Tarbiat Modares University

Journal of
Applied Research of Chemical-Polymer Engineering

journal homepage: www.arcpe.modares.ac.ir

Review Paper

The Properties of Epoxy-based Nanocomposites Containing Surface-modified Zinc Oxide Nanoparticles: A Review and Analysis of Recent Advances with Evaluation of Thermal Stability and Degradation Behavior

Mohammad Hossein Karami [1], Omid Moini Jazani [1,*], Ali Kordi [1]

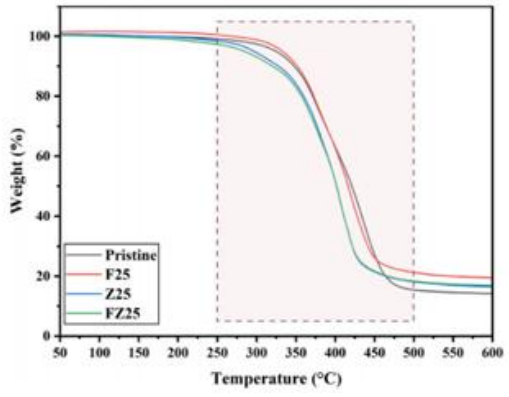
[1] *Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran*

ARTICLE INFO

Received 2025-11-11
Accepted 2025-12-15
Available online 2026-05-09
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

Keywords:
Epoxy Resin
Modified Zinc Oxide Nanoparticles
Morphology
Mechanical Properties
Thermal Degradation

GRAPHICAL ABSTRACT



ABSTRACT

This review article focuses on recent advancements in enhancing the mechanical, thermal, electrical, and corrosion-resistant properties of epoxy resin through the incorporation of surface-modified zinc oxide nanoparticles. The main objective of this review is to highlight the role of nanoparticle surface modification and weight fraction on the performance of epoxy nanocomposites and to provide a comprehensive overview of the findings reported in previous studies. In this review, scientific articles and experimental studies on epoxy nanocomposites containing zinc oxide nanoparticles were systematically analyzed. Selected studies were evaluated based on criteria such as the type of nanoparticle surface modification, dispersion and mixing methods, nanoparticle weight fraction, and the effects of these parameters on the mechanical and thermal properties of the epoxy matrix. Additionally, the findings related to hybrid nanocomposite structures and their synergistic effects were summarized. The review indicates that uniform dispersion of nanoparticles in the epoxy matrix improves interfacial adhesion, prevents stress concentration and crack propagation, and consequently enhances the overall strength and durability of the material. Most studies suggest that low nanoparticle loadings (0.25–1 wt.%) promote better dispersion and improved mechanical properties, whereas higher loadings may cause particle agglomeration and reduced performance. Surface modification of nanoparticles with silane or amine groups enhances compatibility with the polymer matrix, improves stress transfer, and increases thermal stability. Furthermore, recent studies show that hybrid nanocomposite structures create synergistic effects, simultaneously enhancing multiple performance characteristics. Overall, the incorporation of surface-modified nanoparticles into epoxy resin demonstrates significant potential for developing advanced materials in electronics, photonics, marine, medical, and aerospace applications.

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

Copyright@ 2025, The Authors. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

نشریه پژوهش‌های کاربردی مهندسی شیمی–پلیمر

آدرس صفحه: www.arcpe.modares.ac.ir

مقاله مروری

خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح شده: مطالعه مروری و تحلیل پیشرفت‌های نوین و بررسی پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

محمد حسین کرمی [۱]، امید معینی جزنی [۱،*]، علی کردی [۱]

[۱] گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

این مقاله مروری به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه بهبود خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و ضدخوردگی رزین اپوکسی از طریق افزودن نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده می‌پردازد. هدف از این مرور، تبیین نقش نوع عامل اصلاح سطحی و درصد وزنی نانوذرات در عملکرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و ارائه دیدی جامع از یافته‌های پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه است. در این مطالعه مروری، منابع علمی و پژوهش‌های تجربی منتشرشده در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی مورد بررسی و تحلیل تطبیقی قرار گرفته‌اند. مقالات منتخب بر اساس معیارهایی همچون نوع اصلاح سطح نانوذرات، روش اختلاط و پراکنش، درصد وزنی نانوذرات و اثر آن‌ها بر خواص مکانیکی و حرارتی رزین اپوکسی تحلیل شده‌اند. همچنین، یافته‌های گزارش‌شده در زمینه استفاده از ساختارهای هیبریدی و اثرات هم‌افزایی آن‌ها جمع‌بندی شده‌است. مرور مطالعات نشان داد که توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس اپوکسی موجب افزایش چسبندگی بین فازها، جلوگیری از تمرکز تنش و رشد ترک‌ها و در نتیجه بهبود استحکام و دوام ساختار می‌شود. نتایج اغلب پژوهش‌ها حاکی از آن است که بارگذاری‌های پایین نانوذرات (در محدوده ۰/۲۵ تا ۱ درصد وزنی) به پراکندگی بهتر و بهبود خواص مکانیکی منجر می‌شود، درحالی‌که مقادیر بالاتر باعث تجمع ذرات و افت عملکرد مکانیکی می‌شود. همچنین اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های سیلانی یا آمینی موجب افزایش سازگاری با ماتریس پلیمری، بهبود انتقال تنش و پایداری حرارتی بیشتر شده است. علاوه بر این، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ساختارهای هیبریدی نانوکامپوزیت‌ها با ایجاد اثر هم‌افزایی، موجب ارتقای هم‌زمان چندین ویژگی عملکردی می‌شوند. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات اصلاح‌شده در رزین اپوکسی چشم‌انداز روشنی برای توسعه مواد پیشرفته در صنایع الکترونیک، نوری، دریایی، پزشکی و هوافضا فراهم کرده است.

