



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

M. H. Karami¹, 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].



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

محمدحسین کرمی^۱، امید معینی جزئی^{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 با استفاده از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، می‌تواند به بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها کمک کند. تحقیقات نشان می‌دهد 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 افزایش می‌دهد. این بهبود به دلیل پراکنش مناسب نانوذرات و تعامل بهینه بین رزین و نانورس است. هم‌چنین، این مطالعه به بررسی پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌پردازد و نشان می‌دهد که افزودن نانورس به ترکیبات اپوکسی می‌تواند خواص گرمایی و مکانیکی این مواد را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. به‌طور کلی، این پژوهش چنین نتیجه می‌گیرد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از نانورس و نانوذرات رس اصلاح‌شده، به‌طور چشم‌گیری از نظر پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد و می‌تواند در کاربردهای صنعتی به‌عنوان موادی با عملکرد بالا و مقاوم در برابر حرارت و تخریب گرمایی به‌کار رود. این تحقیق، هم‌چنین به بررسی اثر نانورس‌های اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در زمینه 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، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

کرمی، محمدحسین، معینی جزئی، امید. (۱۴۰۴). آنالیز ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۳)، ۱۰۸-۱۲۳.



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

محمدحسین گرمی^۱، امید معینی جزئی^{۲*}

۱- پژوهشگر پسا دکترا 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 با استفاده از اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، می‌تواند به بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها کمک کند. تحقیقات نشان می‌دهد 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 افزایش می‌دهد. این بهبود به دلیل پراکنش مناسب نانوذرات و تعامل بهینه بین رزین و نانورس است. هم‌چنین، این مطالعه به بررسی پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌پردازد و نشان می‌دهد که افزودن نانورس به ترکیبات اپوکسی می‌تواند خواص گرمایی و مکانیکی این مواد را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. به‌طور کلی، این پژوهش چنین نتیجه می‌گیرد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از نانورس و نانوذرات رس اصلاح‌شده، به‌طور چشم‌گیری از نظر پایداری حرارتی و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد و می‌تواند در کاربردهای صنعتی به‌عنوان موادی با عملکرد بالا و مقاوم در برابر حرارت و تخریب گرمایی به‌کار رود. این تحقیق، هم‌چنین به بررسی اثر نانورس‌های اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در زمینه 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، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

گرمی، محمدحسین، معینی جزئی، امید. (۱۴۰۴). آنالیز ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۴(۱۴۳)، ۱۰۸-۱۲۳.

۱. مقدمه

رزین اپوکسی به دلیل کارایی برجسته‌اش در بهبود ویژگی‌های مکانیکی و مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی و تخریب، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پلیمرهای گرماسخت شناخته می‌شود. این ماده در زمینه‌های مختلفی، از جمله: پوشش‌ها، چسب‌ها، ترکیبات قالب‌سازی و کامپوزیت‌های پلیمری کاربردهای وسیعی دارد [۱].

باتوجه به این ویژگی‌ها، بررسی تخریب نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اهمیت بالایی دارد، زیرا می‌تواند بر دامنه دمایی و طول عمر سامانه تأثیرگذار [۲].

در این راستا، نانوذرات رس به‌عنوان یکی از بهترین تقویت‌کننده‌های پلیمری شناخته می‌شوند. این نانوذرات که به سیلیکات‌های لایه‌ای یا سیلیکات‌های ورقه‌ای نیز معروف‌اند، دارای دو نوع ساختار ایده‌آل، یعنی میان‌لایه‌ای و ورقه‌ای هستند که می‌توانند بر روی شکل‌گیری نانوکامپوزیت و چسبندگی بین ماتریس و نانوذرات تأثیرگذار باشند [۳]. به‌دلیل ساختار میان‌لایه‌ای و نسبت ابعاد (L/D) این نانوذرات، استفاده از آن‌ها در ترکیب با رزین اپوکسی می‌تواند به بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها کمک کند. 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 خواهد بود؛ در حالی که استفاده از سخت‌کننده‌های آمینی منجر به 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 تأثیر می‌گذارد [۵].

سرانجام، خواص سدکنندگی نانورس یا سیلیکات‌های لایه‌ای در برابر هیدروژن و اکسیژن و همچنین نوع ساختار آن‌ها می‌تواند به بهبود پایداری گرمایی رزین اپوکسی کمک کند. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد مرکب در صنایع مختلف شناخته می‌شود و با ترکیب رزین‌های اپوکسی و نانوذرات، ویژگی‌های منحصر به فردی را به‌نمایش می‌گذارد که می‌تواند به‌طور قابل توجهی عملکرد و دوام محصولات نهایی را بهبود بخشد [۶].

تحلیل ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی به ما این امکان را می‌دهد که توزیع و اندازه نانوذرات را در ماتریس اپوکسی درک و

تأثیر آن را بر ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی بررسی کنیم [۷-۸].

بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به درک بهتری از نحوه توزیع و تعامل نانوذرات در ماتریس کمک کند، که این امر می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و عملکرد کلی مواد منجر شود. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها تحت تأثیر ساختار و ترکیب آن‌ها قرار دارد. با مطالعه این خواص، می‌توان رفتار مواد را در شرایط مختلف، پیش‌بینی و از این اطلاعات برای طراحی مواد جدید استفاده کرد. تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند تأثیر زیادی بر پایداری و عمر مفید آن‌ها داشته باشد. بررسی این ویژگی‌ها به تولیدکنندگان کمک می‌کند تا مواد با دوام‌تری را توسعه دهند که در دماهای بالا یا شرایط سخت محیطی عملکرد بهتری داشته باشند.

پژوهش در زمینه اپوکسی و نانورس اصلاح‌شده می‌تواند به بررسی ترکیب‌های جدید این مواد و تأثیر آن‌ها بر خواص مکانیکی و تخریب گرمایی بپردازد. علاوه بر این، بررسی کاربردهای جدید این ترکیبات در صنایع مختلف و شناسایی چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در استفاده از 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 خواهد بود.

