

اثر نانو سیلیکای اصلاح شده بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

The Effect of Modified Nanosilica on the Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability, and Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposite

چکیده

رزین اپوکسی به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین پلیمرهای گرمایی شناخته می‌شود که به‌خاطر خواص قابل‌توجه فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی‌اش، از جمله مقاومت‌های کششی و فشاری، دمای اعوجاج و مقاومت شیمیایی مطلوب، در صنایع متنوعی نظیر چسب، پوشش، الکترونیک، مواد کامپوزیت با کارایی بالا، توربین‌های بادی و روش‌های قالب‌گیری به کار می‌رود. این رزین‌ها درصد بالایی از پیوندهای عرضی را دارند که برای دستیابی به خواص مناسب مکانیکی و گرمایی ضروری است؛ اما ساختارهای ایجاد شده در رزین‌های اپوکسی سخت شده با سخت‌کننده به دلیل چگالی بالای پیوندهای عرضی، در برابر ضربه آسیب پذیر و مقاومت شکننده ای دارد. برای رفع این معضل و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، می‌توان از ترکیب آن‌ها با سایر مواد پلیمری یا نانوکامپوزیت‌ها بهره برد. نانوذرات سیلیکا تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی دارد و منجر به بهبود در پراکنش، پایداری حرارتی و مقاومت کششی رزین اپوکسی می‌شود. همچنین، تعاملات بین نانوذرات و ماتریس اپوکسی به افزایش استحکام و کارایی نانوکامپوزیت‌ها در کاربردهای صنعتی منجر می‌شود. در این پژوهش، به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیکای اصلاح شده بر روی مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، رفتار تخریب گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه پرداخته می‌شود.

کلمات کلیدی: رزین اپوکسی، نانو سیلیکای اصلاح شده، مورفولوژی، خواص مکانیکی، تخریب گرمایی

نوع مقاله: پژوهشی

محمدحسین کرمی^۱، امید معینی جزنی^۲*

۱- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان، ایران

۲- گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی ۸۱۷۴۶-۷۳۴۴۱، اصفهان، ایران

ایمیل نویسنندگان و عهده‌دار مکاتبات:

o.moini@eng.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۱

۱. مقدمه

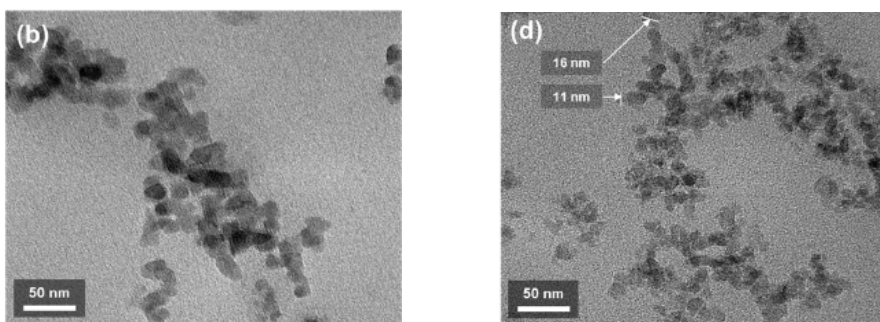
ضربه‌ای می‌شود [۷] با افزودن نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی، مشاهده می‌شود که مدول یانگ به طور خطی افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل بهبود پراکنش نانوذرات و کاهش تمرکز تنش در مواد است. نانوذرات سیلیکا همچنین باعث افزایش دمای حداکثر تخریب حرارتی، پایداری حرارتی و درصد ذغال باقی‌مانده می‌گردد [۸] در این پژوهش، به بررسی تأثیر نانوذرات سیلیکای اصلاح شده بر روی مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، رفتار تخریب گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه پرداخته می‌شود.

۲. مورفولوژی

اثر ۴ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا بر رزین اپوکسی وینیل استر بررسی شد (شکل ۱). نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نانوذرات سیلیکا به خوبی در ماتریس پراکنده می‌شود و اثری از کلوخه‌ای شدن دیده نمی‌شود [۵].

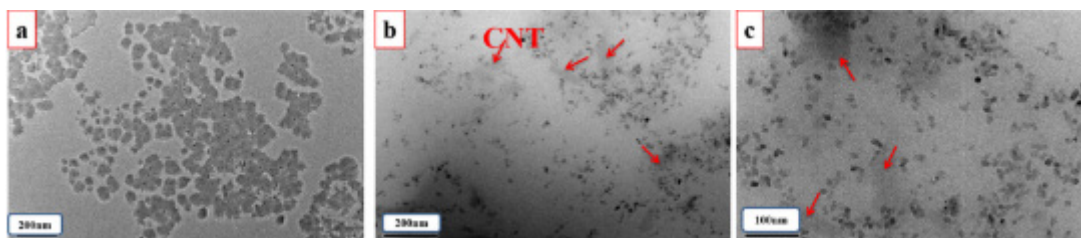
در پژوهشی دیگر، در ابتدا نانوذرات سیلیکا با پلی متیل سیلوکسان اصلاح سطح شد و به ماتریس رزین اپوکسی اضافه شد (شکل ۱). نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت اپوکسی در حضور نانو سیلیکا و نانو سیلیکای اصلاح شده نشان داد که پراکنش نانوذرات در ماتریس اپوکسی بسیار مناسب می‌باشد. همچنین اندازه نانو ذرات سیلیکای اصلاح شده از نانوذرات اصلاح نشده، کوچکتر می‌باشد. این کاهش اندازه ذرات به این دلیل می‌باشد که گروه‌های سیلانی باعث عدم جذب کاهش رطوبت در سطح نانوذرات سیلیکا اصلاح شده می‌شوند و در نتیجه اندازه این ذرات در مقایسه با اندازه

یکی از پلیمرهای گرماسخت مهم، رزین اپوکسی است که به‌عنوان پوشش، چسب و ماده زمینه در کامپوزیت‌ها کاربرد دارد و در صنایع خودرو، الکترونیک و ساختمان نیز به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱] ساختار شبکه‌ای رزین اپوکسی باعث می‌شود که این رزین شکننده باشد و افزایش چقرمگی آن در حضور نانوذرات پلیمری، یکی از حوزه‌های مورد توجه محققان است. نانوسیلیکا به اشکال مختلف در محصولات گوناگون به کار رفته و به دلیل داشتن مقاومت شیمیایی بالا، پایداری حرارتی مناسب و سازگاری با بسیاری از مواد، در کاربردهای زیادی مانند کاتالیزورها و جاذب‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد [۲-۳] همچنین، نانوسیلیکا در تقویت بتن، پزشکی زیستی، تولید جوهر چاپ و محصولات آرایشی نیز استفاده می‌شود. اضافه کردن نانوذرات سیلیکا به ماتریس رزین اپوکسی، موجب می‌شود که سطح شکست نانوکامپوزیت اپوکسی ناصاف و زبر گردد و در نتیجه، رشد ترک‌ها کاهش یافته و چقرمگی و استحکام نانوکامپوزیت اپوکسی افزایش می‌یابد [۴-۶] حضور نانوذرات سیلیکا انرژی فعال‌سازی را کاهش می‌دهد و علاوه بر این، نانوذرات سیلیکا به‌عنوان کاتالیزور در واکنش پخت با رزین اپوکسی عمل می‌کند. دو عامل کلیدی در کاهش تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، توزیع مناسب نانوذرات و عدم وقوع کلوخه‌سازی است. اصلاح سطح نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از نانوذرات سیلیکا، به دلیل بهبود چسبندگی و پیوند کووالانسی، موجب افزایش استحکام



شکل ۱. آزمون میکروسکوپ الکترونی (a). نانوکامپوزیت اپوکسی (b). نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده

