Review Article

DOI: 10.22034/ijche.2025.504534.1499

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

Analysis of Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability and Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposites Containing Modified Nanoclays

M. H. Karami[1], O. Moini Jazani[2*]

1- Postdoctoral Researcher of Polymer Engineering, University of Isfahan

2- Associate Professor of Polymer Engineering, University of Isfahan

Email: o.moini@eng.ui.ac.ir

Abstract

Studies indicate that the uniform distribution of clay nanoparticles within an epoxy matrix, particularly in the presence of chemical modifiers, significantly enhances the properties of nanocomposites. Research findings demonstrate that the modification of clay nanoparticles positively impacts the mechanical properties of epoxy resins. Epoxy nanocomposites containing modified clay nanoparticles with various functional groups exhibit notable increases in tensile strength and Young's modulus. These improvements are attributed to the proper dispersion of nanoparticles and optimal interactions between the resin and clay. This study also investigates the thermal stability and thermal degradation of epoxy nanocomposites, revealing that the incorporation of clay nanoparticles into epoxy formulations can substantially enhance their thermal and mechanical properties. Overall, the research concludes that epoxy nanocomposites utilizing both clay nanoparticles and modified clay significantly improve thermal stability and mechanical characteristics, making them suitable for high-performance industrial applications that require heat and thermal degradation resistance. Additionally, this study explores the effects of modified clay nanoparticles on morphology, mechanical properties, thermal stability, and recent advancements in epoxy resin and hybrid epoxy nanocomposites.

Received: 4 February 2025
Accepted: 20 May 2025
Page Number: 108-123

Keywords:
Epoxy Resin,
Nano Clay,
Morphology,
Mechanical Properties,
Thermal Degradation

Please Cite this Article Using:

Karami, M. H., & Moini Jazani, O. (2026). Analysis of Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability and Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposites Containing Modified Nanoclays. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *24*(143), 108-123, [In Persian].

مقـــالـــــه مـــــروری

DOI: 10.22034/ijche.2025.504534.1499

This journal is an open access journal licensed under an Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license(CC BY-NC-ND 4.0).

آنالیز ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده

محمدحسین کرمی[۱]، امید معینی‌جزنی[۲*]

۱- پژوهشگر پسا دکتری مهندسی پلیمر، دانشگاه اصفهان

۲- دانشیار مهندسی پلیمر، دانشگاه اصفهان

پیام‌نگار: o.moini@eng.ui.ac.ir

چکیده

توزیع یکنواخت نانوذرات رس در ماتریس اپوکسی، به‌ویژه بااستفاده‌از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، می‌تواند به بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها کمک‌کند. تحقیقات نشان‌می‌دهد که اصلاح نانورس تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی رزین‌های اپوکسی دارد. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی که حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های مختلف است، به‌طور قابل توجهی استحکام کششی و مدول یانگ را افزایش‌می‌دهد. این بهبود به‌دلیل پراکنش مناسب نانوذرات و تعامل بهینهٔ بین رزین و نانورس است. هم‌چنین، این مطالعه به بررسی پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌پردازد و نشان‌می‌دهد که افزودن نانورس به ترکیبات اپوکسی می‌تواند خواص گرمایی و مکانیکی این مواد را به‌طور قابل توجهی بهبودبخشد. به‌طور کلی، این پژوهش چنین نتیجه‌می‌گیرد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی بااستفاده‌از نانورس و نانوذرات رس اصلاح‌شده، به‌طور چشم‌گیری از نظر پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بهبودمی‌یابد و می‌توانند در کاربردهای صنعتی به‌عنوان موادی با عملکرد بالا و مقاوم دربرابر حرارت و تخریب گرمایی به‌کاررود. این تحقیق، هم‌چنین به بررسی اثر نانورس‌های اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و پیشرفت‌های اخیر درزمینهٔ رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های هیبرید می‌پردازد.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰
شماره صفحات: ۱۰۸ تا ۱۲۳

کلیدواژه‌ها:
رزین اپوکسی،
نانورس،
ریخت‌شناسی،
خواص مکانیکی،
تخریب گرمایی

* اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ فنی‌ومهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:
کرمی، محمدحسین، معینی‌جزنی، امید. (۱۴۰۴). آنالیز ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده، *نشریه مهندسی شیمی ایران*، ۲۴(۱۴۳)، ۱۲۳-۱۰۸.

۱. مقدمه

رزین اپوکسی به‌دلیل کارایی برجسته‌اش در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت دربرابر تنش‌های حرارتی و تخریب، به‌عنوان یکی‌از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت شناخته‌می‌شود. این ماده درزمینه‌های مختلفی، ازجمله: پوشش‌ها، چسب‌ها، ترکیبات قالب‌سازی و کامپوزیت‌های پلیمری کاربردهای وسیعی دارد[۱]. باتوجه‌به این ویژگی‌ها، بررسی تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند بر دامنهٔ دمایی و طول عمر سامانه تأثیربگذارد[۲].

در این راستا، نانوذرات رس به‌عنوان یکی‌از بهترین تقویت‌کننده‌های پلیمری شناخته‌می‌شوند. این نانوذرات که به سیلیکات‌های لایه‌ای یا سیلیکات‌های ورقه‌ای نیز معروف‌اند، دارای دو نوع ساختار ایده‌آل، یعنی میان‌لایه‌ای و ورقه‌ای هستند که می‌توانند برروی شکل‌گیری نانوکامپوزیت و چسبندگی بین ماتریس و نانوذرات تأثیرگذار باشند[۳]. به‌دلیل ساختار میان‌لایه‌ای و نسبت ابعاد (L/D) این نانوذرات، استفاده‌از آن‌ها در ترکیب با رزین اپوکسی می‌تواند به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها کمک‌کند. سخت‌کننده‌های به‌کاررفته برای واکنش رزین اپوکسی با نانوذرات رس از نوع انیدریدی و آمینی است[۴].

در صورت بهره‌برداری از نوع انیدریدی، شکل‌گیری نانوذرات رس به‌صورت ورقه‌ای خواهدبود؛ درحالی‌که استفاده‌از سخت‌کننده‌های آمینی منجربه شکل‌گیری ساختار میان‌لایه‌ای می‌شود. توزیع و پراکنش نانوذرات رس در ماتریس رزین اپوکسی دو عامل مهمی است که بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تأثیرمی‌گذارد[۵].

سرانجام، خواص سدکنندگی نانورس یا سیلیکات‌های لایه‌ای دربرابر هیدروژن و اکسیژن و هم‌چنین نوع ساختار آن‌ها می‌تواند به بهبود پایداری گرمایی رزین اپوکسی کمک‌کند. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به‌عنوان یکی‌از پیشرفته‌ترین مواد مرکب در صنایع مختلف شناخته‌می‌شود و با ترکیب رزین‌های اپوکسی و نانوذرات، ویژگی‌های منحصربه‌فردی را به‌نمایش‌می‌گذارد که می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد و دوام محصولات نهایی را بهبودبخشد[۶]. تحلیل ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به ما این امکان را می‌دهد که توزیع و اندازهٔ نانوذرات را در ماتریس اپوکسی درک و تأثیر آن را بر ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی بررسی‌کنیم[۸-۷].

بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به درک بهتری از نحوهٔ توزیع و تعامل نانوذرات در ماتریس کمک‌کند، که این امر می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد کلی مواد منجرشود. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها تحت تأثیر ساختار و ترکیب آن‌ها قرار دارد. با مطالعهٔ این خواص، می‌توان رفتار مواد را در شرایط مختلف، پیش‌بینی و از این اطلاعات برای طراحی مواد جدید استفاده‌کرد. تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر پایداری و عمر مفید آن‌ها داشته‌باشد. بررسی این ویژگی‌ها به تولیدکنندگان کمک‌می‌کند تا مواد با دوام‌تری را توسعه‌دهند که در دماهای بالا یا شرایط سخت محیطی عملکرد بهتری داشته‌باشند.

پژوهش درزمینهٔ اپوکسی و نانورس اصلاح‌شده می‌تواند به بررسی ترکیب‌های جدید این مواد و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و تخریب گرمایی بپردازد. علاوه‌براین، بررسی کاربردهای جدید این ترکیبات در صنایع مختلف و شناسایی چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در استفاده‌از نانورس در اپوکسی، به‌همراه پیشنهاد راه‌کارهایی برای غلبه بر آن‌ها، می‌تواند به غنای پژوهش بیفزاید. سرانجام، پیشنهاد زمینه‌های تحقیقاتی جدید و نیاز به مطالعات بیشتر برای درک بهتر رفتار این مواد در شرایط مختلف نیز از نکات قابل توجه خواهدبود.