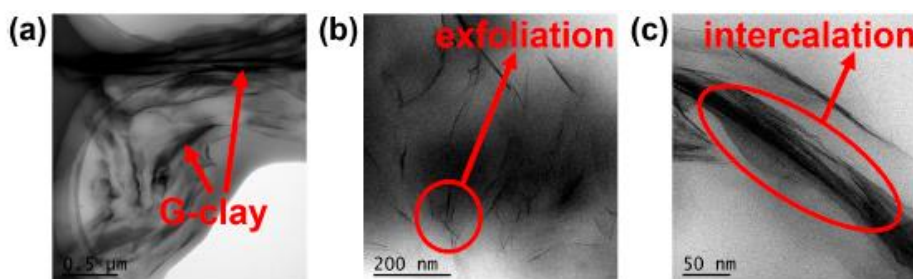
این پژوهش به تحلیل تأثیر نانورس‌های اصلاح‌شده و هیبرید نانوذرات اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی، تخریب گرمایی و دستاوردهای نوین در زمینه رزین‌های اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی می‌پردازد. هم‌چنین، در این پژوهش به مهم‌ترین نتایج و پیشرفت‌های اخیر در ساخت نانوکامپوزیت‌های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

۲. ریخت‌شناسی (مورفولوژی)

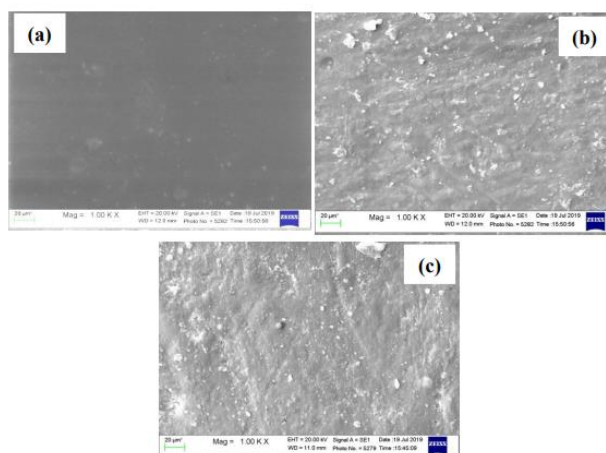
ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی (اپوکسی کاردانول) حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی اصلاح‌کننده ژیرارد (تری‌متیل آمینو استو هیدرازید کلرید) بررسی شد (شکل ۱). پراکندگی یکنواخت نانورس در ماتریس اپوکسی بسیار مهم است و بر خواص ترمودینامیکی و مکانیکی تأثیر می‌گذارد. همان‌طور که از تصاویر پیدا است؛ نانورس اصلاح‌شده به‌صورت مناسب در رزین اپوکسی

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

پخش‌شده‌است. نانورس به‌صورت ساختار لایه‌ای و ساختار تک‌لایه پراکنده‌شده‌است. این ساختارها به‌صورت تصادفی در ماتریس اپوکسی پراکنده است. این پراکنش مناسب نانورس به‌دلیل حضور اصلاح‌کننده ژیرارد و نیروی محرکه گروه‌های آمینی فعال شرکت‌کننده در فرایند پخت است [۹]. پژوهشگران ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با الیاف ضایعاتی موی انسان را بررسی کردند (شکل (۲)). نتایج نشان داد که زمانی که یک گرم از الیاف مو و یک گرم از نانورس در نانوکامپوزیت اپوکسی استفاده می‌شود، پراکنش ذرات بسیار مناسب است. همچنین، با تغییر وزن الیاف و نانورس به ۲ گرم، ذرات در کامپوزیت تمایل به چسبندگی به یکدیگر و کلوخه‌ای شدن دارند و در بخشی از ماتریس اپوکسی اصلاً ذرات دیده نمی‌شود و پراکنش بسیار نامناسب است.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در حضور نانورس اصلاح‌شده با اصلاح‌کننده 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 دوگرم 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 بررسی شد. نتایج آزمون میکروسکوپ اتمی نشان داد که افزایش ۵ درصد وزنی به ماتریس رزین اپوکسی، کلوخه‌ای شدن در پی دارد. همچنین، سطح نانوکامپوزیت بسیار زبر می‌شود. با افزایش مقدار نانورس، کلوخه‌ای شدن افزایش می‌یابد [۱۱].

اثر افزودن نانورس اصلاح‌شده با گروه سیلانی و نانورس اصلاح‌نشده، بر ریخت‌شناسی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که، اصلاح سطح نانورس با گروه سیلانی برهم‌کنش بین سطحی را افزایش می‌دهد و در نتیجه، منجر به کاهش کلوخه‌ای شدن در مقایسه با نمونه اصلاح‌نشده می‌شود [۱۲].

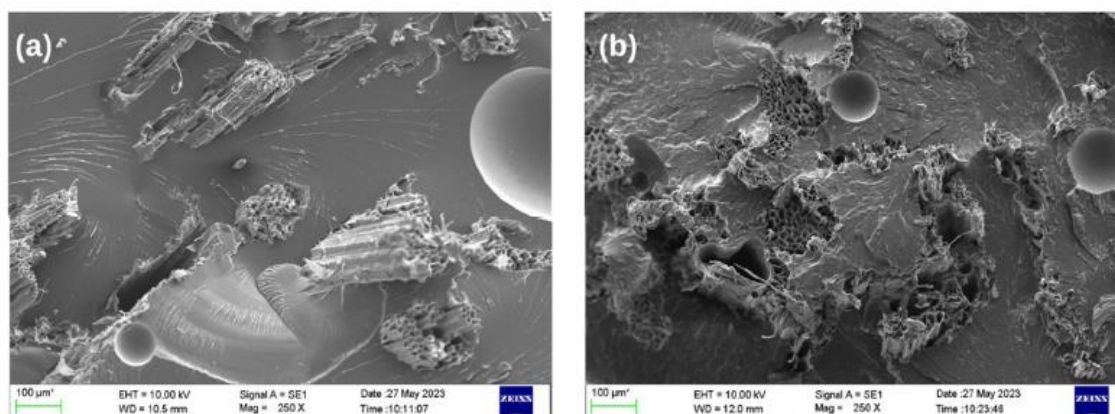
ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف طبیعی به دست آمده از پوست موز و نانورس بررسی شد (شکل (۳)). نتایج نشان داد که توزیع موفق و یکنواخت نانورس در سراسر ماتریس پلیمری برای دستیابی به خواص مطلوب در مواد نانوکامپوزیتی حاصل مهم است. نبود تجمع نشان می‌دهد که نانورس به طور مؤثر، لایه‌برداری و در ماتریس پلیمری توزیع شده است. این امر به طور ویژه مهم است، زیرا کلوخگی می‌تواند به عنوان نقص عمل کند و خواص مکانیکی کامپوزیت را کاهش دهد. چسبندگی سطحی قوی بین نانورس و ماتریس پلیمری می‌تواند به بهبود عملکرد ماده، به ویژه از نظر زیست‌تخریب‌پذیری کمک کند. یک چسبندگی سطحی قوی ممکن است، دسترسی عامل تخریب‌کننده را به ماتریس پلیمری محدود کند و در نتیجه، مقاومت در برابر تخریب زیستی کامپوزیت را افزایش دهد [۱۳].