کلیدواژه‌ها

رزین اپوکسی
نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده
ریخت‌شناسی
خواص مکانیکی
تخریب گرمایی

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۰
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴
دسترس آنلاین: ۱۴۰۵/۰۲/۱۹
ISSN: 2588-5316
Online ISSN: 2588-5324

* نویسنده مسئول: o.moini@eng.ui.ac.ir

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، نویسندگان. این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد. بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.

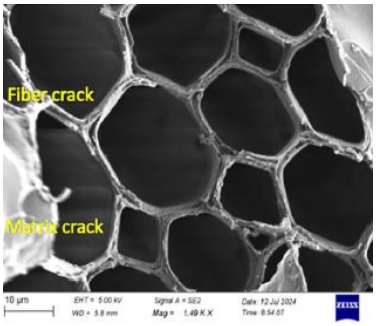
۱ مقدمه

رزین اپوکسی پلیمری گرماسخت با ساختار شیمیایی شامل گروه‌های اپوکسیدی فعال است که در حضور سخت‌کننده‌ها (مانند آمین‌ها یا انیدریدها) واکنش داده، شبکه‌های سه‌بعدی پایدار ایجاد می‌کند. این شبکه‌ها باعث خواص برجسته مکانیکی، حرارتی و شیمیایی رزین می‌شوند. رزین‌های اپوکسی به‌دلیل چسبندگی بالا، مقاومت مکانیکی و حرارتی مناسب، مقاومت شیمیایی قابل‌توجه و قابلیت سازگاری با نانوذرات اصلاح شده سطحی، در ساخت کامپوزیت‌ها، پوشش‌ها، چسب‌ها و مواد چندمنظوره کاربرد گسترده دارند[۱]. در نانوکامپوزیت‌ها، رزین اپوکسی ماتریسی مناسب برای توزیع یکنواخت نانوذرات و انتقال مؤثر تنش بین ذرات و الیاف تقویت‌کننده فراهم می‌کند که موجب بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی مواد کامپوزیتی می‌شود[۲]. نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر رزین اپوکسی به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی همچون چسبندگی بالا، مقاومت مکانیکی مطلوب، پایداری حرارتی، در صنایع پیشرفته‌ای مانند هوافضا، خودروسازی، الکترونیک و زیست‌پزشکی موردتوجه قرار گرفته‌اند[۳]. بااین‌حال، محدودیت‌های ناشی از پراکندگی نامناسب ذرات و عدم همگنی ماتریس باعث کاهش کارایی مکانیکی و حرارتی این مواد می‌شود. در این زمینه، افزودن نانوذرات اکسیدروی و استفاده از روش‌های اصلاح سطحی با گروه‌های سیلانی، آمینی و ترکیبات هیبریدی، توانسته است نقش مهمی در بهبود توزیع ذرات، افزایش چسبندگی بین فازهای مختلف و جلوگیری از گسترش ترک‌ها ایفا کند[۴-۶]. تحقیقات اخیر نشان می‌دهند که درصد وزنی نانوذرات و نوع اصلاح سطح آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد نانوکامپوزیت دارند. به‌عنوان‌مثال، درصدهای پایین نانوذرات اکسیدروی باعث پراکندگی یکنواخت و افزایش مدول کشسانی، مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای شده، درحالی‌که درصدهای بالاتر منجر به تجمع ذرات و کاهش خواص مکانیکی می‌شود[۷]. استفاده از نانوکامپوزیت‌های هیبریدی منجر به اثرات هم‌افزایی شده، خواص مکانیکی، حرارتی، دی‌الکتریک و ضدخوردگی را به‌طور هم‌زمان بهبود می‌بخشد. همچنین، اصلاح سطح با ترکیبات آلی و پلیمرهای عملکردی باعث افزایش پایداری گرمایی، بهبود دمای انتقال شیشه‌ای و مقاومت در برابر تخریب فرابنفش می‌شود[۸].

در این مطالعه، به بررسی تأثیر نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده و هیبریدی بر خواص مکانیکی، حرارتی، ضدخوردگی و عملکرد چندمنظوره نانوکامپوزیت‌های اپوکسی پرداخته شده است. نتایج ارائه‌شده، نشان‌دهنده اهمیت طراحی هوشمندانه نانوکامپوزیت‌ها و کاربرد نانوذرات با اصلاح سطح و هیبریدسازی برای توسعه مواد پیشرفته با عملکرد هم‌زمان در چندین حوزه صنعتی است. در این پژوهش، اثر نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده بر ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد و در ادامه، به پیشرفت‌های اخیر در زمینه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده پرداخته شده، مهم‌ترین نکات و یافته‌ها به‌صورت جامع جمع‌بندی شده‌اند.

۲ ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

مطالعات ریخت‌شناسی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد تا ساختار سطحی و توزیع نانوذرات اکسیدروی در ماتریس اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن بررسی شود (شکل۱). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، نشان‌دهنده توزیع یکنواخت نانوذرات در سراسر ماتریس و در اطراف الیاف کربن هستند که منجر به بهبود چسبندگی بین فازهای مختلف کامپوزیت شده است[۱۰-۹]. همچنین، کاهش حفرات و ترک‌های سطحی در نمونه‌های حاوی مقادیر بیشتر نانوذرات اکسیدروی به‌وضوح مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده بهبود یکپارچگی ساختاری و مقاومت بهتر در برابر تنش‌های مکانیکی است. حضور نانوذرات باعث تغییر مسیر گسترش ترک‌ها شده، در برخی نقاط به عنوان سد مکانیکی عمل می‌کند که این امر موجب افزایش مقاومت کششی و دوام کامپوزیت می‌شود. ازاین‌رو، بررسی ریخت‌شناسی نقش کلیدی نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی و ساختاری کامپوزیت را تأیید می‌کند[۱۱].