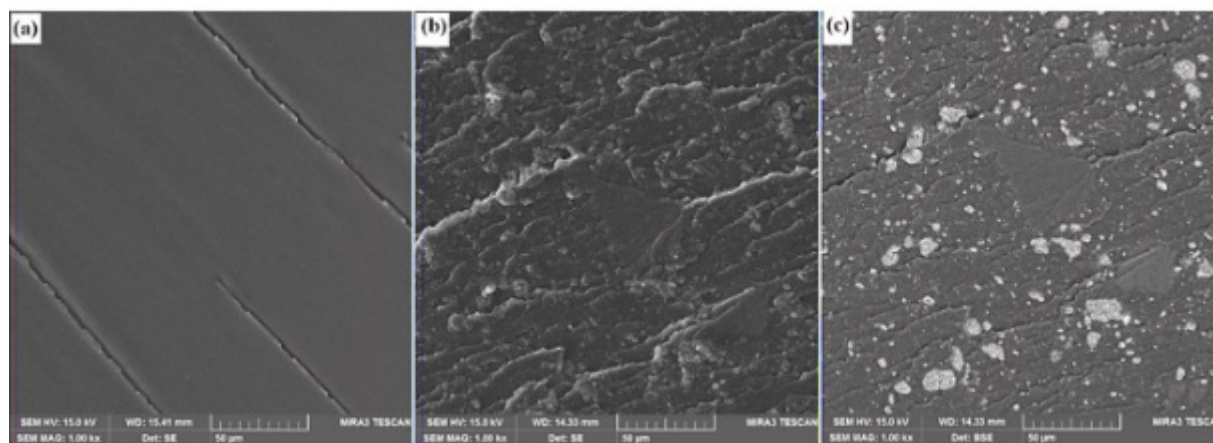
است [۷] با افزودن نانولوله‌های کربنی به کامپوزیت اپوکسی، ذرات حالت پخش بهتری از خود نشان دادند. دو دلیل منجر به بهبود پراکنش شده است: از یک طرف، گروه‌های آلی روی سطوح نانو سیلیکا و فسفا فنان‌ها می‌توانند نیروی جذب بین ترکیبات و نانو لوله کربنی را کاهش دهند و رفتار تجمع را محدود کنند. و همچنین از طرف دیگر، پخش قبلی نانولوله‌های کربنی در نانوبین نانوذرات سیلیکا و فسفا فنان ترن، به یکنواختی پخش نانولوله‌های کربنی در ماتریس اپوکسی کمک می‌کند [۸].



شکل ۲. آزمون میکروسکوپ الکترونی (a). نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلیکون و فسفا فنان ترن. (b) نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلیکون، فسفا فنان ترن و نانولوله‌های کربنی با بزرگنمایی ۲۰۰ نانو متر (c). نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلیکون، فسفا فنان ترن و نانو لوله‌ها کربنی با بزرگنمایی ۱۰۰ نانو متر

می‌شود، پراکنش مناسبی خواهیم داشت. همچنین با افزایش درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت به مقدار ۵ (نانو سیلیکا دو درصد وزنی)، مقداری کلوخه‌ای شدن دیده شد [۹].

پژوهشگران اثر نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت بر رزین اپوکسی بررسی کردند (شکل ۳). نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان داد که زمانیکه از ۳ درصد وزنی از هیدروکسی آپاتیت و ۲ درصد وزنی از نانو سیلیکا استفاده

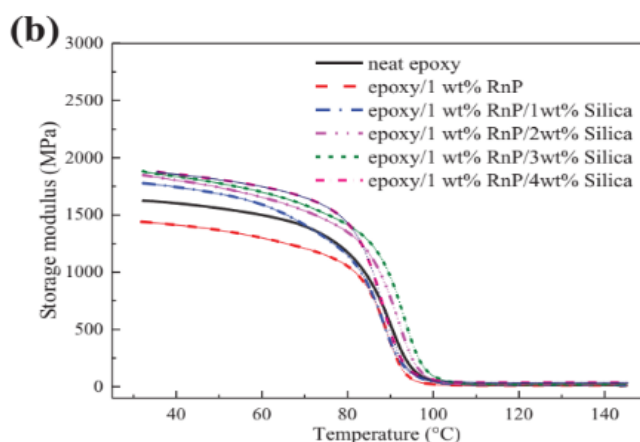


شکل ۳. (a). رزین اپوکسی. (b) نانوکامپوزیت اپوکسی (۲درصد وزنی نانو سیلیکا و ۳ درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت) (c). نانوکامپوزیت اپوکسی (۲درصد وزنی نانو سیلیکا و ۵ درصد وزنی هیدروکسی آپاتیت)

۳. خواص مکانیکی

خواص مکانیکی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکای اصلاح شده با پلی متیل سیلوکسان بررسی شد. نتایج نشان داد که مدول ذخیره برای رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، وابستگی به دما دارند. ترکیب اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا دارای دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) بالاتری نسبت به رزین اپوکسی خالص دارد. افزون بر این، افزایش محتوای پرکننده سیلیکا باعث افزایش مدول ذخیره در دماهای اولیه می‌شود، در حالی که این وابستگی برای نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده، مشاهده نمی‌شود [۹]. آزمایش خمشی نیز تأیید کرد که تعامل بین ذرات نانوپرکننده و ماتریس موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی می‌شود. به‌ویژه، نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده، در مقادیر کمتر از حضور نانو

سیلیکا، حداکثر استحکام خمشی را نشان داد [۹-۱۰]. مدول ذخیره رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات لاستیک و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات لاستیک و نانو ذرات سیلیکا بررسی شد (شکل ۴). نتایج نشان داد که با افزودن نانوذرات سیلیکا مدول ذخیره و سفتی افزایش می‌یابد. زمانیکه ۴ درصد وزنی از نانوذرات سیلیکا استفاده شد، مدول ذخیره ۴۰ درصد بهبود می‌یابد و به مقدار ۱۸۷۹ مگا پاسکال می‌رسد. بنابر این حضور نانوذرات سیلیکا منجر به بهبود سفتی، رزین اپوکسی هم می‌شود. با افزودن نانوذرات لاستیک و همچنین نانوذرات سیلیکا، دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می‌یابد. همچنین با افزودن نانوذرات تن دلتا (-Tan Del ta)، کاهش می‌یابد. این کاهش به دلیل، عدم تحرک زنجیره‌های نانوذرات در ماتریس رزین اپوکسی می‌باشد [۱۱].

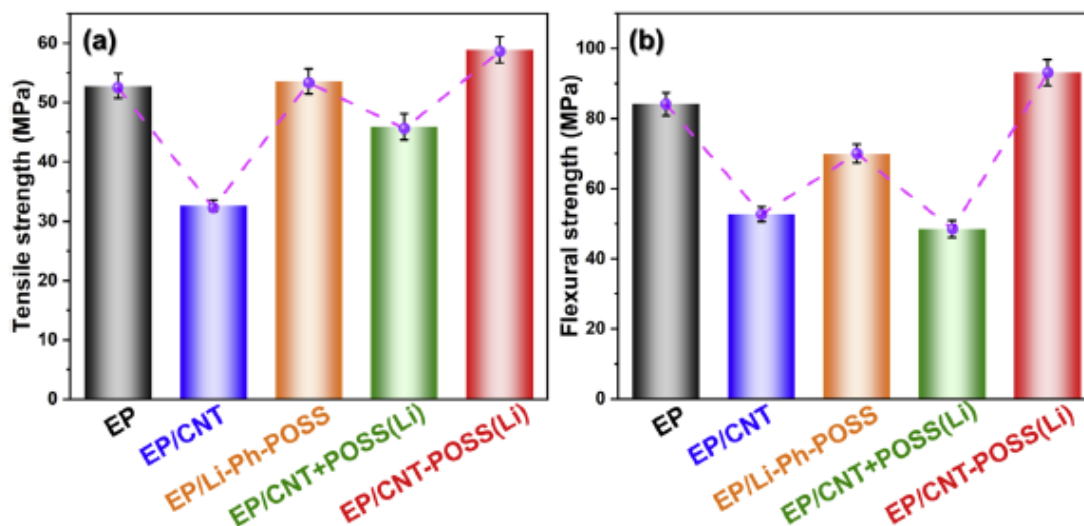


شکل ۴. نمودار مدول ذخیره بر حسب دما رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت‌های اپوکسی

به کاهش استحکام خمشی و استحکام کششی می‌شود. این امر به دلیل وجود زیادی از تعداد ذرات است که تمایل به تجمع و کلوخه‌ای شدن دارند. ولی زمانیکه نانولوله‌های کربنی با گروه لیتیم سیلیکونی اصلاح می‌شود و به رزین اپوکسی اضافه می‌شود، استحکام کششی و خمشی، در مقایسه با دیگر نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این بدان معناست که اصلاح

استحکام کششی و استحکام خمشی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های پوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با گروه‌های لیتیم سیلوکسان، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی بررسی شد (شکل ۵). نتایج نشان داد حضور نانولوله‌های کربنی اصلاح شده با گروه‌های کربوکسیل و گروه‌های لیتیم سیلوکسان (گروه‌های سیلیکونی)، منجر

سطح یک روش بسیار مهم برای بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌باشد، زیرا زمانیکه گروه‌های سیلوکسان به صورت جداگانه اضافه شده بود، اثر مناسبی بر روی خواص مکانیکی نداشت [۱۲].