در پژوهشی دیگر، اثر نانورس و نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های آمینوسیلانی بررسی شد. نتایج آزمون میکروسکوپ الکترونی نشان داد که حضور نانورس اصلاح‌شده منجر به کاهش کلوخگی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌شود و نانورس در تمام اپوکسی به خوبی پراکنده و توزیع می‌شود [۱۴].

سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی دودیواره انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که پراکنش نانورس در ماتریس اپوکسی مناسب نیست. بنابراین، سطح ماتریس و نانولوله‌های کربنی، خیس‌پذیری کمتری خواهد داشت و در نتیجه، نانوکامپوزیت کلوخه‌ای خواهد شد. برای بهبود پراکنش نانولوله‌های کربنی، در ماتریس اپوکسی از نانورس استفاده شد. حضور نانورس منجر به ساخت هیبرید نانوکامپوزیت می‌شود. بنابراین، با حضور هم‌زمان دو نانوذره، پراکنش ذرات در ماتریس اپوکسی بهبود می‌یابد که در نتیجه باعث بهبود در خواص مکانیکی هیبرید نانوکامپوزیت هم می‌شود [۱۵].

۳. خواص مکانیکی

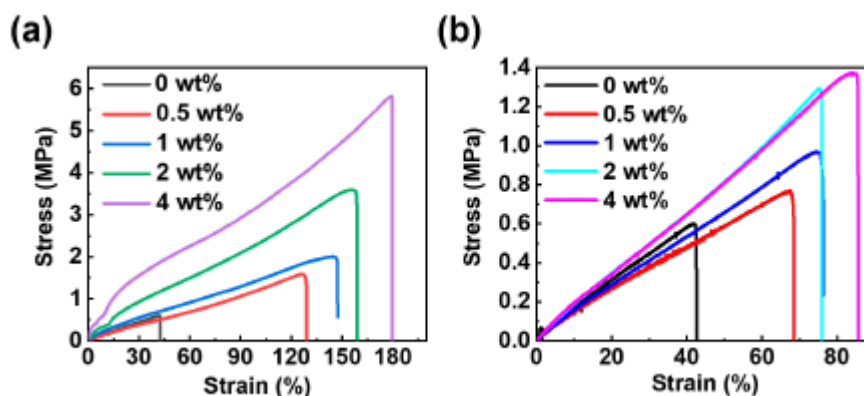
در پژوهشی خواص مکانیکی رزین زیست‌اپوکسی خالص (اپوکسی کاردانول)، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه ژیرارد و نانوکامپوزیت اصلاح‌نشده بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزودن ۰/۵ درصد از نانورس به رزین اپوکسی، مقادیر استحکام کششی و مدول یانگ به ترتیب برابر با ۰/۷۷ و ۲۸/۳۴ مگاپاسکال و مگاپاسکال افزایش می‌یابد. 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].

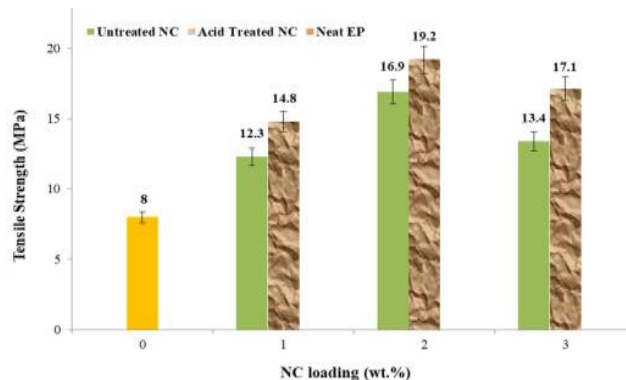
استحکام کششی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با اسیدسولفوریک بررسی شد. نتایج نشان داد که (شکل (۵))، نانوکامپوزیت اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده در ۱ و ۲ درصد وزنی، افزایش می‌دهد. با افزایش ۳ درصد وزنی نانورس به رزین اپوکسی، از استحکام کششی کاسته می‌شود. این کاهش به دلیل برهم‌کنش ضعیف بین رزین اپوکسی و نانورس است، زیرا با افزایش درصد وزنی، نانورس تمایل به کلوخگی دارد. هم‌چنین، آزمون استحکام ضربه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده انجام شد؛ نتایج نشان داد که مقدار استحکام ضربه رزین اپوکسی به مقدار $2/6 \text{ J/mm}^2$ است و با افزودن ۲ درصد وزنی نانورس اصلاح‌شده به مقدار $18/7 \text{ J/mm}^2$ افزایش می‌یابد. با افزایش ۳ درصد وزنی نانورس به رزین اپوکسی، استحکام ضربه به مقدار $15/6 \text{ J/mm}^2$ کاهش می‌یابد [۱۸].