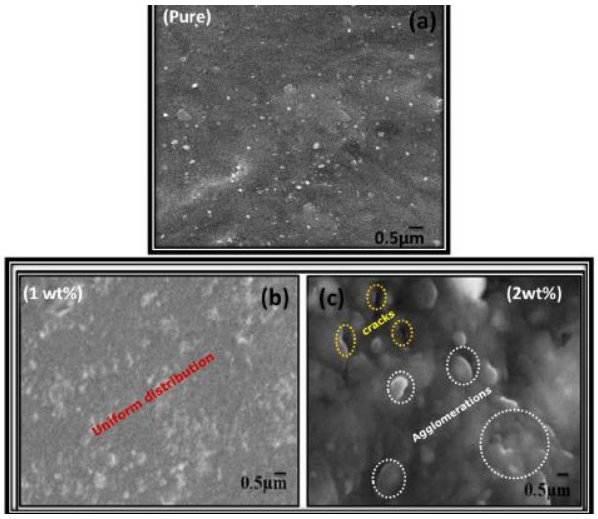


شکل ۱ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت اپوکسی پس از آزمون تنش[۱۱]

Figure 1 SEM image of the epoxy nanocomposite after the tensile test[11]

بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با گروه‌های سیلانی، انجام شد (شکل۲). نتایج نشان داد، رزین اپوکسی دارای سطحی صاف و یکنواخت است که نشانگر ساختار همگن و بدون فاز تقویتی است[۱۲]. با افزودن نانوذرات اکسیدروی در درصدهای وزنی مختلف، تغییرات قابل‌توجهی در ریخت‌شناسی سطحی مشاهده می‌شود. در نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانوذرات، پراکندگی یکنواخت نانوذرات در ماتریس اپوکسی مشاهده می‌شود[۱۳]. این پراکندگی یکنواخت و تعامل قوی بین نانوذرات و ماتریس پلیمری، چسبندگی مناسب در فصل مشترک و عملکرد دوگانه در توقف و جلوگیری از گسترش ترک‌ها مرا فراهم می‌کند. این موضوع نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت دارد[۱۴]. بااین‌حال، در نمونه حاوی ۲ درصد وزنی نانوذرات، افزایش زبری سطح به‌وضوح مشاهده می‌شود که ناشی از توزیع غیریکنواخت و تجمع نانوذرات است. این تجمع باعث کاهش کارایی نانوذرات در تقویت ساختار شده، با کاهش مدول ذخیره در آزمون‌های مکانیکی و تحلیل دینامیکی مکانیکی همراه است. بنابراین، افزایش بیش از حد درصد وزنی نانوذرات می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی به‌دلیل ایجاد نواحی

ضعیف در ساختار نانوکامپوزیت شود[۱۵].



شکل ۲ تصویر آزمون میکروسکوپ الکترونی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی[۱۵]

Figure 2 SEM image of epoxy resin and epoxy nanocomposite[15]

در این مطالعه، پوشش اپوکسی با درصدهای مختلف نانوذرات اکسیدروی تهیه و پس از هفت روز پخت، بررسی شد. نمونه خالص اپوکسی سطحی کاملاً صاف داشت. افزودن ۰/۵ درصد وزنی از نانوذرات اکسیدروی نقاط سفید ریز قابل مشاهده‌ای بر سطح ظاهر کرد. در حدود دو درصد وزنی، توزیع ذرات یکنواخت‌تر شد. اما در بارگذاری بالاتر، تجمع ذرات به‌وضوح دیده شده و سطح پوشش ناهمگن شد[۱۶].

در پژوهشی دیگر، شبکه‌های نانوذرات اکسیدروی که با نانولوله‌های کربنی چند دیواره پوشانده شده و سپس در ماتریس اپوکسی محصور شده‌اند، گزارش شده است. نتایج آزمون ریخت‌شناسی نشان داده که توزیع هیبرید نانوذرات در ماتریس اپوکسی به نسبت یکنواخت است و ساختار نانو و میکرو منظم‌تری نسبت به نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی تنها ارائه می‌دهد. شکست ذرات نانولوله‌های کربنی و تعامل با اپوکسی به همراه نانوذرات اکسیدروی باعث انحراف ترک و توزیع بهتر تنش شده است. در جدول ۱، مهم‌ترین نکات در مورد ریخت‌شناسی و نکات کلیدی، جمع‌آوری شده است[۱۷-۲۰].

