polymer Coatings, *Surface and Coatings Technology*, 479, 130501, **2024**.
- Zhong F., Yang X., Chen C., Wang M., Wang B., Xia H., Song J., Cobalt-Doped Iron-Based Prussian Blue Analogue Cubes Anchored to Phosphorus-Nitrogen-Covered BN Surfaces for Enhancing the Flame Retardancy of Epoxy Coatings, *Progress in Organic Coatings*, 198, **2025**.
- Ji Z., Shu J., Jing H., Su C., Peng X., Li T., Xu C., Xia M., Wang J., Yang J., Lei W., Hao Q., Enhanced Corrosion Resistance of Zinc-Rich Epoxy Anti-Corrosion Coatings Using Graphene- Fe_2O_3 and HEDP, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **2025**.
- Khalil M.M., Gouda M.M., Abbas M.I., Impact of nano Fe_2O_3 on Radiation Parameters of Epoxy Reinforced with Nano Carbon, *Scientific Reports*, 14, 21940, **2024**.
- Wang B., Zhang C., Huang B., Wang H., Miao X., Deng W., A Facile Dip-Coating Approach to Prepare Robust Superhydrophobic Fabric Modified By $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /Epoxy Resin/Lauric Acid for Oil/Water Separation, Lossless Water Transportation, and Flame Retardancy, *Surfaces and Interfaces*, 45, 103896, **2024**.
- Qiao Y., Tao X., Li L., Robust $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ /Epoxy Resin Superhydrophobic Coatings for Anti-icing Property, *Journal of*

Wuhan University of Technology-Materials Science Edition., 39, 621–626, **2024**.

20. Wei Z., Guan J., Yan L., Niu G., The Role of Nano-Fe₂O₃ Crystal Structure on the Thermal Stability, Flame Retardancy, and Smoke Suppression of Intumescent Flame-Retarded Epoxy Resins, *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 31, 59-70, **2024**.

21. Zhou K., Wu Y., Yin L., Luo J., Lu K., Yu B., Shi Y., Zhang S., Jia S., In Situ Assembly of Polyphosphazene on Fe-MMT Nanosheets for High-Performance Flame-Retardant Epoxy Composites, *Polymer Degradation and Stability*, 235, 111264, **2025**.

22. Le Huy C.H., Thanh A.T., Study on Fabricating Epoxy Coatings Reinforced with Iron Oxide Flakes and Nano Silica, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 42, 13-14, 724-740, **2023**.

23. Dorado L., Toledo A.R. de la Osa A., Esteban-Arranz J., Sacristan B., Pellegrin J., Steck L., Sanchez-Silva L., Adhesion Enhancement and Protection of Concrete Against Aggressive Environment Using Graphite-Fe₂O₃ Modified Epoxy Coating, *Construction and Building Materials*, 379, 131179, **2023**.

24. Shi X.-H., Liu Q.-Y., Li X.-L., Yang S.-Y., Wang D.-Y., Simultaneously Improving the Fire Safety and Mechanical Properties of Epoxy Resin with Iron Phosphonated Grafted Polyethylenimine, *Polymer Degradation and Stability*, 206, 110173, **2022**.

25. Liu C., Li P., Xu Y.J., Epoxy/Iron Alginate Composites with Improved Fire Resistance, Smoke Suppression and Mechanical Properties, *Journal of Materials Science*, 57, 2567–2583, **2022**.

26. Chen Q., Huo S., Lu Y., Ding M., Feng J., Huang G., Xu H., Sun Z., Wang Z., Song P., Heterostructured Graphene@

Silica@Iron Phenylphosphinate for Fire-Retardant, Strong, Thermally Conductive Yet Electrically Insulated Epoxy Nanocomposites, *Small*, 20, 2310724, **2024**.

27. Shi G., Zang J., Chen R., Wang X., Wang L., Wang M., Cheng Y., Differences in the Magnetic Properties of Finemet/FeSi Soft Magnetic Composites Prepared with Epoxy Resin/Nano-Oxide Composite Coating Layers, *Materials Today Communications*, 40, 110177, **2024**.

28. Rath J.S.L., Ruban Y.J.V., Mon S.G., Waste Iron Swarf Reinforced Epoxy/Unsaturated Polyester Particulate Composite Films Fabrication, Characterization and Peculiarities, *Journal of the Indian Chemical Society*, 102, 101619, **2025**.

29. Zimmermann I., Eilts F., Galler A.-S., Bayer J., Hober S., Berensmeier S., Immobilizing Calcium-dependent Affinity Ligand onto Iron Oxide Nanoparticles for Mild Magnetic mAb Separation, *Biotechnology Reports*, 45, **2025**.

30. Chen Y., Sha A., Jiang W., Lu Q., Du P., Hu K., Li C., Eco-friendly Bismuth Vanadate/iron Oxide Yellow Composite Heat-reflective Coating for Sustainable Pavement: Urban Heat Island Mitigation, *Construction and Building Materials*, 470, 140645, **2025**.

31. Karami M. H., Kalaei M. R., Mazinani S., Martínez V. G., Wellen R. M. R., Shanmugharaj A. M., Kim K., Isoconversional Model Approach and Cure Kinetics of Epoxy/NBR Nanocomposites, *Proceedings of the 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020)*, 9-10, **2020**.

32. Karami M. H., Kalaei M. R., A Review of the Applications of Cross-Linked Elastomeric Nanoparticles, *Iranian Rubber Magazine*, 25, 37-56, **2021**.