شکل ۵. نمودار خواص مکانیکی (a). نمودار استحکام کششی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی (b). نمودار استحکام خمشی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

استفاده شد (جدول ۱). نتایج نشان داد که حضور همزمان دو نوع نانوذرات منجر به بهبود استحکام خمشی و سختی رزین اپوکسی می‌شود. دلیل افزایش مقدار سختی نانوکامپوزیت اپوکسی را می‌توان به ذات و طبیعت سخت نانوذرات سیلیکا و نانوذرات آهن کبالت نسبت داد. همچنین بر اثر آزمون سختی، الیاف شیشه‌ای و نانوپرکننده‌ها به یکدیگر می‌رسند که باعث افزایش مقاومت می‌شود و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد [۱۴] در تولید نانوکامپوزیت‌ها، اهمیت زیادی دارد که بر نیروی جاذبه‌ای که بین نانوذرات سیلیکا و نانوذرات آهن کبالت رخ می‌دهد، غلبه کنیم، زیرا این نیروی جاذبه ممکن است موجب تجمع این ذرات شود. نانوپرکننده‌ها از گسترش میکروترک‌ها در ماتریس نانو فازی جلوگیری می‌کنند. اتصال ضعیف بین نانوپرکننده‌ها و ماتریس می‌تواند باعث ایجاد مقدار قابل توجهی از حفره‌ها شود که ناحیه شکست بزرگی را تولید می‌کند. ماتریس پر شده با نانوپرکننده‌ها دارای انتقال تنش

اثر نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج آزمایش کشش نشان داد که افزودن نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت، به طور قابل توجهی استحکام کششی و مدول الاستیسیته نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را بهبود می‌بخشد. بیشترین افزایش استحکام کششی در حضور ۳ درصد وزنی از هیدروکسی آپاتیت مشاهده شد. با این حال، در درصد‌های وزنی بالاتر حضور نانوذرات سیلیکا، منجر به تجمع نانوذرات می‌شود که در نتیجه، باعث کاهش استحکام کششی می‌شود. همچنین، نانوذرات سیلیکا موجب افزایش تغییر طول در نقطه شکست می‌شود که به دلیل ویژگی‌های پلاستیسیته آن می‌باشد. در نهایت، ترکیب نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت، به بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی کمک شایانی کرد [۱۳].

به‌منظور افزایش خواص مکانیکی رزین اپوکسی حاوی الیاف شیشه، از نانوذرات کبالت آهن و نانوذرات سیلیکا

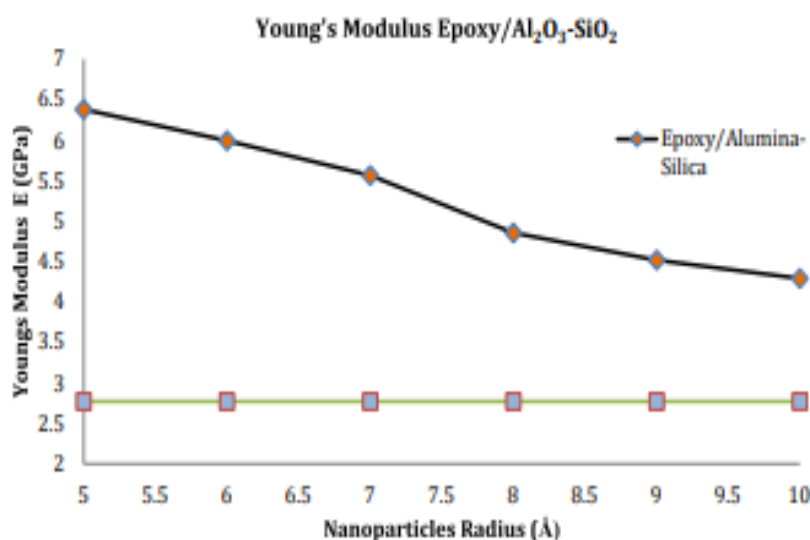
مؤثرتر است و بنابراین، تمرکز تنش‌های موضعی را از طریق لایه‌های بین الیاف و ماتریس کاهش می‌دهد. این موضوع

جدول ۱. نتایج به دست آمده از آزمون استحکام خمشی و آزمون سختی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

نمونه	استحکام خمشی (مگا پاسکال)	سختی
اپوکسی - الیاف شیشه	۷۹/۲۶	۵۰/۳۴
اپوکسی - نانو سیلیکا	۸۹/۲۳	۵۵/۱۳
اپوکسی - نانوذرات آهن کبالت	۸۷/۵۵	۵۴/۴۱
اپوکسی - نانو سیلیکا - نانوذرات آهن کبالت	۹۵/۷۹	۵۸/۹۱

۸ آنگستروم کاهش یابد، که تغییر حدود ۲۵ درصدی در آن قابل مشاهده است. با افزایش شعاع ذره، مدول یانگ کاهش می‌یابد که می‌توان این موضوع را با استفاده از مفهوم مساحت سطح ویژه توضیح داد، که مقدار تعامل بین اتم‌های اپوکسی و اتم‌های سیلیس و آلومینا را نشان می‌دهد. شکل ۱۶ تغییرات مدول یانگ کامپوزیت هیبریدی با شعاع نانوذره را نشان می‌دهد [۱۶].

خواص مکانیکی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا و نانو آلومینا بررسی شد. نتایج مدول یانگ نشان داد که که افزایش در مدول یانگ بیشتر از زمانی است که سیلیس یا آلومینا به طور جداگانه اضافه شده‌اند (شکل ۶). همچنین مقدار مدول یانگ (شعاع نانوذره ۵ آنگستروم) به بیشترین مقدار خود می‌رسد، یعنی ۲۳۰ درصد از مقدار اپوکسی خالص بیشتر می‌باشد. بیشترین کاهش در مدول یانگ زمانی رخ می‌دهد که شعاع ذره از ۷ آنگستروم به



شکل ۶. نمودار مدول یانگ نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا و نانو آلومینا

نتایج بررسی پایداری گرمایی رزین اپوکسی اصلاح شده با سیلان و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی گروه های سیلانی، نانوسیلیکا و اکسید روی، نشان داد که حضور اکسید روی منجر به بهبود پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه می‌شود. حضور اکسید روی نقش کاتالیزوری دارد و مقاومت گرمایی را افزایش می‌دهد و در نتیجه تخریب گرمایی کاهش پیدا می‌کند. همچنین حضور نانو سیلیکا که به مانند یک عایق می‌تواند تخریب گرمایی را کاهش دهد در کنار اکسید روی، تخریب گرمایی را کاهش می‌دهند [۱۹].

در پژوهشی دیگر، پایداری گرمایی رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج، کامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج اصلاح شده با کلرید هیدروژن و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج اصلاح شده با سیلان و نانو سیلیکا بررسی شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که دمای اولیه تخریب گرمایی با افزودن پوسته برنج، پوسته برنج اصلاح شده و همچنین نانو سیلیکا افزایش می‌یابد. همچنین ذغال باقیمانده هم برای نمونه‌های اصلاح شده و نانوکامپوزیت اپوکسی، بیشتر از رزین اپوکسی می‌باشد. این افزایش منجر به پایداری گرمایی می‌شود. در واقع افزایش پایداری گرمایی به دلیل بر همکنش فاز آلی و غیر آلی بین پلیمر و پرکننده می‌باشد [۲۰]. این بر هم کنش باعث تاخیر محصولات فرار حین فرایند تخریب گرمایی شده و در نتیجه، پایداری گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین پراکنش ذرات در ماتریس اپوکسی، بر فرایند تخریب گرمایی هم تاثیر دارد [۱۹-۲۰].