این پژوهش به تحلیل تأثیر نانورس‌های اصلاح‌شده و هیبرید نانوذرات اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، تخریب گرمایی و دستاوردهای نوین درزمینهٔ رزین‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی می‌پردازد. هم‌چنین، در این پژوهش به مهم‌ترین نتایج و پیشرفت‌های اخیر در ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پرداخته‌می‌شود.

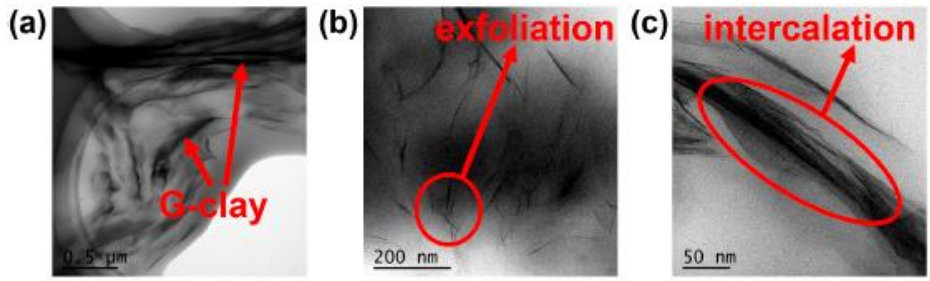
۲. ریخت‌شناسی (مورفولوژی)

ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی(اپوکسی کاردانول) حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی اصلاح‌کنندهٔ ژیرارد (تری‌متیل آمینو استو هیدرازید کلرید) بررسی‌شد (شکل (۱)). پراکندگی یکنواخت نانورس در ماتریس اپوکسی بسیار مهم است و بر خواص ترمودینامیکی و مکانیکی تأثیرمی‌گذارد. همان‌طورکه از تصاویر پیدا است؛ نانورس اصلاح‌شده به‌صورت مناسب در رزین اپوکسی

پخش‌شده‌است. نانورس به‌صورت ساختار لایه‌ای و ساختار تک‌لایه پراکنده‌شده‌است. این ساختارها به‌صورت تصادفی در ماتریس اپوکسی پراکنده است. این پراکنش مناسب نانورس به‌دلیل حضور اصلاح‌کنندهٔ ژیرارد و نیروی محرکهٔ گروه های آمینی فعال شرکت‌کننده در فرایند پخت است[۹].

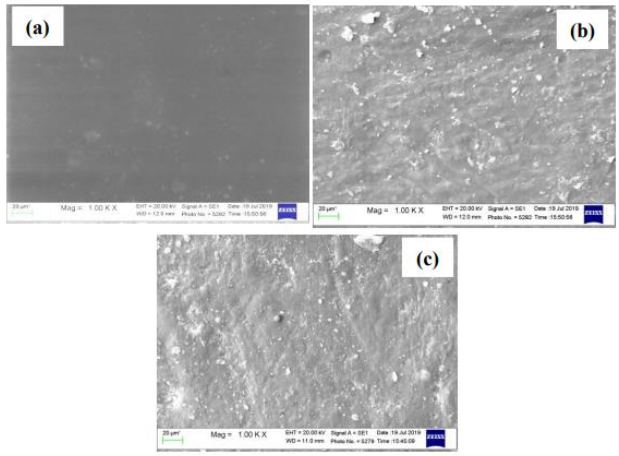
پژوهشگران ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با الیاف ضایعاتی موی انسان را بررسی‌کردند (شکل (۲)). نتایج نشان‌داد که زمانی‌که یک گرم از الیاف مو و یک گرم از نانورس در نانوکامپوزیت اپوکسی استفاده‌می‌شود، پراکنش ذرات بسیار مناسب است. هم‌چنین، با تغییر وزن الیاف و نانورس به ۲ گرم، ذرات در کامپوزیت تمایل به چسبندگی به یکدیگر و کلوخه‌ای‌شدن دارند و در بخشی از ماتریس اپوکسی اصلاً ذرات دیده‌نمی‌شود و پراکنش بسیار نامناسب است.

این فضای خالی در ماتریس اپوکسی، باعث کاهش در خواص مکانیکی می‌شود[۱۰]. این موضوع نشان‌دهندهٔ این است که افزایش غلظت نانورس ممکن‌است تأثیر منفی برروی ویژگی‌های مکانیکی مواد اپوکسی داشته‌باشد. افزودن بیش‌از ۲ گرم از نانورس به اپوکسی می‌تواند منجربه کاهش خواص مکانیکی آن شود؛ زیرا توزیع نانورس در ماتریس اپوکسی ممکن‌است یکنواخت نباشد[۱۱]. این نایکنواختی می‌تواند باعث ایجاد نقاط ضعف در ساختار شود. هم‌چنین، افزایش غلظت نانورس ممکن‌است منجربه تجمع ذرات و کاهش پیوستگی بین ذرات و ماتریس شود. درنتیجه، خواص مکانیکی مانند استحکام و انعطاف‌پذیری کاهش‌می‌یابد. بنابراین، تعادل در مقدار نانورس برای حفظ خواص مطلوب ضروری است[۱۲].



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی درحضور نانورس اصلاح‌شده‌با اصلاح‌کنندهٔ ژیرارد[۹].

Figure 1. Electron microscope images of epoxy nanocomposites in the presence of modified clay nanoparticles with a modifier [9].



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) رزین اپوکسی (b) نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس یک‌گرم و الیاف موی انسان یک‌گرم (c) نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس دوگرم و الیاف موی انسان دوگرم[۱۰].

Figure 2. Electron microscope images: (a) Epoxy resin; (b) Epoxy nanocomposite containing one gram of clay nanoparticles and one gram of human hair fibers; (c) Epoxy nanocomposite containing two grams of clay nanoparticles and two grams of human hair fibers [10].

در پژوهشی دیگر، اثر نانورس بر ریخت‌شناسی رزین اپوکسی بررسی‌شد. نتایج آزمون میکروسکوپ اتمی نشان‌داد که افزایش ۵ درصد وزنی به ماتریس رزین اپوکسی، کلوخه‌ای‌شدن درپی‌دارد. هم‌چنین، سطح نانوکامپوزیت بسیار زبر می‌شود. با افزایش مقدار نانورس، کلوخه‌ای‌شدن افزایش‌می‌یابد[۱۱].

اثر افزودن نانورس اصلاح‌شده‌با گروه سیلانی و نانورس اصلاح‌نشده، بر ریخت‌شناسی رزین اپوکسی بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که، اصلاح سطح نانورس با گروه سیلانی برهم‌کنش بین سطحی را افزایش‌می‌دهد و درنتیجه، منجربه کاهش کلوخه‌ای‌شدن درمقایسه‌با نمونهٔ اصلاح‌نشده می‌شود[۱۲]

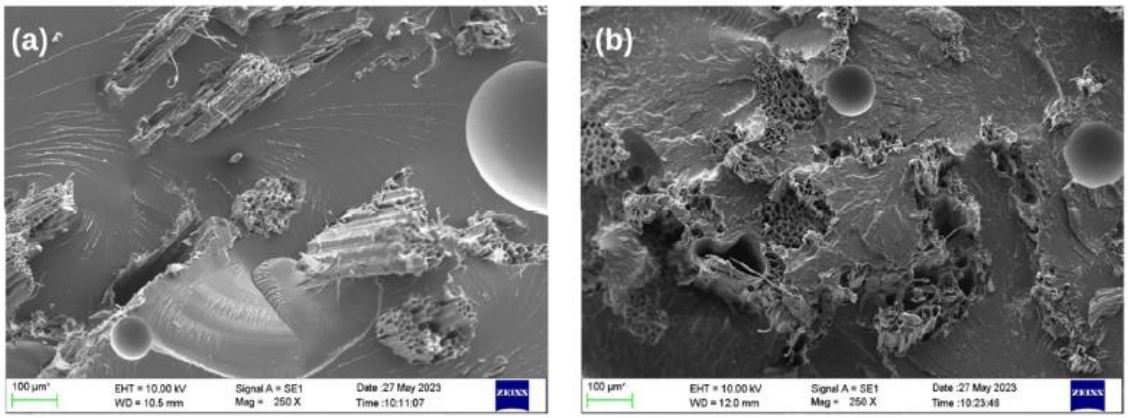
ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف طبیعی به‌دست‌آمده از پوست موز و نانورس بررسی‌شد (شکل (۳)). نتایج نشان‌داد که توزیع موفق و یکنواخت نانورس در سراسر ماتریس پلیمری برای دستیابی‌به خواص مطلوب در مواد نانوکامپوزیتی حاصل مهم است. نبودِ تجمع نشان‌می‌دهد که نانورس به‌طور مؤثر، لایه‌برداری و در ماتریس پلیمری توزیع‌شده‌است. این امر به‌طور ویژه مهم است، زیرا کلوخگی می‌تواند به‌عنوان نقص عمل‌کند و خواص مکانیکی کامپوزیت را کاهش‌دهد. چسبندگی سطحی قوی بین نانورس و ماتریس پلیمری می‌تواند به بهبود عملکرد ماده، به‌ویژه ازنظر زیست‌تخریب‌پذیری کمک‌کند. یک چسبندگی سطحی قوی ممکن‌است، دسترسی عامل تخریب‌کننده را به ماتریس پلیمری محدودکند و درنتیجه، مقاومت دربرابر تخریب زیستی کامپوزیت را افزایش‌دهد[۱۳].