به دلیل پراکنش مناسب نانورس در ماتریس اپوکسی است (شکل (۴)). بنابراین، برهم‌کنش قوی اپوکسی و نانورس اصلاح‌شده، منجر به بهبود در فصل مشترک می‌شود [۹].
 مدول ذخیره رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده با نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده با سیلان بررسی شد. نتایج نشان داد که مدول ذخیره نانوکامپوزیت اصلاح‌شده در مقایسه با رزین اپوکسی خالص به مقدار ۴۴ درصد، افزایش می‌یابد. این افزایش به دلیل برهم‌کنش بین سطحی، نانورس اصلاح‌شده و رزین اپوکسی است. هم‌چنین، دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده با گروه سیلانی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، افزایش می‌یابد. افزایش برهم‌کنش بین رزین اپوکسی و نانورس اصلاح‌شده (۵ و ۱۰ درصد وزنی)، منجر به کاهش تحرک زنجیره‌های پلیمری می‌شود. بنابراین، دمای انتقال شیشه مقدار کمی کاهش می‌یابد و کلوخگی رخ می‌دهد [۱۶-۱۷].



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].



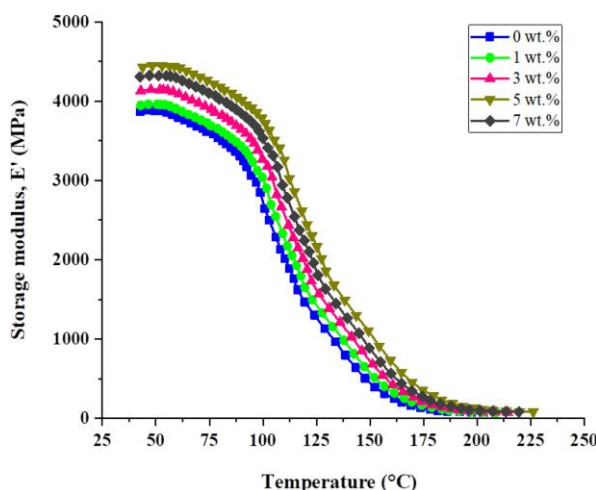
شکل ۵. نمودار استحکام کششی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی [۱۸].

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

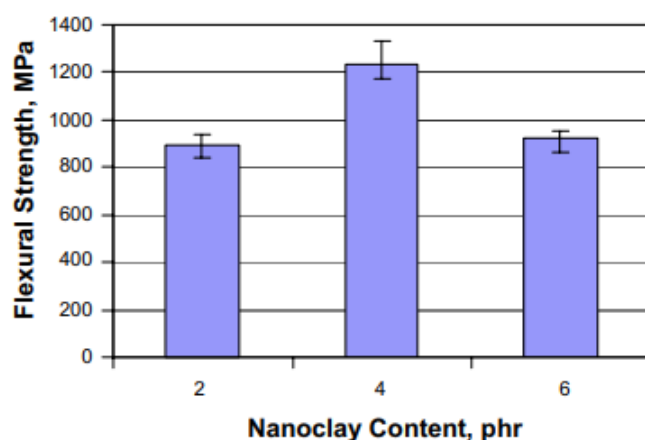
نانورس افزایش می‌یابد. این افزایش، به دلیل تعامل بهتر بین اپوکسی، الیاف جوت و نانورس است که به بهبود انتقال تنش کمک کرده است [۱۹].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و الیاف کربن بررسی شد (شکل ۷). نتایج نشان داد که با افزودن ۲ phr نانورس به این کامپوزیت، استحکام خمشی به مقدار ۳۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین، با افزایش مقدار نانورس به ۴ phr، استحکام خمشی کم می‌شود. این کاهش در خواص مکانیکی به دلیل پراکنش مناسب نانورس در بستر رزین اپوکسی است که منجر به افزایش حفره در نانوکامپوزیت شده است [۲۰].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح شده با هیدروکسید سدیم و الیاف چوب (جوت) بررسی شد. نتایج آزمون نشان داد که تغییرات در مقدار مدول ذخیره نمونه‌های تقویت شده با نانورس به عنوان تابعی از دما در شکل (۶)، آورده شده است. افزودن مقدار ۵ درصد وزنی از نانورس به رزین اپوکسی، منجر به افزایش مدول ذخیره (۴۴۴۶/۳۸ مگاپاسکال) در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌شود. افزایش مدول ذخیره نانوکامپوزیت ۵ درصد در مقایسه با رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت ۱ درصد، نانوکامپوزیت ۳ درصد، نانوکامپوزیت ۷ درصد به ترتیب برابر با ۸،۱۲،۴ و ۳ درصد است. بنابراین مدول کامپوزیت‌ها در مقایسه با نمونه‌های کامپوزیت بدون



شکل ۶. نمودار مدول ذخیره 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].

یا میرایی) برای رزین اپوکسی برابر با ۰/۳۴۰ است. هم‌چنین، این مقدار برای نمونه‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ به‌ترتیب برابر با ۰/۲۹۵، ۰/۳۳۷ و ۰/۴۰۷ است. هم‌چنین، با افزودن نانورس به ماتریس اپوکسی، دمای انتقال شیشه‌ای افزایش یافت [۲۴].

استفاده از مواد ضد شعله در رزین اپوکسی، در بیشتر موارد منجر به پراکنش نانو مناسب این مواد در بستر رزین اپوکسی می‌شود و در نتیجه، خواص مکانیکی کم می‌شود. پژوهشگران برای بهبود پراکنش، استفاده هم‌زمان از نانورس و نانولوله کربنی چنددیواره را پیشنهاد کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که باید از هم‌زمان مکانیکی و فراصوت استفاده شود و در نتیجه، این روش نه تنها پراکنش نانورس را در ماتریس اپوکسی بهبود بخشد، بلکه منجر به افزایش خواص مکانیکی شد. مقدار استحکام ضربه و استحکام کششی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی درمقایسه با رزین اپوکسی بیشتر بود. بهترین روش برای داشتن بهترین خواص مکانیکی در استفاده از هم‌زمان مکانیکی به مدت ۸ ساعت و استفاده از فراصوت به مدت ۶ ساعت بود [۲۵].