خواص مکانیکی رزین اپوکسی، معمولاً کاربردهای عملی آن را تعیین می‌کند، بنابراین ارزیابی تأثیر مواد ضد شعله بر عملکرد مکانیکی رزین اپوکسی اهمیت دارد. استحکام کششی، مدول کششی و استحکام ضربه‌ای رزین اپوکسی به ترتیب برابر با ۴۲/۹ مگا پاسکال، ۱/۸ مگا پاسکال و ۷/۸ کیلو ژول بر متر مربع می‌باشد. افزودن نانوذرات سیلیکا، فنیل فسفینات آهن و گرافن به وضوح می‌تواند باعث افزایش استحکام کششی، مدول کششی و استحکام ضربه‌ای رزین اپوکسی شود. به‌عنوان مثال، استحکام کششی، مدول کششی و استحکام ضربه‌ای نانوکامپوزیت نانوکامپوزیت ساخته شده به ترتیب برابر با ۶۲ مگا پاسکال، ۲/۹ مگا پاسکال و ۱۱/۱ کیلو ژول بر متر مربع می‌باشد که به ترتیب ۴۴/۵ درصد، ۶۱/۱ درصد و ۴۲/۳ درصد بیشتر از رزین اپوکسی است [۱۷].

۴. پایداری گرمایی و تخریب گرمایی

پایداری گرمایی رزین اپوکسی خالص، و میکرو کامپوزیت سیلیکا اصلاح شده با گروه سیلانی بررسی شد. نتایج نشان داد پایداری گرمایی میکرو کامپوزیت از رزین اپوکسی بیشتر می‌باشد. انتظار می‌رود با افزایش اندازه حفره سیلیکا، رزین اپوکسی به داخل این حفره‌ها وارد شده و شبکه‌های در هم نفوذ کرد، ایجاد شود و پایداری گرمایی افزایش یابد. بنابر این به طور کلی، حضور گروه سیلیکا سیلانی شده منجر به افزایش پایداری گرمایی در مقایسه با رزین اپوکسی می‌شود. همچنین حضور سیلیکا منجر به افزایش ذغال باقیمانده می‌شود و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد [۱۸].

جدول ۲. داده‌های به دست آمده از آزمون آنالیز گرما سنج وزنی

نمونه	دمای اولیه تخریب	دمای بیشینه تخریب	درصد ذغال باقیمانده
رزین اپوکسی	۳۱۳/۹	۳۷۲	۸/۱
کامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج	۳۱۶/۵	۳۷۴	۸/۸
کامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج اصلاح شده با سیلان	۳۱۸/۴	۳۷۸/۸	۹/۲
نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پوسته برنج اصلاح شده با سیلان و نانو سیلیکا	۳۲۱/۵	۳۸۳/۲	۹/۹

پایداری گرمایی و تخریب رزین اپوکسی وینیل استر و نانوکامپوزیت اپوکسی وینیل استر حاوی نانو سیلیکا بررسی شد (جدول ۳). نتایج نشان داد که رفتار دمای اولیه تخریب گرمایی رزین اپوکسی وینیل استر تقریباً شبیه نانوکامپوزیت اپوکسی وینیل استر می‌باشد. هنگامی که دما در حال افزایش است، نانوذرات سیلیکا به سمت سطح نانوکامپوزیت حرکت می‌کند، زیرا سیلیس انرژی پتانسیل سطحی کمی دارد. سیلیس روی

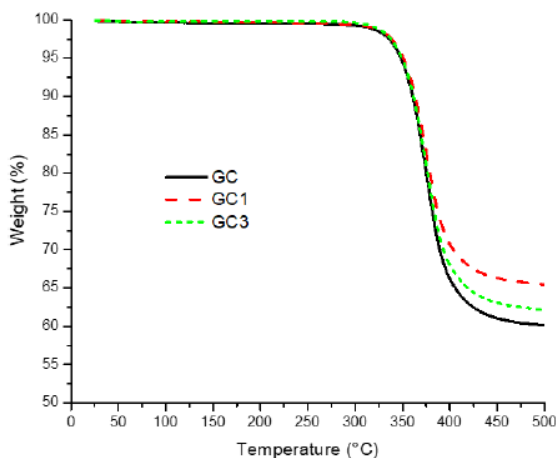
سطح پلیمر به‌عنوان مواد عایق حرارتی عمل می‌کند و از لایه داخلی پلیمرها محافظت می‌کند. این اثر عایق حرارتی می‌تواند در دماهای بالا عمل کند [۲۱] با افزودن ۴ درصد وزنی از نانوذرات سیلیکا به رزین اپوکسی وینیل استر، درصد ذغال باقیمانده در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد از ۶/۸ به ۱۲/۴ افزایش یافت؛ بنابراین، افزودن نانوذرات سیلیکا به پلیمر باعث بهبود خواص ضد شعله و افزایش مقاومت حرارتی می‌شود [۲۲].

جدول ۳. داده‌های به دست آمده از آنالیز گرما وزن سنجی

نمونه	دمای اولیه تخریب	دمای ۳۰ درصد کاهش وزن	بیشینه دمای تخریب	درصد ذغال باقیمانده در ۶۰۰ (°C)
رزین اپوکسی وینیل استر	۳۸۷	۴۰۰	۴۱۶	۶/۸
نانوکامپوزیت اپوکسی وینیل استر حاوی ۴ درصد وزنی نانو سیلیکا	۳۹۰	۴۰۶	۴۲۴	۱۲/۴

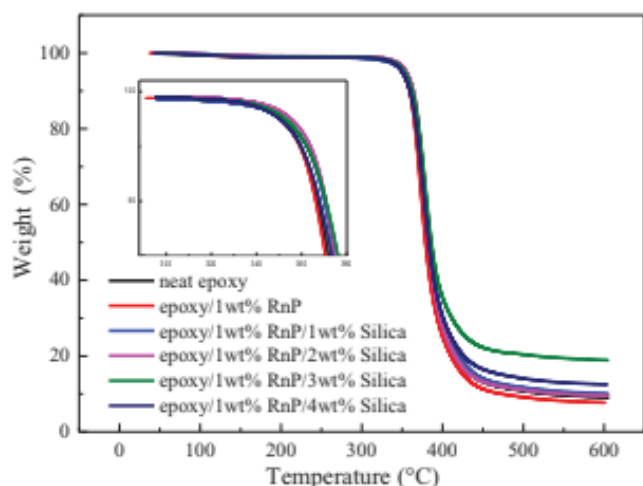
همچنین نتایج بررسی میزان تخریب گرمایی رزین اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانو سیلیکا نشان داد که تخریب مواد از حدود ۳۱۰ تا ۳۲۰ درجه سانتیگراد برای همه کامپوزیت‌ها شروع می‌شود. کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه، کاهش وزن یک درصد را در حدود ۳۱۳ درجه سانتیگراد تجربه می‌کند، در حالی که کامپوزیت‌های نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و یک درصد نانو سیلیکا و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و ۳ درصد نانو سیلیکا به ترتیب در حدود ۳۱۷

و ۳۲۱ درجه سانتیگراد یک درصد وزن خود را از دست می‌دهند [۲۳] همچنین رزین اپوکسی خالص در حدود ۳۳۰ تا ۴۳۰ درجه سانتیگراد شروع به تخریب می‌کند. پایداری گرمایی با حضور یک و ۳ درصد وزنی نانو سیلیکا در ماتریس اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، افزایش می‌یابد. حضور یک درصد نانو سیلیکا درصد ذغال باقیمانده را ۶۰ تا ۶۵ درصد و حضور ۳ درصد وزنی نانو سیلیکا، ۶۲ درصد ذغال باقیمانده را بهبود می‌بخشد. بنابر این حضور نانو سیلیکا در ماتریس اپوکسی، می‌تواند به‌عنوان تاخیرانداز شعله عمل



شکل ۷. نمودار گرما وزن سنجی کامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی

نانوکامپوزیت‌ها اپوکسی، در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌شود [۲۷] ذغال باقیمانده رزین اپوکسی از نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات لاستیک بیشتر است زیرا حضور ذرات لاستیکی منجر به کاهش ذغال باقیمانده نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود. همچنین حضور نانوذرات سیلیکا در رزین اپوکسی، ذغال باقیمانده را در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می‌دهد. بنابراین مشخص می‌شود مقاومت گرمایی نانوذرات سیلیکا در مقایسه با نانوذرات لاستیکی بیشتر است. به طور کلی حضور همزمان دو نوع نانوذرات در رزین اپوکسی منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی می‌شود [۲۸].