در پژوهشی دیگر، اثر نانورس و نانورس اصلاح‌شده‌با گروه‌های آمینوسیلانی بررسی‌شد. نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان‌داد که حضور نانورس اصلاح‌شده منجربه کاهش کلوخگی درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها می‌شود و نانورس در تمام اپوکسی به‌خوبی پراکنده و توزیع می‌شود[۱۴].

سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی دودیواره انجام‌شد. نتایج آزمایش نشان‌داد که پراکنش نانورس در ماتریس اپوکسی مناسب نیست. بنابراین، سطح ماتریس و نانولوله‌های کربنی، خیس‌پذیری کمتری خواهدداشت و درنتیجه، نانوکامپوزیت کلوخه‌ای خواهدشد. برای بهبود پراکنش نانولوله‌های کربنی، در ماتریس اپوکسی از نانورس استفاده‌شد. حضور نانورس منجربه ساخت هیبرید نانوکامپوزیت می‌شود. بنابراین، با حضور هم‌زمان دو نانوذره، پراکنش ذرات در ماتریس اپوکسی بهبودمی‌یابد که درنتیجه باعث بهبود در خواص مکانیکی هیبرید نانوکامپوزیت هم می‌شود[۱۵].

۳. خواص مکانیکی

در پژوهشی خواص مکانیکی رزین زیست اپوکسی خالص (اپوکسی کاردانول)، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با گروه ژیرارد و نانوکامپوزیت اصلاح‌نشده بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که با افزودن ۰/۵ درصد از نانورس به رزین اپوکسی، مقادیر استحکام کششی و مدول یانگ به‌ترتیب برابربا ۰/۷۷ مگاپاسکال و ۲۸/۳۴ مگاپاسکال افزایش‌می‌یابد. این افزایش در بهبود خواص مکانیکی



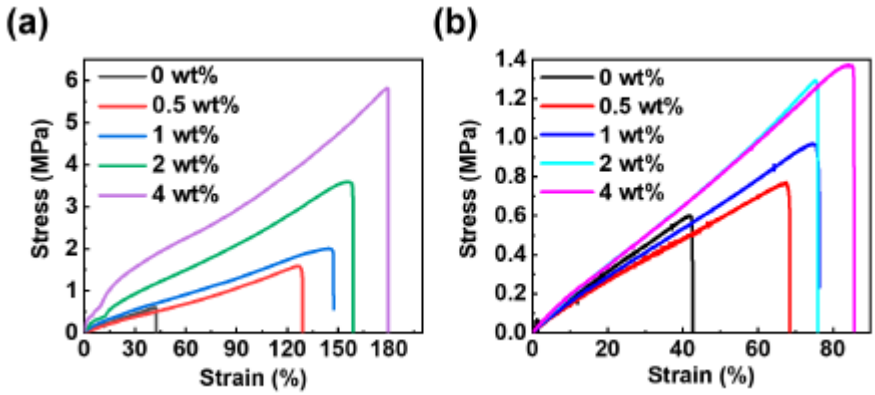
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی (a) رزین اپوکسی (b) نانوکامپوزیت اپوکسی با ۰/۲۵ درصد وزنی نانورس[۱۳].

Figure 3. Electron microscope images: (a) Epoxy resin; (b) Epoxy nanocomposite with 0.25% weight of clay nanoparticles [13].

بـه‌دلیل پـراکنش مناسـب نـانورس در مـاتریس اپوکسـی اسـت (شکل (۴)). بنابراین، برهم‌کنش قوی اپوکسی و نانورس اصلاح‌شده، منجربه بهبود در فصل مشترک می‌شود[۹].

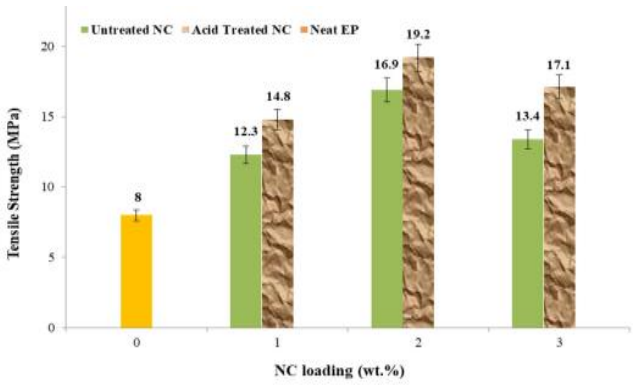
مدول ذخیرهٔ رزیـن اپوکسـی، نانوکامپوزیـت اپوکسـی اصلاح‌شـده‌با نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده‌با سیلان بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که مدول ذخیرهٔ نانوکامپوزیت اصلاح‌شده درمقایسه‌با رزین اپوکسی خـالص به‌مقـدار ۴۴ درصـد، افزایش‌می‌یابـد. ایـن افـزایش به‌دلیل برهم‌کنش بین سطحی، نانورس اصلاح‌شده و رزین اپوکسـی اسـت. هم‌چنـین، دمـای انتقـال شیشـه‌ای نانوکامپوزیـت اپوکسـی اصلاح‌شـده‌با گـروه سـیلانی درمقایسـه‌با رزیـن اپوکسـی خـالص، افزایش‌می‌یابد. افزایش بـرهم‌کنش بـین رزیـن اپوکسـی و نـانورس اصلاح‌شده (۵ و ۱۰ درصد وزنی)، منجربه کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری می‌شود. بنابراین، دمای انتقال شیشه مقداری کاهش‌می‌یابد و کلوخگی رخ‌می‌دهد[۱۶-۱۷].

استحکام کششـی رزیـن اپوکسـی و نانوکامپوزیـت اپوکسـی حـاوی نانورس اصلاح‌شده‌با اسیدسولفوریک بررسی‌شد. نتایج نشـان‌داد کـه (شـکل (۵))، نانوکامپوزیـت اصلاح‌شـده و اصلاح‌نشـده در ۱ و ۲ درصدوزنی، افزایش‌می‌دهد. با افزایش ۳ درصد وزنی نانورس به رزین اپوکسی، از استحکام کششـی کاسته‌می‌شـود. ایـن کـاهش بـه‌دلیل برهم‌کنش ضعیف بین رزین اپوکسی و نانورس است، زیرا با افـزایش درصد وزنی، نـانورس تمایـل بـه کلـوخگی دارد. هم‌چنـین، آزمـون استحکام ضربهٔ رزین اپوکسی و نانوکامپوزیـت اپوکسـی اصلاح‌شـده انجام‌شد؛ نتایج نشان‌داد که مقدار اسـتحکام ضـربهٔ رزیـن اپوکسـی ۲/۶ J/mm^2 است و با افـزودن ۲ درصـد وزنـی نـانورس اصلاح‌شـده به‌مقـدار ۱۸ /۷ J/mm^2 افزایش‌می‌یابـد. بـا افـزایش ۳ درصـد وزنـی نانورس به رزیـن اپوکسـی، اسـتحکام ضـربه به‌مقـدار ۱۵/۶ J/mm^2 کاهش‌می‌یابد[۱۸].



شکل ۴. نمودارهای تنش کرنش (a) نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌نشده و (b) نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده[۹].

Figure 4. Stress-strain graphs of (a). unmodified nanocomposites and(b). modified nanocomposites [9].



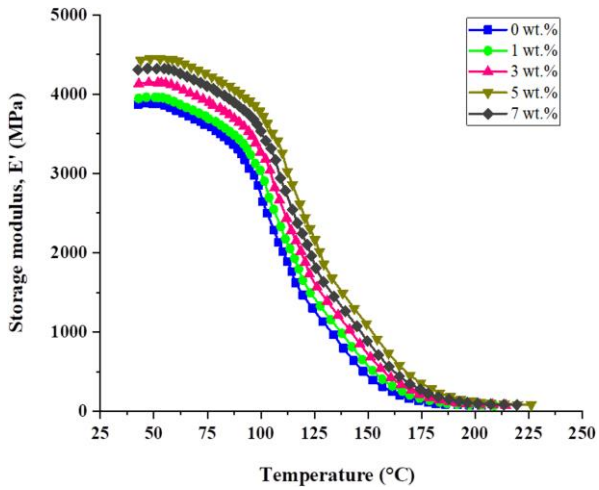
شکل ۵. نمودار استحکام کششی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی[۱۸].