۳ اصلاح سطح نانوذرات اکسیدروی

روش‌های اصلاح سطح نانوذرات اکسیدروی در تحقیقات اخیر با هدف بهبود پراکندگی، چسبندگی و خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی توسعه یافته‌اند. اصلاح با گروه‌های آمینی باعث افزایش چسبندگی بین فازها و توزیع یکنواخت ذرات می‌شود و مدول کشسانی و مقاومت کششی را افزایش می‌دهد[۲۱]. اصلاح با گروه‌های سیلانی موجب تشکیل پیوندهای شیمیایی قوی در فصل مشترک ماتریس و نانوذرات شده، پایداری حرارتی و مقاومت مکانیکی را بهبود می‌بخشد. استفاده از پلی‌آنیلین یا دیگر پلیمرهای آلی، پراکندگی بهتر و سطح مؤثر بالاتر ایجاد کرده، خواص مکانیکی و الکتریکی را ارتقا می‌بخشد. طراحی هیبریدی مانند ترکیب نانوذرات اکسیدروی با نانواکسیدگرافن، نانوسیلیکا یا نانوکربن، اثر هم‌افزایی ایجاد کرده، هم‌زمان خواص مکانیکی و حرارتی را بهینه می‌کند[۲۲-۲۳]. اصلاح چندعاملی یا فسفات‌دار نیز پایداری شیمیایی و مقاومت در برابر تخریب حرارتی را افزایش می‌دهد. این روش‌ها مسیر بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌های اپوکسی چندمنظوره را هموار می‌سازند. روش‌های اصلاح سطح نانوذرات اکسیدروی به‌منظور بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی شامل چند رویکرد اصلی است[۲۳-۲۵]. اصلاح با گروه‌های آمینی باعث افزایش چسبندگی بین نانوذرات و ماتریس رزین، توزیع یکنواخت ذرات و جلوگیری از تجمع می‌شود و مقاومت مکانیکی و مدول کشسانی را بهبود می‌بخشد. اصلاح با گروه‌های سیلانی ایجاد پیوند شیمیایی بین نانوذرات و ماتریس را ممکن ساخته، پایداری حرارتی و انتقال بار مؤثر را افزایش می‌دهد[۲۶]. روش‌های اصلاح با پلیمرهای آلی مانند پلی‌آنیلین یا ترکیبات ضد تجمع، پراکندگی ذرات را بهبود داده، سطح فعال نانوذرات را افزایش می‌دهد که به ارتقای خواص مکانیکی و الکتریکی منجر می‌شود. طراحی هیبریدی با ترکیب نانوذرات اکسیدروی و نانواکسیدگرافن، نانوسیلیکا یا نانوکربن اثر تقویت‌کننده هم‌افزایی ایجاد کرده، عملکرد مکانیکی و حرارتی کامپوزیت را هم‌زمان ارتقا می‌دهد. اصلاح چندعاملی یا فسفات‌دار نیز مقاومت در برابر تخریب حرارتی و پایداری شیمیایی نانوکامپوزیت‌ها را افزایش می‌دهد. این روش‌ها به‌طورکلی مسیر توسعه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی چندمنظوره با کارایی بالا را هموار می‌کنند. در جدول ۲، مهم‌ترین نکات در مورد اصلاح سطح نانوذرات و نکات کلیدی، جمع‌آوری شده است[۲۷].

روش‌های اصلاح سطح نانوذرات اکسیدروی متنوع بوده، هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای ویژه خود را دارند. در روش هیدروترمال، نانوذرات در محلول‌های آبی تحت دما و فشار بالا رشد می‌کنند که باعث ایجاد ریخت‌شناسی منظم و افزایش نقاط فعال سطحی می‌شود و چسبندگی به ماتریس پلیمری را بهبود می‌بخشد[۲۸]. سیلان‌زنی با پوشش‌دهی سطح ذرات توسط ترکیبات سیلانی، پراکندگی یکنواخت و چسبندگی قوی به رزین را تضمین کرده، از تجمع ذرات جلوگیری می‌کند. در پلیمری‌شدن سطحی، لایه نازک پلیمری روی نانوذرات شکل می‌گیرد که اتصال مکانیکی و شیمیایی با ماتریس را افزایش داده، مقاومت مکانیکی و حرارتی را ارتقا می‌بخشد[۲۹]. پوشش‌دهی سطحی، ذرات را با مواد معدنی یا آلی می‌پوشاند و خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی را بهینه می‌کند. روش‌های ترکیبی با ادغام دو یا چند فن، پراکندگی ذرات و پایداری حرارتی و مکانیکی را بهبود داده، عملکرد نانوکامپوزیت‌ها را تقویت می‌کنند. پوشش‌دهی شیمیایی با واکنش‌های سطحی، گروه‌های عاملی فعال ایجاد می‌کند که چسبندگی، مقاومت حرارتی و شیمیایی نانوذرات را افزایش می‌دهد[۳۰].

۴ خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی

اثر نانوذرات اصلاح‌شده با گروه‌های سیلانی بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد افزودن یک درصد وزنی نانوذرات اصلاح‌شده با گروه‌های سیلان به رزین اپوکسی باعث افزایش خواص گرمایی و مکانیکی، به‌ویژه مدول ذخیره، می‌شود[۳۱]. این افزایش به‌دلیل چسبندگی قوی و پراکندگی یکنواخت نانوذرات سیلان‌دار با گروه‌های عاملی واکنش‌پذیر در ماتریس اپوکسی است. نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح‌شده با سیلان

خواص مکانیکی بهتری نسبت به نانوکامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح‌نشده دارند. همچنین، افزایش بیش از یک درصد وزنی این نانوذرات باعث کاهش مدول ذخیره می‌شود[۳۲].

جدول ۱ مهم‌ترین نکات در مورد ریخت‌شناسی و نکات کلیدی نانوکامپوزیت اپوکسی[۱۷-۲۰]

Table 1 Key points regarding the morphology and main features of epoxy nanocomposites[17-20]

Key Results	Morphological and Structural Effects	Surface Modification Type of ZnO Nanoparticles
Improvement in tensile strength and thermal stability	Increased adhesion, uniform distribution	Modification with silane groups (ODTES)
Enhanced light absorption and optical properties	Core-shell structure, antibacterial properties	ZnO nanoparticles and silver nanoparticles
Improvement in mechanical properties	Uniform dispersion, better matrix bonding	Modification with polyaniline
Enhanced electrical and mechanical properties	Reduced agglomeration, increased effective surface area	Modification with anti-agglomeration organic compounds
Improved catalytic performance and stability	Integrated nanocrystalline structure	ZnO/Zn_2TiO_4
Improved corrosion resistance and mechanical properties	More uniform distribution, reduced porosity	Chemical surface modification of recycled ZnO
Improved mechanical and thermal resistance	Better adhesion, improved particle distribution	Modification with amino silane
Increased modulus and tensile strength	Reduced agglomeration, enhanced surface stability	Modification with stearic acid
Improved thermal and chemical stability	Increased resistance to thermal degradation	Modification with phosphate compounds
Increased hardness and wear resistance	Improved particle dispersion	Modification with carboxylic acids
Improved mechanical and anti-corrosion properties	Increased matrix-nanoparticle adhesion	Modification with organic polymers
Enhanced durability and mechanical performance	Uniform distribution, increased crack resistance	Modification with amino groups
Improved mechanical and thermal properties	Reduced agglomeration, increased cohesion	Modification with various silanes
Improved magnetic and mechanical properties	Uniform hybrid structure	$ZnO-Fe_3O_4$
Increased strength and electrical properties	Multilayer structure, increased surface area	ZnO with graphene nano-oxid