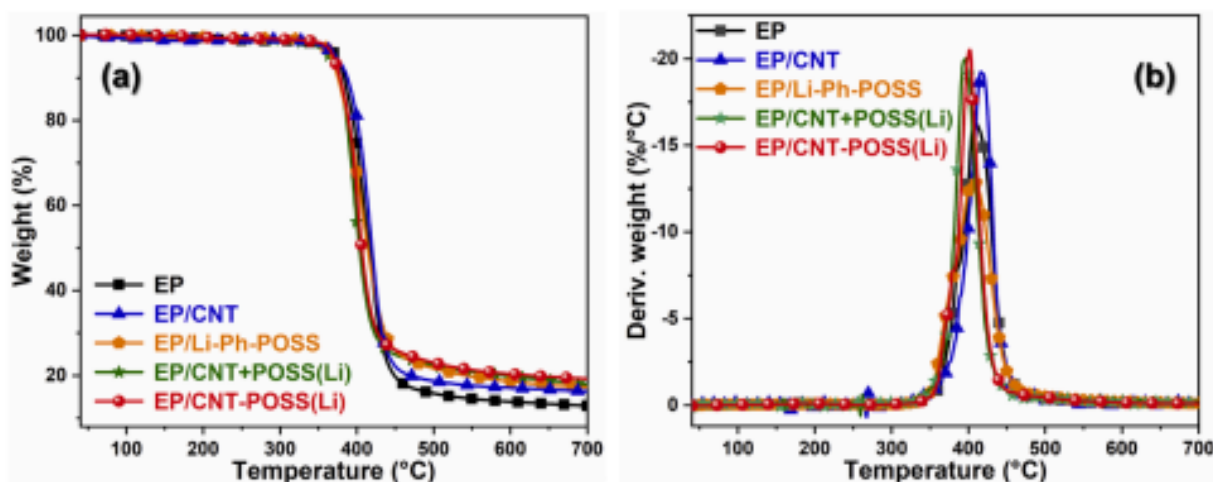
شکل ۸. نمودار آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اثر همزمان نانوذرات زیرکونیوم اکساید و نانوذرات سیلیکا بر رفتار گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد حضور همزمان دو نوع نانوذرات باعث افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص می‌شود. با افزایش مقدار نانوذرات، شبکه‌ای شدن افزایش می‌یابد و در نتیجه تحرک زنجیره‌ها کاهش می‌یابد، و پایداری گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه دمای تخریب گرمایی با افزودن نانوذرات کاهش می‌یابد. حضور همزمان دو نوع نانوذرات بدون حضور پرکننده (میکرو پرکننده)، منجر به اثر هم افزایی در

کند و تخریب گرمایی رزین اپوکسی را به تاخیر بیاندازد [۲۴]. در پژوهشی دیگر، آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت حاوی نانو سیلیکا و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با پلی متیل سیلوکسان بررسی شد. نتایج نشان داد که بیشترین کاهش وزنی بر اثر تخریب گرمایی در محدوده ۳۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می‌افتد. حضور نانو سیلیکا منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی شده است. در دماهای بالا، تخریب نانوکامپوزیت اپوکسی منجر به افزایش سرعت تشکیل ذغال می‌شود. همچنین حضور نانو سیلیکای اصلاح شده باعث افزایش ذغال باقیمانده می‌شود. بنابر این اصلاح سطح منجر به بهبود پایداری گرمایی رزین اپوکسی می‌شود [۲۵].

بررسی اثر آنالیز گرماسنج وزنی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ذرات سیلیکا، فسفر و نیتروژن بررسی شد. نتایج نشان داد که پایداری گرمایی کامپوزیت اپوکسی از رزین اپوکسی بیشتر است. همچنین بیشینه دمای تخریب گرمایی رزین اپوکسی بیشتر از نانوکامپوزیت اپوکسی می‌باشد. همچنین رفتار مکانیسم تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی تک مرحله‌ای می‌باشد. همچنین حضور همزمان ذرات سیلیکا، فسفر و نیتروژن در ترکیب با رزین اپوکسی می‌تواند به عنوان تاخیرانداز شعله عمل کند و تخریب گرمایی رزین اپوکسی را به تاخیر بیاندازد [۲۶]. پژوهشگران آنالیز گرما وزن سنجی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات لاستیک و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات لاستیک و نانو ذرات سیلیکا بررسی شد (شکل ۸). نتایج نشان داد که پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، کاهش پیدا نمی‌کند. دمای اولیه تخریب گرمایی رزین اپوکسی با افزودن نانوذرات افزایش پیدا می‌کند. این افزایش به دلیل مساحت سطح زیاد نانوذرات است که منجر به افزایش دمای اولیه تخریب گرمایی

یک عامل سدکننده در برابر تخریب گرمایی رفتار کند [۳۱]. پژوهشگران به منظور افزایش خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی، نانولوله‌های کربنی چند دیواره کربوکسیله شده و هپتا لیتیم سیلوکسان (Li-Ph-POSS)، را سنتز کردند (شکل ۹). برای داشتن هم زمان گروه‌های سیلیکونی در کنار نانولوله‌های کربنی، از هپتا لیتیم سیلوکسان استفاده شد. نتایج آنالیز گرما وزن سنجی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی نشان داد که اثر کمی بر دمای اولیه تخریب گرمایی دارد. حضور هپتا لیتیم سیلوکسان در ترکیب با اپوکسی هم مقدار بسیار کمی دمای تخریب گرمایی را کاهش داده است [۳۲] همچنین بیشینه تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی و گروه‌های سیلوکسان، از دیگر نمونه‌ها بیشتر بود. حضور نانولوله‌های کربنی فرایند تخریب گرمایی را به تاخیر می‌اندازد و در نتیجه، ذغال باقیمانده افزایش می‌یابد؛ بنابراین حضور ۲ درصد وزنی از نانولوله کربنی اصلاح شده با ذرات سیلوکسان (گروه‌های سیلیکونی)، می‌تواند ذغال باقیمانده را افزایش دهد و در نتیجه، پایداری گرمایی رزین اپوکسی را در مقایسه با دیگر نمونه‌ها، افزایش دهد [۳۳].

رفتار گرمایی داشته است و پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی را افزایش می‌دهد [۲۹]. در پژوهشی دیگر، اثر فسفان ترن و نانو سیلیکا بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی (سیکلو آلیفاتیک) در دو محیط اکسیژن و نیتروژن بررسی شد. نتایج آنالیز گرما وزن سنجی در محیط نیتروژن نشان داد که رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی دارای رفتار تخریب گرمایی دو مرحله‌ای است. این رفتار ناشی از تفاوت انرژی بین ساختار سیلوکسان و پیوندهای استری یا گروه‌های فسفات می‌باشد. همچنین رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در محیط اکسیژن متفاوت بود. در این محیط تخریب گرمایی دارای مکانیسم تخریب گرمایی سه مرحله‌ای بودند [۳۰] در مرحله اول تخریب گرمایی در محیط اکسیژن، درصد ذغال باقیمانده تغییری نکرد. همچنین در دمای ۴۰۰ درجه سانتیگراد (مرحله دوم تخریب گرمایی)، درصد ذغال باقیمانده تمام نمونه تغییر پیدا کرد. این عدم تغییرات ذغال باقیمانده را در مرحله اول تخریب گرمایی را می‌توان به دلیل حضور اکسیژن به‌عنوان یک عامل سومند در کنار ذرات سیلیکا دانست که می‌تواند به‌عنوان



شکل ۹. آنالیز گرمایی (a). نمودار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی (b). نمودار مشتق توزیع وزنی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا، آهن پلی فسفینات و گرافن سنز شد. هدف از این سنتز بهبود خواص گرمایی رزین اپوکسی می‌باشد. با قرار گرفتن در معرض آتش، برخی از زنجیره‌های پلیمر ناپایدار در نانوکامپوزیت شروع به تخریب می‌کند و در این فرایند، دود سمی آزاد می‌شود. با افزایش زمان قرارگیری در معرض آتش، گرفتن اصلاح شه با نانوذرات سیلیکا که از نظر حرارتی پایدار است، به‌عنوان یک مانع عمل می‌کند و انتقال حرارت، اکسیژن و محصولات فرار را مهار می‌سازد و در نتیجه سوختن ماتریس را کندتر می‌کند. در عین حال، پلی فسفینات حاوی ذرات آهن در نانوکامپوزیت می‌تواند در حین احتراق فسفر و اسیدهای متافسفریک را آزاد کند که باعث کاتالیز ماتریس اپوکسی برای دهیدراته شدن و کربن‌سازی به لایه‌های ذغال با کیفیت بالا می‌شود. ترکیبات آهن و گرفتن اصلاح شده با نانوذرات سیلیکی، همچنین چگالی لایه‌های ذغال را افزایش می‌دهند [۲۹-۳۰] این لایه‌های ذغال با درجه گرافیت‌زدایی بالا به‌عنوان موانع حفاظتی عمل می‌کنند که نفوذ حرارت و اکسیژن را مسدود کرده و از آزاد شدن گازهای قابل احتراق جلوگیری می‌کنند، در نتیجه به طور مؤثری سوختن ماتریس اپوکسی را مهار می‌کنند. به طور خلاصه، افزایش مقاومت در برابر آتش نانوکامپوزیت اپوکسی، عمدتاً به اثرات مانع و کربن‌سازی نانوذرات سیلیکا، گرافن و پلی فسفینات آهن نسبت داده می‌شود؛ بنابراین حضور این مواد در کنار یکدیگر، پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد و خواص ضد شعله را بهبود می‌بخشد [۳۱].