Figure 5. Tensile strength graph of epoxy resin and epoxy nanocomposite [18].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با هیدروکسید سدیم و الیاف چوب (جوت) بررسی‌شد. نتایج آزمون نشان‌داد که تغییرات در مقدار مدول ذخیرهٔ نمونه‌های تقویت‌شده‌با نانورس به‌عنوان تابعی از دما در شکل (۶)، آورده‌شده‌است. افزودن مقدار ۵ درصد وزنی از نانورس به رزین اپوکسی، منجربه به افزایش مدول ذخیره (۴۴۴۶/۳۸ مگاپاسکال) درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها می‌شود. افزایش مدول ذخیرهٔ نانوکامپوزیت ۵ درصد درمقایسه‌با رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت ۱ درصد، نانوکامپوزیت ۳ درصد، نانوکامپوزیت ۷ درصد به‌ترتیب برابربا ۸،۱۲،۴ و ۳ درصد است.

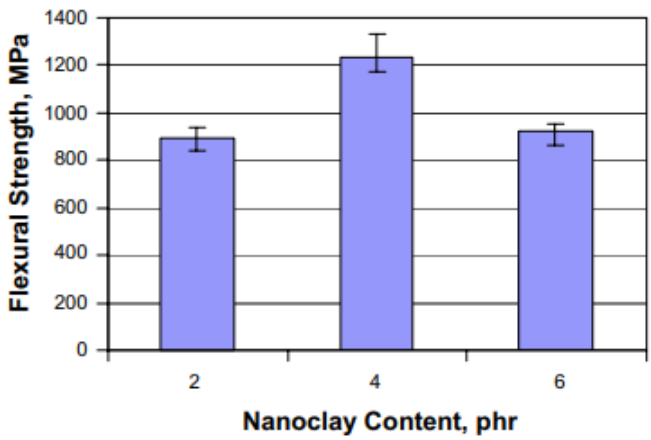
بنابراین مدول کامپوزیت‌ها درمقایسه‌با نمونه‌های کامپوزیت بدون نانورس افزایش‌می‌یابد. این افزایش، به‌دلیل تعامل بهتر بین اپوکسی، الیاف جوت و نانورس است که به بهبود انتقال تنش کمک‌کرده‌است[۱۹].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و الیاف کربن بررسی‌شد (شکل (۷)). نتایج نشان‌داد که با افزودن ۲ phr نانورس به این کامپوزیت، استحکام خمشی به‌مقدار ۳۸ درصد افزایش‌می‌یابد. هم‌چنین، با افزایش مقدار نانورس به ۴phr، استحکام خمشی کم می‌شود. این کاهش در خواص مکانیکی به‌دلیل پراکنش مناسب نانورس در بستر رزین اپوکسی است که منجربه افزایش حفره در نانوکامپوزیت شده‌است[۲۰].



شکل ۶. نمودار مدول ذخیرهٔ رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی[۱۹].

Figure 6. Storage modulus graph of epoxy resin and epoxy nanocomposites [19].



شکل ۷. نمودار استحکام خمشی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف کربن و نانورس[۲۰].

Figure 7. Flexural strength graph of epoxy nanocomposite containing carbon fibers and clay nanoparticles [20].

آزمون خواص دینامیکی- مکانیکی و خواص مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلوکسان و نانورس انجام‌شد. نتایج نشان‌داد که مدول ذخیره‌سازی نمونه‌های حاوی نانورس به‌طور چشم‌گیری بالاتر از مدول ذخیره‌سازی اپوکسی سیلوکسان خالص بود. به‌عنوان مثال، نانوکامپوزیت حاوی ۴ درصد وزنی از نانورس، به‌مقدار ۲۳ درصد افزایش در مدول ذخیره، درمقایسه‌با رزین اپوکسی خالص داشته‌است. اطلاعات به‌دست‌آمده نشان‌می‌دهد که مدول ذخیره‌سازی با افزایش غلظت نانورس تقویت‌می‌شود. این مشاهدات، نشان‌می‌دهد که نانورس به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده برای پوشش اپوکسی سیلوکسان عمل‌می‌کند. این عملکرد ممکن‌است به‌دلیل پراکندگی مؤثر بین‌لایه‌ای و برون‌لایه‌ای باشد که تعاملات سطحی بین نانوصفحات رس و زنجیره‌های پلیمری را افزایش داده‌است[۲۱]. بدین‌ترتیب، نیروی اعمال‌شده به ماتریس اپوکسی سیلوکسان به‌طور مطلوبی با لایه‌های نانورس و با نسبت ابعادی بالا کاهش‌می‌یابد. افزودن نانوذرات‌رس به کامپوزیت اپوکسی حاوی سیلوکسان، دمای انتقال شیشه‌ای را تا مقدار ۸/۱ درجهٔ سلسیوس بالا برده‌است. دو دلیل اصلی وجوددارد: یکی، پدیدهٔ نفوذ و درهم‌آمیخته‌شدن زنجیره‌های پلیمری در بین صفحات نانورس که با سطح بالای آن مرتبط است و منجربه محدودشدن حرکت براونی زنجیرهٔ اپوکسی سیلوکسان می‌شود. دلیل دیگر مربوطبه پرکردن منافذ پوشش و ایجاد یک میکرو و نانوساختار یکپارچه به‌وسیلهٔ نانورس است[۲۲].

در پژوهشی دیگر، آزمون دینامیکی مکانیکی رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با گروه آمینوسیلان بررسی‌شد. نتایج آزمون نشان‌داد که دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی درمقایسه‌با رزین اپوکسی، افزایش‌می‌یابد. این تغییرات به‌دلیل حضور نانورس اصلاح‌شده در ترکیب رزین اپوکسی است که منجربه کاهش حرکت زنجیره‌ها و افزایش برهم‌کنش می‌شود. هم‌چنین، استفادهٔ بیش‌از ۳ درصد وزنی نانورس اصلاح‌شده پیشنهاد نمی‌شود؛ زیرا باعث کاهش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود[۲۳].

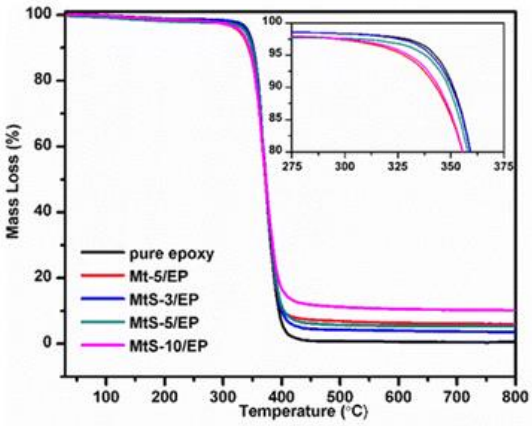
آزمون دینامیکی مکانیکی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانورس انجام‌شد. نتایج این تحقیق برای تعیین مقدار دمای انتقال شیشه‌ای استفاده‌شد. مقدار Tanδ (ضریب تلفات یا میرایی) برای رزین اپوکسی برابربا ۰/۳۴۰ است. هم‌چنین، این مقدار برای نمونه‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ به‌ترتیب برابربا ۰/۲۹۵، ۰/۳۳۷ و ۰/۴۰۷ است. هم‌چنین، با افزودن نانورس به ماتریس اپوکسی، دمای انتقال شیشه‌ای افزایش‌یافت[۲۴].

استفاده‌از مواد ضد شعله در رزین اپوکسی، در بیشتر موارد منجربه پراکنش نانو مناسب این مواد در بستر رزین اپوکسی می‌شود و درنتیجه، خواص مکانیکی کم‌می‌شود. پژوهشگران برای بهبود پراکنش، استفادهٔ هم‌زمان از نانورس و نانولولهٔ کربنی چنددیواره را پیشنهادکردند. نتایج این تحقیق نشان‌می‌دهد که باید از همزن مکانیکی و فراصوت استفاده‌شود و درنتیجه، این روش نه‌تنها پراکنش نانورس را در ماتریس اپوکسی بهبود بخشید، بلکه منجربه افزایش خواص مکانیکی شد. مقدار استحکام ضربه و استحکام کششی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی درمقایسه‌با رزین اپوکسی بیشتر بود. بهترین روش برای داشتن بهترین خواص مکانیکی در استفاده‌از همزن مکانیکی به‌مدت ۸ ساعت و استفاده‌از فراصوت به‌مدت ۶ ساعت بود[۲۵].