کاهش خواص مکانیکی به دلیل تجمع نانوذرات و ناهمگنی در ماتریس اپوکسی است که ایجاد حفره می‌کند و حرکت زنجیره‌های پلیمری را افزایش می‌دهد. پس از اتمام فرایند پخت کامل نمونه‌های پوشش‌دهی شده، آن‌ها تحت آزمون‌های مکانیکی شامل سختی پاندولی، مقاومت در برابر خراش و مقاومت ضربه قرار گرفتند. با افزودن ۲ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی به نمونه رزین اپوکسی، خواص مکانیکی نمونه نانوکامپوزیت به‌طور جزئی بهبود یافت. به‌طور مشخص، سختی پاندولی به ۱۴۷ نوسان و مقاومت ضربه به ۱۳۶ پوند بر اینچ مربع در مقایسه با رزین اپوکسی افزایش یافت. سختی و مقاومت به ضربه رزین اپوکسی به ترتیب برابر با ۱۱۸ نوسان و ۱۲۸ پوند بر اینچ مربع است که نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجهی است[۳۳]. همچنین، مقاومت در برابر خراش نمونه تا این میزان افزودن نانوذرات اکسیدروی تقریباً ثابت و برابر با ۹ کیلوگرم باقی ماند. با افزایش درصد نانوذرات اکسیدروی به ۳ درصد وزنی، خواص پوشش‌دهی نمونه نانوکامپوزیت کاهش قابل‌توجهی پیدا کرد. این کاهش خواص مکانیکی به‌دلیل افزایش بیش از حد بارگذاری نانوذرات در ماتریس رزین رخ داده است. در مقادیر پایین‌تر، پراکندگی یکنواخت و مناسب نانوذرات در ماتریس رزین آسان‌تر بوده، تعامل بین پرکننده و ماتریس پلیمر مطلوب است. اما در بارگذاری‌های بالا، تعاملات بین ذرات پرکننده (Filler-Filler) نسبت به تعامل بین پرکننده و پلیمر غالب شده، این امر منجر به کاهش مقاومت مکانیکی نانوکامپوزیت می‌شود[۳۴].

در پژوهشی دیگر، افزودن ۰/۲۵ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با سیلان به ماتریس رزین اپوکسی، موجب افزایش قابل‌توجهی در مدول کشسانی تا ۲/۷ گیگاپاسکال و مقاومت کششی تا ۷۲ مگاپاسکال شد. این بهبود ناشی از تعامل قوی بین سطح اصلاح‌شده نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری بود که پراکندگی بهتر نانوذرات را تسهیل کرد و انتقال تنش در ماتریس را افزایش داد[۳۵].

مطالعه‌ای نشان داد که با افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با گروه‌های آمینو به رزین اپوکسی، مقاومت خمشی نمونه‌ها تا ۱۱۵ مگاپاسکال افزایش یافته، مدول کشسانی به ۲/۹ گیگاپاسکال رسید. این نتایج بیانگر اتصال مؤثر بین نانوذرات و ماتریس رزینی و افزایش سختی و استحکام مکانیکی است[۳۵].

در تحقیق دیگری، نمونه‌های رزین اپوکسی با ۱ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با گروه عاملی آمینی، بهبود قابل‌توجهی در مقاومت کششی (۸۳ مگاپاسکال) و سختی (۸۷ شور) نشان دادند. این افزایش خواص به‌دلیل ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر و کاهش تجمع نانوذرات است که باعث افزایش یکنواختی ماتریس و بهبود عملکرد مکانیکی شد[۳۶].

نمونه‌هایی که ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با ترکیبی از سیلان و آمینو دریافت کردند، مدول کشسانی را تا ۳.۰ گیگاپاسکال و مقاومت ضربه را تا ۱۹ کیلوژول بر متر مربع افزایش دادند. این هیبرید سطح اصلاح‌شده باعث بهبود پراکندگی و توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس رزینی شده است[۳۷].

مطالعه‌ای دیگر گزارش کرده که افزودن ۲ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با پلیمر هیبریدی، سبب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و

سختی نمونه‌های رزین اپوکسی شد. پراکندگی مناسب و ایجاد تعامل قوی بین نانوذرات و ماتریس باعث افزایش مدول کشسانی و مقاومت کششی تا حدود ۹۰ مگاپاسکال شد[۳۸].

در پژوهشی دیگر، ترکیب نانوذرات اکسیدروی نانوسیلیکا به میزان ۰/۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی افزوده شد که منجر به افزایش مدول کشسانی به ۳/۳ گیگاپاسکال و بهبود مقاومت‌های کششی و خمشی شد. این اثر به‌دلیل هم‌افزایی اثرات نانوذرات مختلف و بهبود پیوند بین فازها بود[۳۹].

هیبرید نانوذرات اکسیدروی و اکسیدگرافن در نسبت ۱ درصد وزنی، موجب افزایش مقاومت کششی تا ۹۰ مگاپاسکال و سختی تا ۹۱ شور در رزین اپوکسی شد. این ترکیب هم‌افزایی ساختاری مناسبی بین نانوذرات ایجاد کرده، باعث افزایش انتقال بار و بهبود خواص مکانیکی شده است[۴۰].