۵. پیشرفت‌های اخیر

پژوهشگران، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات زیست سیلیکا و کوپلیمر وینیل را برای بهبود مقاومت به ضربه و پایداری حرارتی سنتز کردند. زیست سیلیکا از بیومس پوسته برنج با فرایند کلسینه تولید شد. نتایج نشان داد که با استفاده مشترک از ۱ درصد وزنی نانوذرات سیلیکا و ۵ درصد وزنی کوپلیمر وینیل (اسید اکریلیک و هیدروکسی اتیل اکریلات) نانوکامپوزیت بالاترین مقاومت کششی

و مقاومت به ضربه رزین افزایش پیدا کرد [۳۰]. در پژوهش دیگری، نانوذرات سیلیکای حاصل از فضولات گاوی به روش سل ژل سنتز تهیه شد و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی زیست تخریب‌پذیر با درصدهای وزنی مختلف ساخته شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که نمونه با ۸ درصد وزنی از نانوذرات سیلیکا، عملکرد بالایی در خواص خمشی از خود نشان داد. همچنین با افزایش درصد وزنی نانوذرات سیلیکا، پایداری حرارتی در مقایسه با رزین اپوکسی، افزایش یافت. این نتایج تأکید بر پتانسیل بالای استفاده از نانوذرات سیلیکای حاصل از زیست پساب در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی زیست تجزیه‌پذیر دارد و می‌تواند به توسعه مواد جدیدی با ویژگی‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست کمک کند [۳۱]. اثر نانو گرافن اکساید و نانو سیلیکا بر خواص مکانیکی و حرارتی رزین اپوکسی حاوی الیاف شیشه بررسی شد. بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته‌شده نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا تا ۴ درصد وزنی، استحکام خمشی و کششی بالاتری را در مقایسه با رزین اپوکسی خالص به نمایش می‌گذارد. همچنین افزایش درصد دی‌اکسید سیلیکون موجب بهبود استحکام کامپوزیت می‌شود. نتایج FTIR وجود ارتعاشات کششی غیرمتقارن ناشی از تأثیر پرکننده‌های هیبریدی را تأیید می‌کند. نتایج تحلیل آزمون گرموزن‌سنجی‌شان می‌دهد که افزودن نانوذرات سیلیکا انرژی فعال‌سازی را از مقدار ۲۴/۲۲ به ۳۱/۵ کیلوژول بر مول افزایش می‌دهد [۳۲].

رزین اپوکسی خالص دارای چقرمگی شکست کم و پایداری حرارتی پایینی بود. استفاده از لاستیک مایع عملکردی به بهبود چقرمگی شکست همراه با کاهش پایداری حرارتی رزین اپوکسی منجر شد؛ بنابراین برای بهبود هم‌زمان چقرمگی شکست و پایداری حرارتی رزین اپوکسی، از پلی آکریلو نیتریل و نانوذرات سیلیکا (پوسته برنج) به‌عنوان افزودنی استفاده شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت کششی با افزودن ذرات به

هپتا فنیل پلی هدرال الیگومریک سیلوکسان (گروه‌های سیلیکونی) بر رفتار خواص ضد شعله رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که افزایش زبری سطح نانولوله‌های کربنی به طور مؤثری مشکل کارایی ناکافی خواص ضد شعله که بر اثر تجمع مواد ایجاد شده بود را برطرف می‌کند. افزودن نانولوله‌های کربنی حاوی ذرات سیلوکسان می‌تواند فرایند کربن‌سازی را بهبود بخشد و در نتیجه، حرکت زنجیره‌های اپوکسی محدود می‌شود و دمای انتقال شیشه‌ای بهبود می‌یابد؛ بنابراین لایه کربنی تشکیل شده حاوی ذرات سیلیکا و کربن می‌تواند به بهبود خواص ضد شعله کمک کند [۳۶-۳۷].

به‌منظور افزایش خواص ضد شعله و پایداری گرمایی رزین اپوکسی، از پلی فسفینات آهن، نانوذرات سیلیکا و گرافن استفاده شد. این لایه‌های ذغال با درجه گرافیت‌زدایی بالا به‌عنوان موانع حفاظتی عمل می‌کند و از آزاد شدن گازهای قابل احتراق جلوگیری می‌کند، در نتیجه به طور مؤثری سوختن ماتریس اپوکسی را مهار می‌کند؛ بنابراین حضور این مواد در کنار یکدیگر، پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد و خواص ضد شعله رزین اپوکسی را بهبود می‌بخشد [۳۸-۴۰] در جدول ۴، مهم‌ترین دستاوردهای جدید در حوزه ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکای اصلاح شده، جمع‌آوری شده است.

رزین اپوکسی به میزان ۱۶/۱۶ درصد از ۴۰/۹ مگاپاسکال به ۴۷/۵۱ مگاپاسکال بهبود یافت. پایداری حرارتی رزین اپوکسی نیز با وجود ذرات که دارای ساختار هسته پوسته هستند، بهبود یافت. همچنین هدایت الکتریکی رزین اپوکسی با در مقایسه با اپوکسی خالص ۱۷۸ برابر افزایش یافت [۳۳].

اثر نانو سیلیکا، فسفر آمیدیت و تترامتیل دی سیلوکسات بر خواص ضد شعله رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که نه تنها که خواص ضد شعله افزایش می‌یابد، بلکه خواص مکانیکی (چقرمگی و شفافیت) افزایش می‌یابد. همچنین نانوکامپوزیت ساخته شد، استحکام ضربه نیز در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش می‌یابد [۳۴].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا، کیتوسان و پلی هدرال الیگومریک سیلوکسان (POSS)، سنتز شد. نتایج این تحقیق نشان داد که خواص مکانیکی و پایداری گرمایی افزایش می‌یابد. همچنین حضور کیتوسان در نانوکامپوزیت منجر به خواص ضدباکتری این نانوکامپوزیت شده است. نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نانوذرات سیلیکا اصلاح شده با گروه سیلوکسان و کیتوسان می‌تواند منجر به بهبود پراکنش نانوذرات شود [۳۵].

اثر نانولوله‌های کربنی چند دیواره کربوکسیله شده، لیتیم

جدول ۴. مروری بر پیشرفت‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکای اصلاح شده

نمونه	سال	نتایج مهم
اپوکسی - زیست سیلیکا - کویلیمر وینیل	۲۰۲۴	افزایش خواص مکانیکی و خواص حرارتی
اپوکسی - نانوذرات سیلیکای حاصل از فضولات گاوی	۲۰۲۴	افزایش خواص مکانیکی و خواص حرارتی
اپوکسی - گرافن اکساید - الیاف شیشه - نانو سیلیکا	۲۰۲۴	افزایش خواص مکانیکی و خواص حرارتی

افزایش خواص مکانیکی و خواص حرارتی	۲۰۲۴	اپوکسی - پلی آکریلو نیتریل - نانو سیلیکا
افزایش خواص مکانیکی و خواص حرارتی، بهبود پراکنش	۲۰۲۲	اپوکسی - نانو سیلیکای اصلاح شده با سیلان
افزایش خواص ضد شعله	۲۰۲۵	اپوکسی - نانو سیلیکا - فسفر آمیدیت - تترامتیل دی سیلوکسات
پخت مناسب - کاربرد زیست فناوری - بهبود چقرمگی شکست - افزایش پایداری گرمایی - بهبود پراکنش	۲۰۲۵	اپوکسی - کیتوسان - نانو سیلیکا - پلی هدرال الیگومریک سیلوکسان (POSS)
افزایش خواص مکانیکی	۲۰۲۱	اپوکسی - الیاف شیشه - نانو سیلیکا - نانوذرات آهن کبالت ((CoFe ₂ O ₄))
افزایش هم زمان خواص مکانیکی و پایداری گرمایی	۲۰۲۵	اپوکسی - رسوراترول - دی کلرو دی فنیل سیلان
بهبود خواص ضد شعله	۲۰۲۵	اپوکسی - نانو سیلیکا - نانولوله های کربنی چند دیواره کربوکسیله شده - لیتیم هپتا فنیل پلی هدرال الیگومریک سیلوکسان (POSS)
بهبود پایداری گرمایی	۲۰۲۴	اپوکسی - نانو سیلیکا - پلی فسفینات آهن - گرافن