۴. پایداری گرمایی و تخریب گرمایی

در پژوهشی تخریب گرمایی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با سیلان بررسی‌شد (شکل (۸)). نتایج نشان‌داد که دمای ۵ درصد کاهش وزن نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌نشده درمقایسه‌با نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده، کاهش‌می‌یابد. این نتایج بدان معنا است که نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده پایداری گرمایی بهتری درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها دارد. هم‌چنین، گروه سیلان منجربه سازگاری بهتر رزین اپوکسی‌با نانورس شده‌است. در دمای بالای ۴۰۰ درجهٔ سلسیوس، در تمامی نمونه‌ها، افزایش تخریب گرمایی مشاهده‌می‌شود. هم‌چنین دمای ۵ درصد کاهش وزن، نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌نشده، به‌ترتیب برابربا ۳۳۹ و ۳۳۸ درجهٔ سلسیوس است[۲۶].

آنالیز گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی حاوی استایرن‌کو آکریلو نیتریل، و نانوکامپوزیت اپوکسی‌استایرن کو آکریلو نیتریل حاوی نانورس بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که زغال باقی‌ماندهٔ نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس زغال باقی‌ماندهٔ بیشتری



شکل ۸. نمودارگرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده‌با سیلان.

Figure 8. Thermogravimetric analysis graph of pure epoxy resin, epoxy nanocomposite, and epoxy nanocomposite modified with silane

درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها است و پایداری گرمایی را افزایش‌می‌دهد. هم‌چنین، دمای اولیهٔ تخریب نانوکامپوزیت اپوکسی استایرن کو آکریلو نیتریلِ حاوی نانورس نشان‌داد که این نمونه درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها، دمای اولیهٔ تخریب کمتری دارد. این نتایج به‌دلیل حضور استایرن کو آکریلو نیتریل در نانوکامپوزیت است؛ زیرا این ماده ترموپلاستیک است و چگالی شبکه‌ای‌شدن را کم‌می‌کند[۲۷].

پایداری گرمایی رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با روغن سویا بررسی‌شد (جدول (۱)). نتایج درصد زغال باقی‌مانده نشان داد که رزین اپوکسی درحضور روغن سویا، مقدار درصد زغال باقی‌مانده‌ای ندارد. این بدان معنا است که بر هم‌کنش بین رزین اپوکسی و روغن سویا ضعیف و یا بسیار کم است. هم‌چنین، با افزودن نانورس به این کامپوزیت، مقدار درصد زغال باقی‌مانده افزایش‌می‌یابد. برهم‌کنش رزین اپوکسی با روغن سویا درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها، منجربه وجود دو دمای پیک‌شدن (۳۵۳°C و ۶۰۸°C) می‌شود[۲۸].

درپژوهشی دیگر، آنالیز تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسیِ حاوی نانورس بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که زمانی‌که ۱۰ درصد وزنی از نانورس به رزین اپوکسی اضافه‌می‌شود، دمای بیشینهٔ تخریب افزایش‌می‌یابد و دمای اولیهٔ تخریب کاهش‌می‌یابد. هم‌چنین، از غلظت‌های ۶،۴ phr و ۸ از نانورس برای بررسی پایداری گرمایی استفاده‌شد. نتایج این بررسی نشان‌داد که در درصدهای وزنی زیر مقدار ۸ phr، پایداری گرمایی درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها افزایش بهتری داشته‌است[۳۰].

آنالیز گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسیِ حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با سیلان بررسی‌شد. روش سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده‌با نانورس و گروه‌های سیلانی، به‌روش دوغاب بود. نتایج نشان‌داد که فرایند تخریب به‌صورت سه‌مرحله‌ای انجام‌می‌شود. هم‌چنین، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اصلاح‌شده درمقایسه‌با رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی، افزایش بهتری داشته‌است. دو عامل بسیار تأثیرگذار بر پایداری گرمایی، شبکه‌ای‌شدن و شرایط پخت است[۳۱].

جدول ۱. مشخصه‌های مهم به‌دست‌آمده از آزمون آنالیز گرماوزن‌سنجی[۲۸].

Table 1. Key parameters obtained from thermogravimetric analysis test[28].

Sample	Initial degradation temperature (°C)	Secondary peak temperature (°C)	Initial peak temperature (°C)	Percentage of remaining char at 700 (°C)
Resin Epoxy	315	----	372	6.55
Epoxy-soybean oil	304	608	353	0
Epoxy-soybean oil-nano clay	310	----	356	9.1

اثـر نـانورس اصلاح‌شـده‌با گروه‌هـای آلکیـل آمونیـوم و نـانورس اصلاح‌نشده، بر رفتار پایداری گرمایی رزین اپوکسی بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که اصلاح سطح نانورس منجربه افـزایش پایـداری گرمـایی رزیـن اپوکسـی درمقایسـه‌با دیگـر نمونـه‌ها می‌شـود. هم‌چنـین، مشخص‌شد که عدم اصلاح سطح نانورس، اثر چشم‌گیری بر تخریـب گرمایی رزین اپوکسی ندارد[۳۲].

به‌منظور ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی از نایلون ۶، در نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس استفاده‌شد. نتایج نشان‌داد کـه ایـن هیبریـد نانوکامپوزیت، فرایند تخریب گرمـایی دومرحلـه ای دارد. هم‌چنـین، حضور نایلون در ترکیب بـا اپوکسـی بـا نـانورس، پایـداری گرمـایی بیشتری درمقایسه‌با دیگر نمونه‌ها دارد[۳۳].

در پژوهشی دیگر، پایداری گرمایی اپوکسی اصلاح‌شده حاوی بـرم و نانورس بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که دمای ۵۰ درصـد کـاهش وزن نمونهٔ رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسـی رفتـار مشـابه یکـدیگر دارند. هم‌چنین، سازوکار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت دومرحلـه‌ای است. آنالیز بیشینهٔ دمای تخریب گرمایی نشان‌داد که نانوکامپوزیـت اپوکسی بیشینهٔ دمای تخریب گرمـایی بیشـتری درمقایسـه‌با رزیـن اپوکسی خالص دارد. این افزایش به‌دلیل حضـور زنجیره‌هـای رزیـن اپوکسی در میان لایه‌های نانورس است[۳۴].

پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌هـای اپوکسـی، الیـاف بازالـت حـاوی نـانورس (بنتونیـت) و نـانورس اصلاح‌شـده‌با کلسـیم بررسی‌شـد (شکل (۱)). دمـای شـروع تخریـب کامپوزیت‌هـای حـاوی نـانورس درحدود ۳۳۰ درجهٔ سلسیوس اسـت کـه در کامپوزیت‌هـای حـاوی نانورس‌های اصلاح‌شده به دماهای بـالاتر منتقل‌می‌شـود. هم‌چنـین، نتـایج نشـان‌داد کـه تخریـب یک‌مرحلـه‌ای بـرای تمـام نمونـه‌ها مشاهده‌شد. بااین‌حال، کاهش وزن در نانوکامپوزیت اپوکسی زودتر از نانوکامپوزیت اصلاح‌شده است. سطح نانورس‌های بنتونیـت کلسـینه می‌تواند رادیکال‌های آزاد تولیدشده از تخریـب حرارتـی اپوکسـی را متوقف‌کند و درنتیجه، پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش‌دهـد. علاوه‌براین، تبخیر اجزای تخریب‌شـدهٔ کامپوزیت‌هـا می‌توانـد باعـث افزایش زمان اقامت مولکول‌ها و کاهش دمای کاهش وزن به‌صـورت سینتیکی شود[۳۵].

در پژوهشی دیگر به‌جای استفاده‌از نانورس از کیتوسان و نانوصفحات گرافن اکساید استفاده‌شد. نانوکامپوزیت اپوکسـی حـاوی نـانوگرافن اکساید و کیتوسان سنتز شد. نتایج نشان‌داد که حضـور نانوصـفحات گرافن اکساید می‌تواند به بهبود پایـداری گرمـایی کامپوزیـت سـبز اپوکسی و کیتوسان کمک‌کند. این افزایش پایداری حرارتی بـه‌دلیل نانو صفحات گرافن اکساید اسـت، زیـرا منجربـه کـاهش حجـم آزاد نانوکامپوزیت اپوکسی درمقایسه‌با کامپوزیت سبز می‌شود و درنتیجه، پایداری گرمایی و درصد زغال باقی‌مانده افزایش‌می‌یابد[۳۶].

انرژی فعال‌سازی رزیـن اپوکسـی خـالص و نانوکامپوزیـت اپوکسـی حـاوی نـانورس، نانوکامپوزیـت اپوکسـی حـاوی الیـاف سـلولز و نانوکامپوزیت اپوکسـی حـاوی الیـاف سـلولز و نـانورس بررسی‌شـد (جدول (۲)). نتایج این تحقیق نشان‌داد که مقـادیر به‌دست‌آمده از انرژی فعال‌سازی، رفتار مشابه‌با نانوکامپوزیت‌هـای اپوکسـی حـاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولز دارد. کـاهش در انرژی فعال‌سازی با افزودن نانورس، می‌تواند بـه تـأثیر شـتاب‌دهندهٔ نانوساختارها بـر واکـنش پخـت نسبت‌داده‌شـود؛ وجـود پیونـدهای شیمیایی مناسـب بـین الیـاف نانوسـلولزی و زنجیره‌هـای اپوکسـی می‌تواند منجربه تشکیل چندین پیوند شود. تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل برروی سـطح الیـاف سـلولز و گروه‌هـای قطبـی در زنجیره‌هـای اپوکسـی و هم‌چنـین، بـین گروه‌هـای هیدروکسیل و آمین‌های واکنش‌نیافته نیز مشاهده‌می‌شود[۳۷].