در تحقیق دیگری، افزودن ۱/۵ درصد وزنی هیبرید نانوذرات اکسیدروی و نانوکربن به رزین اپوکسی، موجب افزایش قابل‌توجه مدول کشسانی و مقاومت خمشی نمونه‌ها شد. این بهبود به‌دلیل پراکندگی یکنواخت و پیوند قوی بین نانوذرات و ماتریس پلیمری بود[۴۱].

مطالعه‌ای نشان داده که ترکیب ۲ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی هیبریدی با نانوسیلیکا و گروه‌های عاملی آمینی، به افزایش چشمگیر خواص مکانیکی رزین اپوکسی از جمله مقاومت کششی و خمشی می‌انجامد. اصلاح سطح نانوذرات باعث بهبود تعامل فازها و جلوگیری از تجمع نانوذرات شده‌است[۴۲].

در پژوهشی دیگر، افزودن ۰/۷۵ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با گروه عاملی آمینی، به شکل قابل‌توجهی مقاومت کششی و مقاومت ضربه نمونه‌های رزین اپوکسی را افزایش داده، این امر به‌دلیل افزایش تعامل شیمیایی و فیزیکی بین نانوذرات و ماتریس بوده است[۴۳].

مطالعه‌ای نشان داد که افزودن ۱/۲۵ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با سیلان، افزایش یکنواخت مدول کشسانی و مقاومت خمشی را در رزین اپوکسی به دنبال داشته، این نتایج نمایانگر پراکندگی مطلوب نانوذرات و بهبود خواص مکانیکی است[۴۴].

در تحقیق دیگری، هیبرید نانوذرات اکسیدروی و نانوسیلیکا همراه با پلیمر به میزان ۱/۷۵ درصد وزنی به رزین اپوکسی افزوده شد که ارتقای قابل‌توجهی در خواص مکانیکی و سختی نمونه‌ها را در بر داشت. این بهبود به‌دلیل اثر هم‌افزایی بین نانوذرات و ایجاد ساختار شبکه‌ای مقاوم است[۴۵].

مطالعه‌ای ترکیب ۲/۵ درصد وزنی هیبرید نانوذرات اکسیدروی و نانوسیلیکا اصلاح‌شده با گروه عاملی آمینی را بررسی کرد که منجر به افزایش قابل‌توجه مقاومت کششی و خمشی نمونه‌های اپوکسی شد. اصلاح سطح نانوذرات و یکنواختی توزیع باعث بهبود انتقال بار و جلوگیری از شکست زودرس شده است[۳۵].

در پژوهشی دیگر، ترکیب ۱ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با سیلان و به‌صورت هیبریدی، افزایش چشمگیری در مدول کشسانی تا ۳/۵ گیگاپاسکال و مقاومت کششی تا ۹۱ مگاپاسکال رزین اپوکسی را موجب شد. این نتیجه ناشی از پیوند قوی بین فازهای مختلف و پراکندگی یکنواخت نانوذرات است[۳۶].

مطالعه‌ای نشان داد که افزودن نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده و هیبریدی به رزین اپوکسی، باعث بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی از جمله مقاومت کششی، خمشی و ضربه نمونه‌ها شده‌است. بهبودهای حاصل به‌دلیل تعامل شیمیایی بهتر و پراکندگی یکنواخت نانوذرات در ماتریس رزینی است[۳۷].

در نمونه‌های بررسی شده، نانوذرات اکسیدروی با گروه‌های آمینی اصلاح شده‌اند تا چسبندگی و تعامل بهتر با ماتریس رزین اپوکسی فراهم شود. اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های آمینی، شامل گروه‌های عاملی ساده مانند NH_2– و همچنین ترکیبات عملکردی پیشرفته‌تر گروه‌های عاملی آمینی است که باعث بهبود انتقال بار و افزایش خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. تفاوت اصلی بین اصلاح‌شده با «آمینو» و «آمینو عاملی» در نوع و ساختار گروه‌های عاملی است، به‌طوری‌که «آمینو عاملی» طیف گسترده‌تری از گروه‌های عملکردی حاوی آمین را شامل می‌شود که منجر به تعامل قوی‌تر و خواص بهینه‌تر می‌شود. در جدول ۳، مهم‌ترین نکات در مورد خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی و نکات کلیدی، جمع‌آوری شده است[۴۰-۳۸].

۵ پایداری گرمایی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده

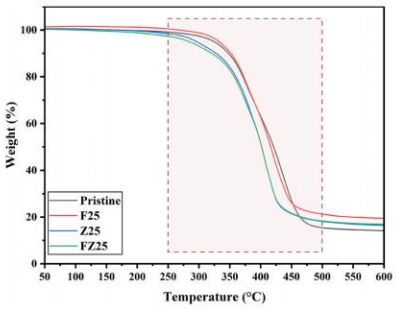
تأثیر افزودن نانوذرات اکسیدروی بر پایداری حرارتی کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمون گرماوزن‌سنجی نشان داد که با افزایش میزان نانوذرات اکسیدروی، دمای تخریب ماده حرارتی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته، مقاومت گرمایی مواد بهبود یافته است[۴۱]. همچنین، تحلیل نمونه‌های اصلاح سطح شده به روش اوزون در مقایسه با نمونه‌های اصلاح‌نشده نشان داد این روش اصلاح سطح منجر به بهبود قابل‌توجهی در مقاومت گرمایی نانوکامپوزیت می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که نانوذرات اکسیدروی به‌عنوان افزودنی پایداری در دماهای بالا عمل می‌کند و می‌تواند نقش مهمی در افزایش عمر نانوکامپوزیت ایفا کند. در نتیجه، افزودن نانوذرات اکسیدروی به کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی الیاف شیشه، راهکار مؤثری برای بهبود خواص گرمایی و افزایش مقاومت گرمایی در برابر تخریب گرمایی در دماهای بالا است[۴۲].