۴. پایداری گرمایی و تخریب گرمایی

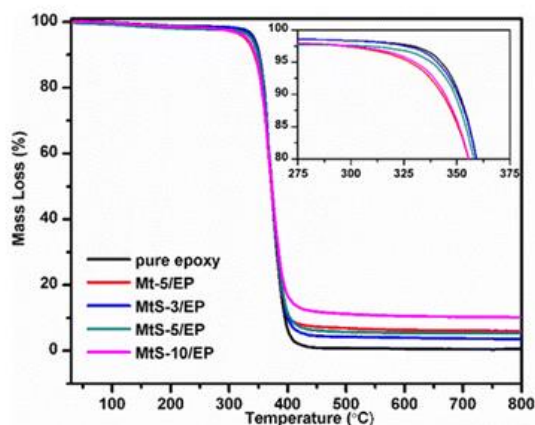
در پژوهشی تخریب گرمایی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با سیلان بررسی شد (شکل ۸)). نتایج نشان داد که دمای ۵ درصد کاهش وزن نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌نشده درمقایسه با نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده، کاهش می‌یابد. این نتایج بدان معنا است که نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده پایداری گرمایی بهتری درمقایسه با دیگر نمونه‌ها دارد. هم‌چنین، گروه سیلان منجر به سازگاری بهتر رزین اپوکسی با نانورس شده است. در دمای بالای ۴۰۰ درجه سلسیوس، در تمامی نمونه‌ها، افزایش تخریب گرمایی مشاهده می‌شود. هم‌چنین دمای ۵ درصد کاهش وزن، نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌نشده، به‌ترتیب برابر با ۳۳۹ و ۳۳۸ درجه سلسیوس است [۲۶].

آنالیز گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی، کامپوزیت اپوکسی حاوی استایرن کو آکریلو نیتریل، و نانوکامپوزیت اپوکسی استایرن کو آکریلو نیتریل حاوی نانورس بررسی شد. نتایج نشان داد که زغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس زغال باقی‌مانده بیشتری

آزمون خواص دینامیکی - مکانیکی و خواص مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلوکسان و نانورس انجام شد. نتایج نشان داد 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، درمقایسه با رزین اپوکسی خالص داشته است. اطلاعات به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که مدول ذخیره‌سازی با افزایش غلظت نانورس تقویت می‌شود. این مشاهدات، نشان می‌دهد که نانورس به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده برای پوشش اپوکسی سیلوکسان عمل می‌کند. این عملکرد ممکن است به دلیل پراکندگی مؤثر بین لایه‌ای و برون‌لایه‌ای باشد که تعاملات سطحی بین نانوصفحات رس و زنجیره‌های پلیمری را افزایش داده است [۲۱]. بدین ترتیب، نیروی اعمال شده به ماتریس اپوکسی سیلوکسان به‌طور مطلوبی با لایه‌های نانورس و با نسبت ابعادی بالا کاهش می‌یابد. افزودن نانوذرات رس به کامپوزیت اپوکسی حاوی سیلوکسان، دمای انتقال شیشه‌ای را تا مقدار ۸/۱ درجه سلسیوس بالا برده است. دو دلیل اصلی وجود دارد: یکی، پدیده نفوذ و درهم‌آمیخته‌شدن زنجیره‌های پلیمری در بین صفحات نانورس که با سطح بالای آن مرتبط است و منجر به محدود شدن حرکت براونی زنجیره اپوکسی سیلوکسان می‌شود. دلیل دیگر مربوط به پرکردن منافذ پوشش و ایجاد یک میکرو و نانو ساختار یکپارچه به‌وسیله نانورس است [۲۲].

در پژوهشی دیگر، آزمون دینامیکی مکانیکی رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه آمینوسیلان بررسی شد. نتایج آزمون نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت اپوکسی درمقایسه با رزین اپوکسی، افزایش می‌یابد. این تغییرات به دلیل حضور نانورس اصلاح‌شده در ترکیب رزین اپوکسی است که منجر به کاهش حرکت زنجیره‌ها و افزایش برهم‌کنش می‌شود. هم‌چنین، استفاده بیش از 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 انجام شد. نتایج این تحقیق برای تعیین مقدار دمای انتقال شیشه‌ای استفاده شد. مقدار $Tan\delta$ (ضریب تلفات



شکل ۸. نمودار گرماوزن سنجی رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با سیلان.
 Figure 8. Thermogravimetric analysis graph of pure epoxy resin, epoxy nanocomposite, and epoxy nanocomposite modified with silane

نانورس بررسی شد. نتایج نشان داد که زمانی که ۱۰ درصد وزنی از نانورس به رزین اپوکسی اضافه می شود، دمای بیشینه تخریب افزایش می یابد و دمای اولیه تخریب کاهش می یابد. هم چنین، از غلظت های ۴، ۶، ۸ و ۱۰ phr برای بررسی پایداری گرمایی استفاده شد. نتایج این بررسی نشان داد که در درصد های وزنی زیر مقدار ۸ phr، پایداری گرمایی در مقایسه با دیگر نمونه ها افزایش بهتری داشته است [۳۰].

آنالیز گرماوزن سنجی رزین اپوکسی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح شده با سیلان بررسی شد. روش سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با نانورس و گروه های سیلانی، به روش دوغاب بود. نتایج نشان داد که فرایند تخریب به صورت سه مرحله ای انجام می شود. هم چنین، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت اصلاح شده در مقایسه با رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی، افزایش بهتری داشته است. دو عامل بسیار تأثیر گذار بر پایداری گرمایی، شبکه ای شدن و شرایط پخت است [۳۱].

در مقایسه با دیگر نمونه ها است و پایداری گرمایی را افزایش می دهد. هم چنین، دمای اولیه تخریب نانوکامپوزیت اپوکسی استاتین کو آکریلو نیتریل حاوی نانورس نشان داد که این نمونه در مقایسه با دیگر نمونه ها، دمای اولیه تخریب کمتری دارد. این نتایج به دلیل حضور استاتین کو آکریلو نیتریل در نانوکامپوزیت است؛ زیرا این ماده ترموپلاستیک است و چگالی شبکه ای شدن را کم می کند [۲۷]. پایداری گرمایی رزین اپوکسی خالص، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح شده با روغن سویا بررسی شد (جدول (۱)). نتایج درصد زغال باقی مانده نشان داد که رزین اپوکسی در حضور روغن سویا، مقدار درصد زغال باقی مانده ای ندارد. این بدان معنا است که بر هم کنش بین رزین اپوکسی و روغن سویا ضعیف و یا بسیار کم است. هم چنین، با افزودن نانورس به این کامپوزیت، مقدار درصد زغال باقی مانده افزایش می یابد. بر هم کنش رزین اپوکسی با روغن سویا در مقایسه با دیگر نمونه ها، منجر به وجود دو دمای پیک شدن (353°C و 608°C) می شود [۲۸].