جدول ۲. انرژی فعال‌سازی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی[۳۷].

Table 2. Activation energy of epoxy resin and epoxy nanocomposites[37].

Sample	Activation Energy (kJ/mol)
Epoxy Resin	63.64
Epoxy-cellulose fibers (0.5phr)	57.36
Epoxy – Nano Clay (0.5phr)	58.54
Epoxy – Cellulose Fiber – Nano Clay (0.5phr)	52.59
Epoxy-cellulose fibers-nano clay (1phr)	65.33

به‌منظور افزایش بهبود خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی، نانورس با گروه‌های آمینوسیلانی، اصلاح سطح شد. نتایج نشان‌داد که با افزایش دما، TGA نانوکامپوزیت اصلاح‌شده، کاهش شدید حرارتی نشان‌می‌دهد که نشان‌دهندهٔ تجزیه است. بالای ۴۰۰ درجهٔ سلسیوس، نرخ ازدست‌دادن جرم برای هر سامانه به‌طور قابل توجهی کاهش‌می‌یابد که نشان‌می‌دهد بیشتر گروه‌ها در ساختار رزین اپوکسی تحت تجزیهٔ حرارتی قرار گرفته‌اند. دمای ۵ درصد کاهش وزن برای رزین پوکسی خالص برابربا ۳۴۳ درجهٔ سلسیوس است. با افزودن نانورس و نانورس اصلاح‌شده، دمای ۵ درصد کاهش وزن پایین‌می‌آید. این کاهش ممکن‌است به کاهش چگالی پیوندهای شبکه‌ای‌شده در رزین‌های اپوکسی پس‌از افزودن نانورس نسبت‌داده‌شود. هم‌چنین، حضور نانورس و نانورس اصلاح‌شده منجربه افزایش زغال باقی‌مانده در نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود و درنتیجه، پایداری گرمایی افزایش‌می‌یابد[۳۸].

تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با پلی‌استر آمین بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که بخشی‌از مولکول‌های پلی‌استر آمین ممکن‌است به‌طور آزاد به ماتریس اپوکسی نفوذکند و مقاومت حرارتی را کاهش‌دهد. به‌هرحال، نکتهٔ مهمی که از داده‌های TGA قابل استخراج است، این است که نمونه‌های نانورس اصلاح‌شده تأثیر منفی بر فرایند پخت و با ماتریس اپوکسی ندارند. باتوجه‌به عدم کاهش در فرایند تخریب حرارتی، این مطلب تأییدمی‌شود[۳۹].

۵. پیشرفت‌های اخیر

اثر نانورس بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی و هم‌چنین، تأثیر دما بر مقاومت کششی دو نوع ترکیب اپوکسی بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که دما، زمان پخت و نوع پرکننده تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های مکانیکی این ترکیبات دارد. به‌طور کلی، پیوندهای قوی‌تر و مقاومت بالاتر در ترکیبات اپوکسی اصلاح‌شده و استفاده‌از عامل پخت مناسب مشاهده‌شد[۴۰].

در پژوهشی اثر جذب و خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و الیاف کناف بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده‌با نانورس و کناف به‌ترتیب ۲۷ درصد کاهش در استحکام کششی داشتند؛ درحالی‌که نانوکامپوزیت حاوی نانورس، تغییر قابل توجهی نشان‌نداد. هم‌چنین، نانورس تأثیر جذب آب را بر ویژگی‌های مکانیکی کاهش‌داده‌است. این مطالعه نشان‌می‌دهد که استفاده‌از نانورس‌های اصلاح‌شدهٔ سطحی نه‌تنها به کاهش جذب رطوبت در کامپوزیت‌های اپوکسی کمک کرده، بلکه ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها را نیز بهبود بخشیده‌است. باتوجه‌به کاهش قابل توجه در میزان جذب رطوبت و ضریب نفوذ، می‌توان انتظارداشت که این نوع کامپوزیت‌ها در کاربردهای دریایی و محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری داشته‌باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به توسعهٔ مواد کامپوزیتی با کارایی بالا و مقاوم دربرابر رطوبت در صنایع مختلف کمک‌کند[۲۰-۱۸].

اثر نانورس بر رزین اپوکسی، جهت بهبود کاربری در پوشش‌ها استفاده‌شد. نتایج نشان‌داد که افزودن نانورس‌ها به پوشش‌های اپوکسی، می‌تواند به‌طرز قابل توجهی خصوصیات مکانیکی و مقاومت به سایش را بهبودبخشد. به‌ویژه، پوشش نانوکامپوزیتی با ۲ درصد نانورس منجربه بهبود ۸۲ درصدی مقاومت‌به‌سایش است. هم‌چنین، سختی این پوشش‌ها با درصدهای مختلف نانورس افزایش‌یافته‌است. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ ظرفیت بالای استفاده‌از نانورس‌ها در بهینه‌سازی پوشش‌های اپوکسی است[۲۱-۲۲].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس سنتزشد. نتایج نشان‌می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با افزودن نانورس به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی و حرارتی بهتری نسبت‌به ماتریس اپوکسی خالص نشان‌می‌دهند. تشکیل پیوندهای کوالانسی بین نانورس و اپوکسی عامل این بهبودها است. هم‌چنین، این نانوکامپوزیت‌ها فعالیت آنتی‌باکتریالی عالی علیه باکتری E.coli نشان‌می‌دهد و به‌عنوان یک فرمولاسیون امیدوارکننده برای جلوگیری‌از رشد باکتری‌ها مطرح است. لذا، این نتایج می‌تواند در صنعت و پزشکی کاربردی‌شود[۲۵-۲۳].

نتایج مطالعه نشان‌داد که سامانه‌های نانودی‌الکتریک برپایهٔ رزین اپوکسی اصلاح‌شده‌با نانوذرات رس، خصوصیات دی‌الکتریکی قابل توجهی ازخود نشان‌می‌دهد. این نانومواد با افزایش طول عمر چرخه‌ای و بهبود کارایی انرژی ظرفیت، ظرفیت بالایی برای کاربرد در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی دارد. هم‌چنین، تغییرات قابل توجه در وابستگی دما به اثرات بین‌سطحی مشاهده‌شد. به‌طور کلی، افزودن نانوذرات رس به پوشش‌های دی‌الکتریک اپوکسی، عملکرد آن‌ها را به‌طور چشم‌گیری ارتقاء می‌دهد[۲۸-۲۶].

مقاومت سایشی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف کربن و نانورس بررسی‌شد. مقاومت سایشی بااستفاده‌از روش‌های مختلف، ارزیابی و آزمایشی به‌طور خاص برای شبیه‌سازی تأثیر پودرهای سایشی برای کاربرد در هواپیماها یا وسایل هوایی طراحی‌شد. نتایج نشان‌داد که وجود نانورس باعث بهبود سطح سایش و باعث کاهش آسیب‌رساندن به سطح می‌شود[۳۱-۲۹].

بیش‌از ۵۰ درصد از مواد ضد آتش مورد استفاده در صنایع پلیمر و پلاستیک، هیدروکسیدهای فلزی است که در میان آن‌ها، هیدروکسید آلومینیوم (ATH) به‌دلیل سمیت و خورندگی پایین و هم‌چنین، هزینهٔ اقتصادی مناسب، بیشترین کاربرد را دارد. بااین‌حال، استفاده‌از حجم بالای ATH در پلیمرها می‌تواند منجربه کاهش خواص مکانیکی شود. در این پژوهش، نانوذرات رس به کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی حاوی الیاف شیشه و هیدروکسید آلومینیوم اضافه‌شد تا خواص مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت‌ها بهبودیابد[۳۲]. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان‌داد که افزودن ۳ phr نانوذرات رس، استحکام کششی و خمشی را به‌ترتیب ۱۰ درصد و ۹/۲ درصد افزایش‌می‌دهد. هم‌چنین، نتایج آزمایش‌های اشتعال‌پذیری، نشان‌داد که افزودن ۳ phr نانورس، اشتعال‌پذیری کامپوزیت‌ها را ۴۱ درصد بهبودمی‌بخشد. این یافته‌ها نشان‌دهندهٔ ظرفیت نانوذرات رس در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های هیبریدی است و می‌تواند به توسعهٔ مواد با عملکرد بهتر در صنایع مختلف کمک‌کند[۳۳].