در پژوهشی دیگر، اثر نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات اکسیدروی بر تخریب گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد (شکل۳). نتایج نشان داد که تخریب گرمایی نمونه رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. دمای تخریب گرمایی در حضور نانوذرات اکسید آهن در محدوده دمایی ۲۵۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است و برای دیگر نمونه‌ها در محدوده دمایی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. همچنین همه نمونه‌ها، دارای سازوکار تخریب گرمایی تک‌مرحله‌ای هستند. درصد زغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات آهن، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی و نانوذرات آهن به‌ترتیب برابر با ۸۱/۹۶، ۸۵/۲۲ و ۸۴/۰۶ است[۴۳].

نانوذرات اکسیدروی به‌وسیله گروه‌های سیلانی (تری اتوکسی سیلیل پروپیل آمین)، اصلاح شد و با نمونه نانوذره اصلاح‌نشده مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا دو نوع نانوکامپوزیت اپوکسی ساخته شد و تحلیل تخریب گرمایی انجام شد. نانوذرات اکسیدروی با استفاده از گروه‌های سیلانی (تری‌اتوکسی سیلیل

پروپیل آمین) اصلاح و با نانوذرات اصلاح‌نشده مقایسه شدند[۴۴]. دو نوع نانوکامپوزیت اپوکسی تهیه و تخریب گرمایی آن‌ها تحلیل شد. نتایج نشان داد که اصلاح سطح نانوذرات به روش هیدروترمال پیش از سیلان‌زنی باعث افزایش قابل‌توجه افت وزن در نمودار تخریب گرمایی شد که بیانگر افزایش میزان سیلان پیوندزده‌شده روی سطح نانوذرات است. (اصلاح سطح به روش هیدروترمال پیش از سیلان‌زنی، یعنی مرحله اول، سطح نانوذرات به روش هیدروترمال (مثلاً در حضور آب و حرارت) اصلاح می‌شود، تا گروه‌های هیدروکسیل بیشتری روی سطح ایجاد شود[۴۵]. این گروه‌های هیدروکسیل به‌عنوان نقاط فعال برای پیوندزدن سیلان در مرحله بعدی سیلان‌زنی عمل می‌کنند). این افزایش به‌دلیل ایجاد گروه‌های هیدروکسیل بیشتر در اثر اصلاح سطح هیدروترمال است که نقش نقاط فعال واکنش‌دهنده با سیلان را دارد و منجر به افزایش پیوندهای شیمیایی بین سیلان و سطح نانوذرات می‌شود. تحلیل نواحی دمایی نشان داد افت وزن در بازه دمایی پایین‌تر ناشی از تبخیر رطوبت سطحی و در بازه بالاتر مربوط به تخریب حرارتی سیلان پیوندزده‌شده است. تفاوت واضح در این بازه میان نمونه‌ها، موفقیت اصلاح سطح را نشان می‌دهد. در کل، اصلاح سطح به روش هیدروترمال پیش از سیلان‌زنی، بازده این فرایند را افزایش داده، خواص سطحی و پایداری حرارتی نانوذرات را در ماتریس اپوکسی بهبود می‌بخشد[۴۶].

در بسیاری از کاربردهای دمای بالا، مواد دارای رسانایی حرارتی خوب باید پایداری حرارتی مناسبی نیز داشته باشند، تا عملکرد کلی آن‌ها تحت شرایط گرمایی حفظ شود. ازاین‌رو، بررسی پایداری حرارتی مواد رسانا اهمیت ویژه‌ای دارد. در پژوهشی، سه رزین اپوکسی خالص، کامپوزیت‌های حاوی نانوذرات نقره و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی و نانوذرات نقره بررسی شد. نتایج تحلیل گرمایی نشان داد که وزن نمونه‌ها به‌تدریج با افزایش دما کاهش می‌یابد، اما کاهش وزن به‌صورت ناگهانی رخ می‌دهد که نشان‌دهنده تخریب گرمایی ماده است. دمای شروع تخریب و دمایی که در آن نیمی از وزن ماده ازدست‌رفته به‌عنوان معیارهای اصلی در نظر گرفته شدند. رزین اپوکسی خالص در حدود ۲۷۲ درجه سانتی‌گراد دمای شروع تخریب و در ۳۷۲ درجه دمایی است که نیمی از وزن خود را از دست می‌دهد[۴۷].



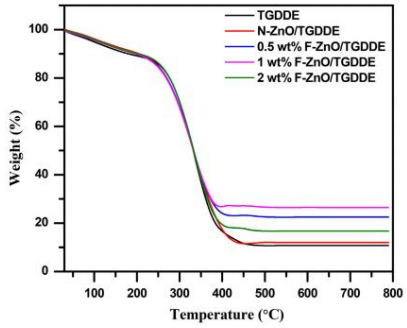
شکل ۳ نمودار گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۴۳]

Figure 3 Thermogravimetric analysis (TGA) curve of epoxy resin and epoxy nanocomposites[43]

افزودن نانوذرات نقره باعث افزایش این دماها به‌ترتیب حدود ۳۰۰ و ۳۷۵ درجه سانتی‌گراد شد و نمونه حاوی نانوذرات نقره با پوشش نانوذرات اکسیدروی بهترین عملکرد را با دماهای شروع تخریب و نیمه‌تخریب به‌ترتیب ۳۲۹ و ۳۸۲ درجه سانتی‌گراد نشان داد. بهبود قابل‌توجه پایداری حرارتی هیبرید نانوکامپوزیت به‌دلیل افزایش پیوند بین پوشش نانوذرات اکسیدروی، بر روی سطح نانوذرات نقره و ماتریس اپوکسی است که انرژی لازم برای تخریب گرمایی را افزایش می‌دهد[۴۸]. همچنین، دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی با افزودن نانوذرات نقره و به‌ویژه نانوذرات نقره پوشش داده شده با نانوذرات اکسیدروی، افزایش می‌یابد که نشانه افزایش پایداری گرمایی و استحکام ساختاری ماده است. به‌طور مشخص، دمای انتقال شیشه‌ای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و هیبرید نانوکامپوزیت اپوکسی به‌ترتیب حدود ۵ و ۸ درجه سانتی‌گراد بالاتر از رزین خالص بودند[۴۹].