نتیجه گیری

گروه های لیتیم سیلوکسان، تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت ها دارد و می تواند از تجمع و کلوخه ای شدن ذرات جلوگیری کند. افزودن نانوذرات لاستیک و سیلیکا نیز منجر به افزایش مدول ذخیره و سفتی نانوکامپوزیت ها می شود. به علاوه، نتایج نشان می دهد که حضور هم زمان نانوذرات سیلیکا و کبالت آهن در رزین اپوکسی، استحکام خمشی و سختی را بهبود می بخشد. این بهبودها به دلیل تعامل مؤثر بین نانوذرات و ماتریس اپوکسی و همچنین جلوگیری از گسترش میکرو ترک ها در ماتریس نانو فازی است. در نهایت، این نتایج نشان دهنده پتانسیل بالای نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت های اپوکسی است و می تواند به توسعه مواد جدید با عملکرد بهتر در کاربردهای صنعتی و مهندسی

نتایج این پژوهش ها نشان می دهد که نانوذرات سیلیکا و هیدروکسی آپاتیت تأثیر قابل توجهی بر مورفولوژی و خواص مکانیکی رزین های اپوکسی دارند. بررسی ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی نشان داد که نانوذرات سیلیکا به خوبی در ماتریس اپوکسی پراکنده می شوند و از کلوخه ای شدن جلوگیری می کنند. همچنین، اصلاح سطح نانوذرات سیلیکا با پلی متیل سیلوکسان منجر به بهبود پراکنش و کاهش اندازه ذرات می شود که این امر به افزایش کارایی نانوکامپوزیت ها کمک می کند. افزودن نانولوله های کربنی به نانوکامپوزیت های اپوکسی نیز به بهبود پراکنش و کاهش تجمع ذرات کمک کرده و باعث افزایش یکنواختی در توزیع نانوذرات می شود. همچنین، اصلاح سطح نانوذرات با گروه های مختلف، مانند

کیتوسان، به بهبود خواص ضد شعله و پایداری حرارتی این کامپوزیت‌ها منجر شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی نانوذرات، بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی و حرارتی مشاهده می‌شود. به علاوه، استفاده از نانوذرات سیلیکا در ترکیب با دیگر افزودنی‌ها، مانند گرافن و پلی فسفینات آهن، به طور مؤثری خواص ضد شعله و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد. این پیشرفت‌ها می‌تواند به توسعه مواد جدیدی با ویژگی‌های پایدار و سازگار با محیط‌زیست کمک کند و زمینه‌ساز کاربردهای گسترده‌تری در صنایع مختلف باشد. در نهایت، این تحقیقات نشان‌دهنده پتانسیل بالای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات سیلیکا، در بهبود عملکرد و کارایی مواد در کاربردهای صنعتی و فناوری‌های نوین است.

منجر شود. نتایج بررسی‌های انجام شده در زمینه پایداری گرمایی رزین‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های حاوی نانو سیلیکا و دیگر افزودنی‌ها نشان می‌دهد که افزودن این مواد به طور قابل توجهی می‌تواند پایداری گرمایی را افزایش دهد. به ویژه، حضور نانو سیلیکا و اکسید روی به عنوان کاتالیزور، بهبود قابل توجهی در دمای تخریب و درصد ذغال باقیمانده ایجاد می‌کند. همچنین، تعاملات بین فازهای آلی و غیرآلی در این کامپوزیت‌ها، به تأخیر در فرایند تخریب گرمایی و افزایش پایداری گرمایی منجر می‌شود. استفاده از نانوذرات سیلیکا، به ویژه نانوذرات زیست‌سیلیکا و نانوذرات حاصل از فضولات گاوی، به طور مؤثری به افزایش مقاومت کششی و ضربه‌ای رزین‌های اپوکسی کمک کرده است. همچنین، ترکیب نانوذرات با پلیمرهای مختلف مانند کوپلیمر وینیل و

منابع

1. Ik.Kim, K.-M.; Kim, H.; Kim, H.-J. Enhancing Thermo-Mechanical Properties of Epoxy Composites Using Fumed Silica with Different Surface Treatment. *Polymers* 2021, 13, 2691.
2. Zhang, Y.; Shi, C.; Qian, X.; Jing, J.; Jin, L. DOPO/Silicon/CNT Nanohybrid Flame Retardants: Toward Improving the Fire Safety of Epoxy Resins. *Polymers* 2022, 14, 565. <https://doi.org/10.3390/polym14030565>
3. Alireza Albooyeh, Peyman Soleymani, Hossein Taghipoor, Evaluation of the mechanical properties of hydroxyapatite-silica aerogel/epoxy nanocomposites: Optimizing by response surface approach, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 136,2022,105513.
4. Kim, K.-M.; Kim, H.; Kim, H.-J. Enhancing Thermo-Mechanical Properties of Epoxy Composites Using Fumed Silica with Different Surface Treatment. *Polymers* 2021, 13, 2691. <https://doi.org/10.3390/polym13162691>
5. Wang S, Cao M, Xue H, et al. Nano-silica reinforced epoxy resin/nano-rubber composite material with a balance of stiffness and toughness. *High Performance Polymers*. 2021;33(6):685-694.
6. E.P. Ayswarya, Ajalesh B. Nair, Eby Thomas Thachil, A comparative study of mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of rice husk ash, modified rice husk ash and nano silica filled epoxy composites, *Materials Today: Proceedings*, Volume 47, Part 15, 2021, Pages 5351-535
7. Alireza Albooyeh, Peyman Soleymani, Hossein Taghipoor, Evaluation of the mechanical properties of hydroxyapatite-silica aerogel/epoxy nanocomposites: Optimizing by response surface approach, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Volume 136,2022,105513.
8. Megahed M, Tobbala DE, El-baky MAA. The effect of incorporation of hybrid silica and cobalt ferrite nanofillers on the mechanical characteristics of glass fiber-reinforced polymeric composites. *Polymer Composites*. 2020;1-14.
9. Shivam Verma, Ankur Singh Thakur, Nitin Sharma, Saurabh Kango, Molecular dynamics investigation of epoxy for advanced applications: Combined impact of silica and alumina nanoparticles, *Materials Today: Proceedings*, 2024.
10. Qiang Chen, Siqi Huo, Yixia Lu, Mingmei Ding, Jiabing Feng, Guobo Huang, Hang Xu, Ziqi Sun, Zhengzhou Wang, Pingan Song, Heterostructured Graphene@Silica@Iron Phenylphosphate for Fire-Retardant, Strong, Thermally Conductive Yet Electrically Insulated Epoxy Nanocomposites, *Nano micro small*, Volume20, Issue31 August 1, 2024, 2310724.
11. Farzana Yeasmin, Abul K. Mallik, Adib H. Chisty, Fataha N. Robel, Md. Shahruzzaman, Papia Haque,

Mohammed Mizanur Rahman, Nanami Hano, Makoto Takafuji, Hirotaka Ihara, Remarkable enhancement of thermal stability of epoxy resin through the incorporation of mesoporous silica micro-filler, *Heliyon*, Volume 7, Issue 1, 2021, e05959

12. Alam, M.A.; Samad, U.A.; Anis, A.; Alam, M.; Ubaidullah, M.; Al-Zahrani, S.M. Effects of SiO₂ and ZnO Nanoparticles on Epoxy Coatings and Its Performance Investigation Using Thermal and Nanoindentation Technique. *Polymers* 2021, 13, 1490. <https://doi.org/10.3390/polym1309149>

13. E.P. Ayswarya, Ajalesh B. Nair, Eby Thomas Thachil, A comparative study of mechanical, dynamic mechanical and thermal properties of rice husk ash, modified rice husk ash and nano silica filled epoxy composites, *Materials Today: Proceedings*, Volume 47, Part 15, 2021, Pages 5351-5357,

14. Arabli, V., & Aghili, A. (2014). The effect of silica nanoparticles, thermal stability, and modeling of the curing kinetics of epoxy/silica nanocomposite. *Advanced Composite Materials*, 24(6), 561–577.