در پژوهشی دیگر، اثر نانورس و نانورس اصلاح‌شده‌با کلسیم بر خواص حرارتی رزین اپوکسی و الیاف بازالت بررسی‌شد. نتایج نشان‌داد که نانورس اصلاح‌شده (بنتونیت) می‌تواند پایداری گرمایی رزین اپوکسی را افزایش‌دهد. درواقع، اصلاح سطح نانورس با گروه‌های کلسیم می‌تواند فرایند تخریب گرمایی رزین اپوکسی را که منجربه تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود، به‌تأخیر بیاندازد. حضور نانورس اصلاح‌شده درترکیب‌با رزین اپوکسی می‌تواند برهم‌کنش بین ملکولی را تقویت‌کند و درنتیجه، پایداری گرمایی بهبود می‌یابد[۳۴]. سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوگرافن اکساید و کیتوسان انجام‌شد. هدف‌از این سنتز ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی سبز با افزودن کیتوسان و گرافن اکساید بود. نتایج نشان‌داد که دمای انتقال شیشه‌ای اپوکسی خالص ۹۷ درجهٔ سلسیوس است و با افزودن نانوذرات سبز به‌مقدار به ۱۱۸ درجهٔ سلسیوس افزایش‌می‌یابد. هم‌چنین، مقاومت کششی در نانوکامپوزیت سبز ساخته‌شده از رزین اپوکسی خالص بیشتر بود. این افزایش در خواص مکانیکی به‌دلیل تعاملات بین‌سطحی بهبودیافته و حضور نانوصفحات گرافن اکساید با سختی بالا نسبت داده‌می‌شود[۳۷-۳۵].

نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولز و نانورس سنتزشد. نتایج نشان‌داد که کاهش قابل توجهی در زمان ژل‌شدن و زمان شیشه‌ای‌شدن درحین فرایند پخت با افزودن نانوپرکننده‌های هیبریدی و در دماهای بالای پخت مشاهده‌شد. پروفایل گران‌روی پیچیدهٔ نانوکامپوزیت‌ها درطول فرایند پخت روندی از رشد نمایی را در دماهای مختلف نشان‌داد[۳۸]. افزایش دمای انتقال شیشه‌ای به‌میزان ۱۰ درجهٔ سلسیوس برای نانوکامپوزیت‌های هیبریدی درمقایسه‌با نمونهٔ خالص به‌دلیل حضور هم‌زمان نانورس و الیاف سلولز نسبت‌داده‌شده‌است. با افزودن مقدار نانورس به بیش‌از ۰/۵ phr به کامپوزیت اپوکسی، کلوخه‌ای‌شدن دیده‌شد. بنابراین، پیشنهادمی‌شود که از درصدهای کمتر از این مقدار برای سنتز بهینه استفاده‌شود. درجدول (۳)، مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی جمع‌آوری‌شده‌است[۴۱-۳۹].

۶. چشم‌انداز آینده

آیندهٔ نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده، به‌وضوح نشان‌دهندهٔ ظرفیت بالای این مواد در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی است. تحقیقات اخیر نشان‌داده‌اند که افزودن نانورس به رزین‌های اپوکسی می‌تواند به‌طور قابل توجهی ویژگی‌های مکانیکی مانند استحکام کششی و مقاومت‌به‌سایش را افزایش‌دهد. به‌ویژه، نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس اصلاح‌شده، به‌دلیل تشکیل پیوندهای قوی‌تر و کاهش جذب رطوبت، می‌توانند در کاربردهای دریایی و محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری داشته‌باشد. علاوه‌براین، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با نانورس، بهبودهای قابل توجهی در خواص دی‌الکتریکی و حرارتی نیز نشان‌داده‌است که این امر می‌تواند به توسعهٔ سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و کاربردهای الکترونیکی کمک‌کند. هم‌چنین، نتایج نشان‌می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها دارای خواص آنتی‌باکتریالی است که می‌تواند در صنایع پزشکی و بهداشتی به‌کاررود. محدودیت‌های این پژوهش، شامل عدم بررسی

جدول ۳. پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده[۴۱-۳۹].

Table 3. Recent advancements in epoxy nanocomposites containing modified clay nanoparticles[39-41].

Sample	Year	Conclusion	References
Epoxy - Knauf Fiber - Nano Clay	2025	Improve water absorption	[36]
Epoxy - Nano Clay	2025	Increasing mechanical strength and examining the effect of temperature	[37]
Epoxy - Nano Clay	2024	Improving the usability of coatings and increasing wear resistance	[38]
Epoxy - Nano Clay	2024	Increased mechanical and thermal properties, increased antibacterial properties	[39]
Epoxy-glass fiber-nano clay	2023	Increased mechanical properties	[40]
Epoxy - Nano Clay	2024	Epoxy dielectric coatings	[41]
Epoxy-glass fiber-nano clay	2024	Increased mechanical and thermal properties	[12]
Epoxy-Nano Clay-Carbon Fiber	2023	Improved abrasion resistance	[11]
Epoxy - Glass Fiber - Aluminum Hydroxide - Nano Clay	2024	Increased thermal properties and flame retardant properties	[39]
Epoxy-Siloxane-Nano Clay	2024	Increased mechanical properties	[32]
Epoxy - Nanoclay (bentonite) modified with calcium	2023	Increased thermal stability	[22]
Epoxy - Graphene Oxide – Chitosan	2022	Green and environmentally friendly synthesis, increased thermal stability	[23]
Epoxy-cellulose fibers-nano clay	2024	Improving dispersion with the simultaneous presence of cellulose fibers and nanoclay	[34]
Epoxy-Nanoclay modified with silane group	2024	Increased thermal stability	[26]

کامل تأثیرات طولانی مدت نانورس بر خواص اپوکسی است. هم‌چنین، نیاز به تحقیقات بیشتر برای ارزیابی عملکرد این ترکیبات در شرایط مختلف وجوددارد. پیشنهادمی‌شود که مطالعات آینده بر بررسی ترکیب‌های مختلف و نسبت‌های متفاوت معطوف‌شود. این امر می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی اپوکسی کمک‌کند. سرانجام، باتوجه‌به پیشرفت‌های اخیر در سنتز و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، می‌توان‌انتظارداشت که این مواد در آینده به‌عنوان گزینه‌های مناسب و کارامد در صنایع مختلف، ازجمله: پوشش‌ها، کامپوزیت‌های هیبریدی و مواد ضد آتش، محل توجه قرار گیرد. این روند نشان‌دهندهٔ یک چشم‌انداز روشن برای توسعه و کاربرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در آینده است.

۷. نتیجه‌گیری

ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی و ترمودینامیکی آن‌ها دارد. بررسی‌های انجام‌شده نشان‌می‌دهد که پراکندگی یکنواخت نانورس در ماتریس اپوکسی، به‌ویژه درحضور اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، می‌تواند به بهبود خواص مواد نانوکامپوزیتی منجرشود. دراین‌راستا، وجود الیاف طبیعی و نانورس‌های اصلاح‌شده‌با گروه‌های عاملی، نه‌تنها از کلوخه‌ای‌شدن جلوگیری‌می‌کند، بلکه چسبندگی سطحی را نیز بهبودمی‌بخشد و درنتیجه، کارایی و پایداری مواد را افزایش‌می‌دهد. در پایان این پژوهش، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت اصلاح نانورس بر خواص مکانیکی رزین‌های اپوکسی است. به‌ویژه،

نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده‌با گروه‌های مختلف، به‌طور چشم‌گیری بهبود در استحکام کششی و مدول یانگ را افزایش‌داد. این افزایش به‌دلیل پراکنش مناسب نانورس و برهم‌کنش‌های بهینه بین رزین و نانورس است. هم‌چنین، نتایج نشان‌داد که افزودن نانورس، دمای انتقال شیشه‌ای را افزایش‌می‌دهد و ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها را بهبودمی‌بخشد. هم‌چنین، نتایج نشان‌می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده‌با سیلان و پلی‌استر آمین، از پایداری گرمایی بهتری نسبت‌به نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌نشده برخوردارند، که این امر به‌دلیل بهبود تعاملات بین‌سطحی و تشکیل پیوندهای قوی‌تر است. هم‌چنین، حضور نانو ذرات، مانند گرافن اکساید و کیتوسان، نیز تأثیر مثبتی بر خواص مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌ها دارد.

مراجع

[1] Karami, M. H., Kalaee, M. R. (2022). Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *21*(124), 71-83, [In Persian].

[2] ehdizadeh, H., & Moradi, G. R. (2024). Investigation and Optimization of Effective Parameters in the Process of Desalination of Crude Oil by Electrostatic Method. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *23*(136), 22–34, [In Persian].