در پژوهشی دیگر، آنالیز تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی

جدول ۱. مشخصه های مهم به دست آمده از آزمون آنالیز گرماوزن سنجی [۲۸].

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

Sample	Initial degradation temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Secondary peak temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Initial peak temperature ($^{\circ}\text{C}$)	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

می‌تواند رادیکال‌های آزاد تولیدشده از تخریب حرارتی اپوکسی را متوقف کند و در نتیجه، پایداری حرارتی کامپوزیت‌ها را افزایش دهد. علاوه بر این، تبخیر اجزای تخریب‌شده کامپوزیت‌ها می‌تواند باعث افزایش زمان اقامت مولکول‌ها و کاهش دمای کاهش وزن به صورت سینتیکی شود [۳۵].

در پژوهشی دیگر به‌جای استفاده از نانورس از کیتوسان و نانوصفات گرافن اکساید استفاده شد. نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوگرافن اکساید و کیتوسان سنتز شد. نتایج نشان داد که حضور نانوصفات گرافن اکساید می‌تواند به بهبود پایداری گرمایی کامپوزیت سبز اپوکسی و کیتوسان کمک کند. این افزایش پایداری حرارتی به دلیل نانو صفات گرافن اکساید است، زیرا منجر به کاهش حجم آزاد نانوکامپوزیت اپوکسی در مقایسه با کامپوزیت سبز می‌شود و در نتیجه، پایداری گرمایی و درصد زغال باقی‌مانده افزایش می‌یابد [۳۶].

انرژی فعال‌سازی رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولوز و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولوز و نانورس بررسی شد (جدول ۲). نتایج این تحقیق نشان داد که مقادیر به‌دست‌آمده از انرژی فعال‌سازی، رفتار مشابه با نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولوز دارد. کاهش در انرژی فعال‌سازی با افزودن نانورس، می‌تواند به تأثیر شتاب‌دهنده نانو ساختارها بر واکنش پخت نسبت داده شود؛ وجود پیوندهای شیمیایی مناسب بین الیاف نانوسلولوزی و زنجیره‌های اپوکسی می‌تواند منجر به تشکیل چندین پیوند شود. تشکیل پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل بر روی سطح الیاف سلولوز و گروه‌های قطبی در زنجیره‌های اپوکسی و هم‌چنین، بین گروه‌های هیدروکسیل و آمین‌های واکنش‌نیافته نیز مشاهده می‌شود [۳۷].

اثر نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های آلکیل آمونیوم و نانورس اصلاح‌نشده، بر رفتار پایداری گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانورس منجر به افزایش پایداری گرمایی رزین اپوکسی در مقایسه با دیگر نمونه‌ها می‌شود. هم‌چنین، مشخص شد که عدم اصلاح سطح نانورس، اثر چشم‌گیری بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی ندارد [۳۲].

به‌منظور ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی از نایلون ۶، در نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس استفاده شد. نتایج نشان داد که این هیبرید نانوکامپوزیت، فرایند تخریب گرمایی دومرحله‌ای دارد. هم‌چنین، حضور نایلون در ترکیب با اپوکسی با نانورس، پایداری گرمایی بیشتری در مقایسه با دیگر نمونه‌ها دارد [۳۳].

در پژوهشی دیگر، پایداری گرمایی اپوکسی اصلاح‌شده حاوی برم و نانورس بررسی شد. نتایج نشان داد که دمای ۵۰ درصد کاهش وزن نمونه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی رفتار مشابه یکدیگر دارند. هم‌چنین، سازوکار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت دومرحله‌ای است. آنالیز بیشینه دمای تخریب گرمایی نشان داد که نانوکامپوزیت اپوکسی بیشینه دمای تخریب گرمایی بیشتری در مقایسه با رزین اپوکسی خالص دارد. این افزایش به دلیل حضور زنجیره‌های رزین اپوکسی در میان لایه‌های نانورس است [۳۴].

پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، الیاف بازالت حاوی نانورس (بنتونیت) و نانورس اصلاح‌شده با کلسیم بررسی شد (شکل ۱). دمای شروع تخریب کامپوزیت‌های حاوی نانورس در حدود ۳۳۰ درجه سلسیوس است که در کامپوزیت‌های حاوی نانورس‌های اصلاح‌شده به دماهای بالاتر منتقل می‌شود. هم‌چنین، نتایج نشان داد که تخریب یک‌مرحله‌ای برای تمام نمونه‌ها مشاهده شد. با این حال، کاهش وزن در نانوکامپوزیت اپوکسی زودتر از نانوکامپوزیت اصلاح‌شده است. سطح نانورس‌های بنتونیت کلسینه

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

به منظور افزایش بهبود خواص تخریب گرمایی رزین اپوکسی، نانورس با گروه‌های آمینوسیلیانی، اصلاح سطح شد. نتایج نشان داد که با افزایش دما، TGA نانوکامپوزیت اصلاح‌شده، کاهش شدید حرارتی نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تجزیه است. بالای ۴۰۰ درجه سلسیوس، نرخ ازدست‌دادن جرم برای هر سامانه به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد که نشان می‌دهد بیشتر گروه‌ها در ساختار رزین اپوکسی تحت تجزیه حرارتی قرار گرفته‌اند. دمای ۵ درصد کاهش وزن برای رزین پوکسی خالص برابر با ۳۴۳ درجه سلسیوس است. با افزودن نانورس و نانورس اصلاح‌شده، دمای ۵ درصد کاهش وزن پایین می‌آید. این کاهش ممکن است به کاهش چگالی پیوندهای شبکه‌ای شده در رزین‌های اپوکسی پس از افزودن نانورس نسبت داده شود. هم‌چنین، حضور نانورس و نانورس اصلاح‌شده منجر به افزایش زغال باقی‌مانده در نانوکامپوزیت اپوکسی می‌شود و در نتیجه، پایداری گرمایی افزایش می‌یابد [۳۸].

تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با پلی‌استر آمین بررسی شد. نتایج نشان داد که بخشی از مولکول‌های پلی‌استر آمین ممکن است به‌طور آزاد به ماتریس اپوکسی نفوذ کند و مقاومت حرارتی را کاهش دهد. به‌هر حال، نکته مهمی که از داده‌های TGA قابل استخراج است، این است که نمونه‌های نانورس اصلاح‌شده تأثیر منفی بر فرایند پخت و با ماتریس اپوکسی ندارند. با توجه به عدم کاهش در فرایند تخریب حرارتی، این مطلب تأیید می‌شود [۳۹].

۵. پیشرفت‌های اخیر

اثر نانورس بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی و هم‌چنین، تأثیر دما بر مقاومت کششی دو نوع ترکیب اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد 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 استفاده از عامل پخت مناسب مشاهده شد [۴۰].

در پژوهشی اثر جذب و خواص مکانیکی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس و الیاف کناف بررسی شد. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانورس و کناف به ترتیب ۲۷ درصد کاهش در استحکام کششی داشتند؛ در حالی که نانوکامپوزیت حاوی نانورس، تغییر قابل توجهی نشان نداد. هم‌چنین،

نانورس تأثیر جذب آب را بر ویژگی‌های مکانیکی کاهش داده است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از نانورس‌های اصلاح‌شده سطحی نه تنها به کاهش جذب رطوبت در کامپوزیت‌های اپوکسی کمک کرده، بلکه ویژگی‌های مکانیکی آن‌ها را نیز بهبود بخشیده است. با توجه به کاهش قابل توجه در میزان جذب رطوبت و ضریب نفوذ، می‌توان انتظار داشت که این نوع کامپوزیت‌ها در کاربردهای دریایی و محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری داشته باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به توسعه مواد کامپوزیتی با کارایی بالا و مقاوم در برابر رطوبت در صنایع مختلف کمک کند [۲۰-۱۸].

اثر نانورس بر رزین اپوکسی، جهت بهبود کاربری در پوشش‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که افزودن نانورس‌ها به پوشش‌های اپوکسی، می‌تواند به طرز قابل توجهی خصوصیات مکانیکی و مقاومت به سایش را بهبود بخشد. به‌ویژه، پوشش نانوکامپوزیتی با ۲ درصد نانورس منجر به بهبود ۸۲ درصدی مقاومت به سایش است. هم‌چنین، سختی این پوشش‌ها با درصد‌های مختلف نانورس افزایش یافته است. این یافته‌ها نشان‌دهنده ظرفیت بالای استفاده از نانورس‌ها در بهینه‌سازی پوشش‌های اپوکسی است [۲۱-۲۲].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانورس سنتز شد. نتایج نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با افزودن نانورس به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی و حرارتی بهتری نسبت به ماتریس اپوکسی خالص نشان می‌دهند. تشکیل پیوندهای کووالانسی بین نانورس و اپوکسی عامل این بهبودها است. هم‌چنین، این نانوکامپوزیت‌ها فعالیت آنتی‌باکتریالی عالی علیه باکتری E.coli نشان می‌دهد و به‌عنوان یک فرمولاسیون امیدوارکننده برای جلوگیری از رشد باکتری‌ها مطرح است. لذا، این نتایج می‌تواند در صنعت و پزشکی کاربردی شود [۲۵-۲۳].

نتایج مطالعه نشان داد که سامانه‌های نانودی‌الکترونیک بر پایه رزین اپوکسی اصلاح‌شده با نانوذرات رس، خصوصیات دی‌الکتریکی قابل توجهی از خود نشان می‌دهد. 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 مشاهده شد. به‌طور کلی، افزودن نانوذرات رس به پوشش‌های دی‌الکترونیک اپوکسی، عملکرد آن‌ها را به‌طور چشم‌گیری ارتقاء می‌دهد [۲۸-۲۶].

نانوذرات سبز به مقدار به ۱۱۸ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت کششی در نانوکامپوزیت سبز ساخته شده از رزین اپوکسی خالص بیشتر بود. این افزایش در خواص مکانیکی به دلیل تعاملات بین سطحی بهبود یافته و حضور نانوصفحات گرافن اکساید با سختی بالا نسبت داده می‌شود [۳۷-۳۵].

نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف سلولز و نانورس سنتز شد. نتایج نشان داد که کاهش قابل توجهی در زمان ژل شدن و زمان شیشه‌ای شدن در حین فرایند پخت با افزودن نانوپرکننده‌های هیبریدی و در دماهای بالای پخت مشاهده شد. پروفایل گرانروی پیچیده نانوکامپوزیت‌ها در طول فرایند پخت روندی از رشد نمایی را در دماهای مختلف نشان داد [۳۸]. افزایش دمای انتقال شیشه‌ای به میزان ۱۰ درجه سلسیوس برای نانوکامپوزیت‌های هیبریدی در مقایسه با نمونه خالص به دلیل حضور هم‌زمان نانورس و الیاف سلولز نسبت داده شده است. با افزودن مقدار نانورس به بیش از ۰/۵ phr به کامپوزیت اپوکسی، کلوخه‌ای شدن دیده شد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که از درصدهای کمتر از این مقدار برای سنتز بهینه استفاده شود. در جدول (۳)، مهم‌ترین پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی جمع‌آوری شده است [۴۱-۳۹].