15. Selver E, Öztaş B, Uçar M, et al. Mechanical and thermal properties of glass/epoxy composites filled with silica aerogels. *Plastics, Rubber and Composites*. 2021;50(8):371-383

16. Kim, K.-M.; Kim, H.; Kim, H.-J. Enhancing Thermo-Mechanical Properties of Epoxy Composites Using Fumed Silica with Different Surface Treatment. *Polymers* 2021, 13, 2691.

17. Minghui Fang, Jun Qian, Xuezhi Wang, Zhong Chen, Ruilin Guo, Synthesis of a Novel Flame Retardant Containing Phosphorus, Nitrogen, and Silicon and Its Application in Epoxy Resin, *ACS Omega* 2021, 6, 10, 7094–7105

18. Wang S, Cao M, Xue H, et al. Nano-silica reinforced epoxy resin/nano-rubber composite material with a balance of stiffness and toughness. *High Performance Polymers*. 2021;33(6):685-694.

19. Yonghao Lv, Hongyan Li, Zhu-Bao Shao, Zhiming Jiang, One-pot solvent-free synthesis of self-catalyzed phosphorus/silicon cycloaliphatic epoxy resin with excellent flame-retardant and dielectric property, *Polymer*, Volume 320, 2025, 128087.

20. Xinming Ye, Yifan Zhang, Qianru Guo, Fan Yang, Yunlan Liu, Jiankun Bai, Tong Liu, Xinyi Jing, Fei Xiao, Fengchao Li, Wensheng Wang, Jie Li, Yingchun Li, Designing silicon-containing nanotube architectures to impart epoxy resin high-efficient flame retardancy, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 232, 2025, 111129.

21. Vu, C.M., Bui, X.K. & Dinh, V.C. Simultaneous improvement impact strength and thermal stability of epoxy resin by using bio-silica and a thermoplastic. *Polym. Bull.* 81, 6761–6771 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00289-023-05036-5>

22. Venkatesh, R., Karthikeyan, M.K.V., Sasikumar, R. et al. Effective utilization of silica from waste cow

- dung ash filler reinforced biodegradable jute epoxy composites: influence of silica on its mechanical properties. *Biomass Conv. Bioref.* 14, 22401–22411 (2024).
23. Murugesan, K., Suresh, P., Prabu, M. et al. Effect of graphene/silicon dioxide fillers addition on mechanical and thermal stability of epoxy glass fibre composite. *Polym. Bull.* 81, 9961–9976 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00289-024-05189-x>
 24. Vu, C.M., Van Vu, T. Influence of SiO₂@PANI Core/Shell Particles on Mechanical Properties, Electrical Properties, and Thermal Aging of Epoxy Resin. *Silicon* 16, 25–33 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12633-023-02649-3>
 25. Yufei Cao, Lan Ding, Ling Sun, Jinke Yu, Xiaohui Liu, Yuanlin Ren, Yuesheng Li, flexible silicon-oxygen chain segment-containing phosphoramidite toward modification of epoxy resin: Flame retardancy, toughness and transparency, *European Polymer Journal*, Volume 223, 2025, 113636.
 26. Mohamadmahdi Sajadifar, Morteza Ehsani, Davood Zaarei, Hossein Ali Khonakdar, Volume65, Issue1, *polymer engineering and science*, January 2025, Pages 135-148.
 27. Xinming Ye, Yifan Zhang, Qianru Guo, Fan Yang, Yunlan Liu, Jiankun Bai, Tong Liu, Xinyi Jing, Fei Xiao, Fengchao Li, Wensheng Wang, Jie Li, Yingchun Li, Designing silicon-containing nanotube architectures to impart epoxy resin high-efficient flame retardancy, *Polymer Degradation and Stability*, Volume 232, 2025, 111129.
 28. Yong Tang, Xiyu Zhang, Zheng Liu, Xiaoya Liu, Xiaojie Li, A resveratrol-based P/Si-containing hyperbranched flame retardant for simultaneously enhancing fire safety and mechanical properties of epoxy thermosets, *Chemical Engineering Journal*, Volume 506, 2025, 160240.
 29. Megahed M, Tobbala DE, El-baky MAA. The effect of incorporation of hybrid silica and cobalt ferrite nanofillers on the mechanical characteristics of glass fiber-reinforced polymeric composites. *Polymer Composites*. 2020;1–14.
 30. Arabli, V., & Aghili, A. (2014). The effect of silica nanoparticles, thermal stability, and modeling of the curing kinetics of epoxy/silica nanocomposite. *Advanced Composite Materials*, 24(6), 561–577.
 31. Kim, K.-M.; Kim, H.; Kim, H.-J. Enhancing Thermo-Mechanical Properties of Epoxy Composites Using Fumed Silica with Different Surface Treatment. *Polymers* 2021, 13, 2691.
 32. Zhang, Y.; Shi, C.; Qian, X.; Jing, J.; Jin, L. DOPO/Silicon/CNT Nanohybrid Flame Retardants: Toward Improving the Fire Safety of Epoxy Resins. *Polymers* 2022, 14, 565.
 33. Sharif, M., & Tavakoli, S., “Biodegradable chitosan-graphene oxide as an effective green filler for improving properties in epoxy nanocomposites”, *International Journal of Biological Macromolecules*, 233: pp. 123550, (2023).

34. George, J.S., Vijayan, P.P., Ponçot, M., Paduvilan, J.K., & Thomas, S., "Viscoelastic and rheokinetic behaviour of cellulose nanofiber/cloisite 30B hybrid nanofiller reinforced epoxy nanocomposites", *Chemical Engineering Journal*, 498: pp. 155170, (2024).
35. Ganjaee Sari, M., Ramezanzadeh, B., Pakdel, A.S., Shahbazi, M., "A physico-mechanical investigation of a novel hyperbranched polymer-modified clay/epoxy nanocomposite coating", *Progress in Organic Coatings*, 99: pp. 1, (2016).
36. Rudawska, A., "The effects of temperature on mechanical properties of neat and montmorillonite reinforced epoxy compounds", *The Journal of Adhesion*, 101(1): pp. 265–298, (2024).
37. Ganvir, V.Y., & Ganvir, H.V., "Moisture absorption behavior of epoxy-kenaf composites enhanced with surface-modified nano-clay", *Interactions*, 246: pp. 3, (2025).
38. Al-kawaz, A.E., Al-Mutairi, N.H., & Alobad, Z.K.M., "Tribological behavior of epoxy/nano-clay nanocomposites used as a floor coating", *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(23): pp. 4299–4315, (2024).
39. Shahrajabian, H., & Vaezzadeh, H., "The nano-clay effect on the improvement of the thermal, flammability, and mechanical behavior of epoxy/glass fiber/ATH hybrid composites", *Journal of Composite Materials*, 58(23): pp. 2545-2554, (2024).
40. Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M., "Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix", *Polymer Composite*, 45(4): pp. 2919-2926, (2023).

IRM

T The Effect of Modified Nanosilica on the Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability, and Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposite

Mohammad Hossein Karmi¹, Omid Moini Jazani^{2*}

1- Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box ,Isfahan, 81746-73441, Iran

2-Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box ,Isfahan, 81746-73441, Iran

*Corresponding author Email: o.moini@eng.ui.ac.ir

Abstract

Epoxy resin is recognized as one of the primary thermosetting polymers due to its remarkable physical, mechanical and chemical properties. These include excellent tensile and compressive strengths, high thermal distortion temperature, and desirable chemical resistance. As a result, it finds widespread applications across various industries, including adhesives, coatings, electronics, high-performance composites, wind turbines, and molding processes. These resins possess a high degree of cross-linking, which is essential for achieving suitable mechanical and thermal properties. However, the structures formed in epoxy resins cured with hardeners exhibit a high density of cross-links, leading to brittleness and vulnerability to impact damage. To address this challenge and enhance the physical and mechanical properties, one approach is to combine them with other polymeric materials or nanocomposites. Silica nanoparticles have a significant impact on the mechanical and thermal properties of epoxy nanocomposites, leading to improvements in dispersion, thermal stability, and tensile strength. Furthermore, the interactions between the nanoparticles and the epoxy matrix contribute to the increased strength and efficiency of these nanocomposites in industrial applications. This research focuses on examining the effect of modified silica nanoparticles on the morphology, mechanical properties, thermal stability, thermal degradation behavior, and recent advancements in this field.

Keywords: Epoxy Resin, Modified Nano Silica, Morphology, Mechanical properties, Thermal Degradation.