[3] Abbasi, H., Hashemizadeh, A., Navaie, F. (2023). Evaluation of the efficiency of polymers, polymeric nanoparticles, and surfactant additives in improving the rheology and loss control of drilling fluids: A review. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *22*(129), 7-25.

[4] Mousavi, S. A., Khademzadeh Yeganeh, J. (2023). Effect of nanoclay and its hybrid with carbon black on physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *22*(126), 66-81.

[5] Masoudi, M., Salem, S. (2025). Simultaneous removal of chromium (VI) and methylene blue by nano titanium dioxide/graphene oxide/carbon nanotube photocatalyst and P25. *Iranian Chemical Engineering Journal*, *23*(137), 75-87.

[6] Karami, M. H., Moeini Jazni, O., & Bagheri, A. (2025). Epoxy nanocomposites reinforced with metal-organic framework nanoparticles: Study and analysis of morphology, mechanical properties, and thermal degradation. *Iran Polymer Technology, Research and Development*, *9*(4),51-64.

[7] Karthik, A., Bhuvaneshwaran, M., Senthil Kumar, M. S., Palanisamy, S., Palaniappan, M., & Ayrilmis, N. (2024). A review on surface modification of plant fibers for enhancing properties of biocomposites. *ChemistrySelect*, *9*(21), e202400650.

[8] Kini, A. U., Shettar, M., Gowrishankar, M. C., & Sharma, S. (2023). A technical review on epoxy-nanoclay nanocomposites: Mechanical, hygrothermal and wear properties. *Cogent Engineering*, *10*(2),1-21.

[9] Xu, J., Jia, L., Lan, Q., & Wu, D. (2024). Enhanced thermal and mechanical properties of cardanol epoxy/clay-based nanocomposite through Girard's reagent. *Polymers*, *16*(11), 1528.

[10] Nasution, D. Y., & Delfis, M. (2024). Effect of clay composition and human haircut waste on mechanical properties of epoxy resin composites. *Journal of Chemical Natural Resources*, *6*(1), 45-54.

[11] Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M. (2023). Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix. *Polymer Composites*, *45*(4), 2919-2926.

[12] Örçen, G., & Bayram, D. (2024). Effect of nanoclay on the mechanical and thermal properties of glass fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Materials Science*, *59*, 3467–3487.

[13] Naik, N., Bhat, R., Shivamurthy, B., Thimmappa, B. H. S., Shetty, N., & Kaushik, Y. (2023). Biodegradability of Musa acuminata (banana)-fiber-reinforced bio-based epoxy composites: The influence of montmorillonite clay. Engineering Proceedings, *59*, 6.

[14] Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajasekar, R., & Rajeshkumar, G. (2019). An experimental study on the effect of nano-clay addition on mechanical and water absorption behaviour of jute fibre reinforced epoxy composites. *Journal of Industrial Textiles*, *49*(5), 597–620.

[15] Ng, L. F., Yahya, M. Y., & Muthukumar, C. (2022). Mechanical characterization and water absorption behaviors of pineapple leaf/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites. Polymer Composites, *43*(1), 203–214.

[16] Khorshidi, G. H., Zhang, C., & Najafi, E. (2023). Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, *384*, 135390.

[17] Shi, M., Zhu, H., Chen, C., Jiang, J., Zhao, L., & Yan, C. (2023). Synergistically coupling of graphene quantum dots with Zn-intercalated MnO_2 cathode for high-performance aqueous Zn-ion batteries. *International Journal of Mineral Metallurgy and Materials*, *30*, 25–32.

[18] Merzah, Z. F., Fakhry, S., Allami, T. G., Yuhana, N. Y., & Alamiery, A. (2022). Enhancement of the properties of hybridizing epoxy and nanoclay for mechanical, industrial, and biomedical applications. *Polymers*, *14*(3), 526.

[19] Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajeshkumar, G., et al. (2021). Dynamic mechanical properties and free vibration characteristics of surface modified jute fiber/nano-clay reinforced epoxy composites. *Journal of Polymers and the Environment*, *29*, 1076–1088.

[20] Xu, Y., & Hoa, S. V. (2008). Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy/clay nanocomposites. *Composites Science and Technology*, *68*(3-4), 854-861.

[21] Kaushik, Y., Sooriyaperakasam, N., Rathee, U., & Naik, N. (2023). A mini review of natural cellulosic fibers: Extraction, treatment and characterization methods. *Journal of Computational Mechanics and Management*, *2*, 23057.

[22] Khandelwal, S., Han, G. H., Kim, S., & Rhee, K. Y. (2023). Effect of dehydroxylation/amorphization degree of bentonite on the microstructure, thermal stability, and mechanical strength of basalt epoxy composites. *Journal of Materials Research and Technology*, *23*, 3249-3256.

[23] Hosseini, S. M., Abdouss, M., Mazinani, S., Soltanabadi, A., & Kalaee, M. R. (2022). Modified nanofiber containing chitosan and graphene oxide-magnetite nanoparticles as effective materials for smart wound dressing. *Composites Part B: Engineering*, *231*, 109557.

[24] Ahmad, S. M., & Shettar, M. (2024). Water-soaking effect and influence of nanoclay on mechanical properties of bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Cogent Engineering*, *11*(1).

[25] Muralishwara, K., Sudhakar, Y. N., Kini, U. A., et al. (2022). Moisture absorption and spectroscopic studies of epoxy clay nanocomposite. *Polymer Bulletin*, *79*, 5587–5611.

[26] Su, L., Fang, C., & Luo, H. (2024). Functionalized montmorillonite/epoxy resin nanocomposites with enhanced thermal and mechanical properties. *RSC Advances*, *14*, 31251.

[27] Shaheen, S., Saeed, Z., Ahmad, A., Pervaiz, M., Younas, U., Mahmood Khan, R. R., & Luque, R. (2023). Green synthesis of graphene-based metal nanocomposite for electro and photocatalytic activity: Recent advancement and future prospective. *Chemosphere*, *311*, 136982.

[28] Chee, S. S., Jawaid, M., Sultan, M. T. H., Alothman, O. Y., & Abdullah, L. C. (2020). Effects of nanoclay on physical and dimensional stability of Bamboo/Kenaf/nanoclay reinforced epoxy hybrid nanocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*(3), 5871–5880.

[29] Dallaev, R., Pisarenko, T., Papež, N., Sadovský, P., & Holcman, V. (2023). A brief overview on epoxies in electronics: Properties, applications, and modifications. *Polymers*, *15*(19), 4321.

[30] Surendran, A., Geethamma, V. G., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2019). Mechanical and thermal properties of epoxy/poly(styrene-co-acrylonitrile) (SAN)/organoclay nanocomposites. *Macromolecular Symposia*, *398*(1), 2000184.

[31] Drakopoulos, S. X., Loukelis, K., Triantafyllou-Rundell, M. E., et al. (2024). Epoxy/clay nanodielectrics: From relaxation dynamics to capacitive energy storage. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, *7*, 118.

[32] Khosravi, M., & Khosravi, M. (2023). Anti-corrosion/weathering properties of epoxy-siloxane structure via Cloisite 30B/polyaniline inclusion as new hybrid nanocomposite coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *666*, 131297.

[33] Sharif, M., & Tavakoli, S. (2023). Biodegradable chitosan-graphene oxide as an effective green filler for improving properties in epoxy nanocomposites. International Journal of Biological Macromolecules, *233*, 123550.

[34] George, J. S., Vijayan, P. P., Ponçot, M., Paduvilan, J. K., & Thomas, S. (2024). Viscoelastic and rheokinetic behaviour of cellulose nanofiber/Cloisite 30B hybrid nanofiller reinforced epoxy nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, *498*, 155170.

[35] Ganjaee Sari, M., Ramezanzadeh, B., & Pakdel, A. S. (2016). A physico-mechanical investigation of a novel hyperbranched polymer-modified clay/epoxy nanocomposite coating. *Progress in Organic Coatings*, *99*, 1.

[36] Rudawska, A. (2024). The effects of temperature on mechanical properties of neat and montmorillonite reinforced epoxy compounds. *The Journal of Adhesion*, *101*(1), 265–298.

[37] Ganvir, V. Y., & Ganvir, H. V. (2025). Moisture absorption behavior of epoxy-kenaf composites enhanced with surface-modified nano-clay. *Interactions*, *246*, 3,42-55.

[38] Al-kawaz, A. E., Al-Mutairi, N. H., & Alobad, Z. K. M. (2024). Tribological behavior of epoxy/nano-clay nanocomposites used as a floor coating. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *38*(23), 4299-4315.

[39] Shahrajabian, H., & Vaezzadeh, H. (2024). 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), 2545-2554.

[40] Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M. (2023). Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix. *Polymer Composite*, *45*(4), 2919-2926.

[41] Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2023). A comprehensive review on polymer matrix composites: Material selection, fabrication, and application. *Polymer Bulletin*, *80*, 47–87.