۶. چشم‌انداز آینده

آینده نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس اصلاح شده، به وضوح نشان دهنده ظرفیت بالای این مواد در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی است. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که افزودن نانورس به رزین‌های اپوکسی می‌تواند به طور قابل توجهی ویژگی‌های مکانیکی مانند استحکام کششی و مقاومت به سایش را افزایش دهد. به ویژه، نانوکامپوزیت‌های حاوی نانورس اصلاح شده، به دلیل تشکیل پیوندهای قوی تر و کاهش جذب رطوبت، می‌تواند در کاربردهای دریایی و محیط‌های مرطوب عملکرد بهتری داشته باشد. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با نانورس، بهبودهای قابل توجهی در خواص دی‌الکتریکی و حرارتی نیز نشان داده است که این امر می‌تواند به توسعه سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی و کاربردهای الکترونیکی کمک کند. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها دارای خواص آنتی‌باکتریالی است که می‌تواند در صنایع پزشکی و بهداشتی به کار رود. محدودیت‌های این پژوهش، شامل عدم بررسی

مقاومت سایشی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف کربن و نانورس بررسی شد. مقاومت سایشی با استفاده از روش‌های مختلف، ارزیابی و آزمایشی به طور خاص برای شبیه‌سازی تأثیر پودرهای سایشی برای کاربرد در هواپیماها یا وسایل هوایی طراحی شد. نتایج نشان داد که وجود نانورس باعث بهبود سطح سایش و باعث کاهش آسیب‌رساندن به سطح می‌شود [۳۱-۲۹].

بیش از ۵۰ درصد از مواد ضد آتش مورد استفاده در صنایع پلیمر و پلاستیک، هیدروکسیدهای فلزی است که در میان آن‌ها، هیدروکسید آلومینیوم (ATH) به دلیل سمیت و خوردگی پایین و همچنین، هزینه اقتصادی مناسب، بیشترین کاربرد را دارد. با این حال، استفاده از حجم بالای ATH در پلیمرها می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی شود. در این پژوهش، نانوذرات رس به کامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی حاوی الیاف شیشه و هیدروکسید آلومینیوم اضافه شد تا خواص مکانیکی و حرارتی این کامپوزیت‌ها بهبود یابد [۳۲]. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که افزودن ۳ phr نانوذرات رس، استحکام کششی و خمشی را به ترتیب ۱۰ درصد و ۹/۲ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج آزمایش‌های اشتعال پذیری، نشان داد که افزودن ۳ phr نانورس، اشتعال پذیری کامپوزیت‌ها را ۴۱ درصد بهبود می‌بخشد. این یافته‌ها نشان دهنده ظرفیت نانوذرات رس در بهبود خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های هیبریدی است و می‌تواند به توسعه مواد با عملکرد بهتر در صنایع مختلف کمک کند [۳۳].

در پژوهشی دیگر، اثر نانورس و نانورس اصلاح شده با کلسیم بر خواص حرارتی رزین اپوکسی و الیاف بازالت بررسی شد. نتایج نشان داد که نانورس اصلاح شده (بنتونیت) می‌تواند پایداری گرمایی رزین اپوکسی را افزایش دهد. در واقع، اصلاح سطح نانورس با گروه‌های کلسیم می‌تواند فرایند تخریب گرمایی رزین اپوکسی را که منجر به تولید رادیکال‌های آزاد می‌شود، به تأخیر بیاورد. حضور نانورس اصلاح شده در ترکیب با رزین اپوکسی می‌تواند برهم‌کنش بین ملکولی را تقویت کند و در نتیجه، پایداری گرمایی بهبود می‌یابد [۳۴]. سنتز نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوغرافن اکساید و کیتوسان انجام شد. هدف از این سنتز ساخت نانوکامپوزیت اپوکسی سبز با افزودن کیتوسان و گرافن اکساید بود. نتایج نشان داد که دمای انتقال شیشه‌ای اپوکسی خالص ۹۷ درجه سلسیوس است و با افزودن

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

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]

۷. نتیجه‌گیری

ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی و ترمودینامیکی آن‌ها دارد. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که پراکندگی یکنواخت نانورس در ماتریس اپوکسی، به‌ویژه در حضور اصلاح‌کننده‌های شیمیایی، می‌تواند به بهبود خواص مواد نانوکامپوزیتی منجر شود. در این راستا، وجود الیاف طبیعی و نانورس‌های اصلاح‌شده با گروه‌های عاملی، نه تنها از کلوخه‌ای شدن جلوگیری می‌کند، بلکه چسبندگی سطحی را نیز بهبود می‌بخشد و در نتیجه، کارایی و پایداری مواد را افزایش می‌دهد. در پایان این پژوهش، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده اثرات مثبت اصلاح نانورس بر خواص مکانیکی رزین‌های اپوکسی است. به‌ویژه،

کامل تأثیرات طولانی مدت نانورس بر خواص اپوکسی است. همچنین، نیاز به تحقیقات بیشتر برای ارزیابی عملکرد این ترکیبات در شرایط مختلف وجود دارد. پیشنهاد می‌شود که مطالعات آینده بر بررسی ترکیب‌های مختلف و نسبت‌های متفاوت معطوف شود. این امر می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و شیمیایی اپوکسی کمک کند. سرانجام، با توجه به پیشرفت‌های اخیر در سنتز و بهینه‌سازی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی، می‌توان انتظار داشت که این مواد در آینده به‌عنوان گزینه‌های مناسب و کارآمد در صنایع مختلف، از جمله: پوشش‌ها، کامپوزیت‌های هیبریدی و مواد ضد آتش، محل توجه قرار گیرد. این روند نشان‌دهنده یک چشم‌انداز روشن برای توسعه و کاربرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در آینده است.

- [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 MnO₂ cathode for high-performance aqueous Zn-ion batteries. *International Journal of Mineral Metallurgy and Materials*, 30, 25-32.
- نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانورس اصلاح‌شده با گروه‌های مختلف، به‌طور چشم‌گیری بهبود در استحکام کششی و مدول یانگ را افزایش داد. این افزایش به‌دلیل پراکنش مناسب نانورس و برهم‌کنش‌های بهینه بین رزین و نانورس است. هم‌چنین، نتایج نشان داد که افزودن نانورس، دمای انتقال شیشه‌ای را افزایش می‌دهد و ویژگی‌های حرارتی و مکانیکی کامپوزیت‌ها را بهبود می‌بخشد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده با سیلان و پلی‌استر آمین، از پایداری گرمایی بهتری نسبت به 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., Kalaei, 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.

- [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., & Kalae, 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.