پایداری گرمایی و میزان زغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با افزودن نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با ۳ آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان، و نانوذرات اکسیدروی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که افزودن مقادیر کم نانوذرات (۱ درصد وزنی) به شکل قابل‌توجهی دمای شروع تخریب گرمایی و میزان باقی‌مانده کربن را افزایش می‌دهد[۵۰]. به‌عنوان‌مثال، دمای شروع تخریب سامانه پایه برابر با ۲۸۶درجه سانتی‌گراد بود، درحالی‌که افزودن یک درصد نانوذرات اصلاح شده آن را به ۳۳۲درجه سانتی‌گراد افزایش داد. همین روند در میزان زغال باقی‌مانده نیز مشاهده شد که از مقدار ۹ درصد برای سامانه خالص به ۲۶ درصد برای سامانه حاوی یک درصد نانوذرات اصلاح‌شده افزایش یافت. علت این افزایش پایداری گرمایی، ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی بین ماتریس اپوکسی و نانوذرات اصلاح شده و حضور مواد معدنی و غیرفلزی مانند نانوذرات اکسیدروی در شبکه اپوکسی است که موجب کاهش سرعت تخریب و تثبیت ساختار پلیمر می‌شود. همچنین نمودارهای تحلیل حرارتی، نشان دادند که نانوذرات اصلاح شده، مرحله‌ی اول تخریب گرمایی را به تأخیر می‌اندازند و از انتشار سریع مواد فرار جلوگیری می‌کنند[۵۱]. بااین‌حال، افزایش مقدار نانوذرات به ۲ درصد منجر به کاهش دمای تخریب گرمایی و زغال باقی‌مانده شد. این پدیده به‌دلیل تجمع ذرات و کاهش اثر نانوذرات رخ می‌دهد؛ ذرات انباشته‌شده به شکل ناخالصی‌های درشت عمل کرده، نیروهای بین‌مولکولی را کاهش می‌دهند که در نتیجه شبکه‌ای‌شدن اپوکسی ضعیف و پایداری گرمایی کاهش می‌یابد.

به‌طورکلی، نتایج TGA نشان می‌دهند که افزودن نانوذرات FeZnO و N-ZnOتا میزان بهینه (حدود ۱٪ وزنی) موجب بهبود قابل‌توجه پایداری حرارتی و مقاومت در برابر تجزیه حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی می‌شود، اما مقادیر بالاتر اثر مطلوب نانوذرات را کاهش می‌دهد (شکل۴)[۵۲].



شکل ۴ نمودار گرماوزن‌سنجی رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت‌هایاپوکسی [۵۲]

Figure 4 Thermogravimetric analysis (TGA) curves of epoxy resin and epoxy nanocomposites[52]

جدول۲ مهم‌ترین نکات در مورد اصلاح سطح و نکات کلیدی نانوکامپوزیت اپوکسی[۲۷-۳۳]

Table 2 Key points regarding surface modification and main features of epoxy nanocomposites[27-33]

Results	Surface Modification Method	Synthesis Method	Nanoparticle Type
Increased adhesion, uniform distribution, improved mechanical resistance and elastic modulus	Amino groups	Hydrothermal	Zinc oxide nanoparticles
Enhanced chemical bonding with matrix, improved thermal stability and charge transfer	Silane groups	Silanization	Zinc oxide nanoparticles
Better particle dispersion, increased mechanical resistance, and prevention of agglomeration	Amino groups	Hydrothermal	Zinc oxide nanoparticles
Increased active surface area of nanoparticles, improved mechanical and electrical properties	Polyaniline	Surface polymerization	Zinc oxide nanoparticles
Reduced particle agglomeration, uniform distribution, and enhanced mechanical properties	Anti-caking compounds	Surface coating	Zinc oxide nanoparticles
Synergistic effect, increased mechanical strength and thermal stability	Hybrid	Combined method	Graphene nano-oxide and zinc oxide nanoparticles
Uniform distribution, improved tensile strength and elastic modulus	Hybrid	Combined method	Nanosilica and zinc oxide nanoparticles
Improved mechanical properties, flexural strength, and thermal stability	Hybrid	Combined method	Carbon nanoparticles and zinc oxide nanoparticles
Improved particle dispersion, increased hardness and wear resistance	Carboxylic acids	Chemical coating	Zinc oxide nanoparticles
Increased resistance to thermal degradation, improved thermal and chemical stability	Phosphate-based	Chemical coating	Zinc oxide nanoparticles

جدول ۳ مهم‌ترین نکات در مورد خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی و نکات کلیدی نانوکامپوزیت اپوکسی[۴۳-۳۸]

Table 3 Key points regarding the mechanical properties and main features of epoxy nanocomposites[38-43]

Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)	Impact Strength (kJ/m²)	Hardness (Shore)	ZnO Weight Percent (%)	Modification or Hybrid Type	Sample Type
2.4	68	108	14	78	0	-	Pure Epoxy Resin
2.7	72	115	16	81	0.25	Modified with Silane	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
2.9	76	120	18	84	0.5	Modified with Amine	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.1	83	127	20	87	1	Modified with Amino groups	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.0	80	124	19	86	1.5	Modified with Silane and Amine	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.2	86	130	21	88	2	Modified with Hybrid Polymer	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.3	87	133	22	89	0.5	Nanosilica	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.5	90	137	23	91	1	Graphene oxide	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.4	88	135	22	90	1.5	Nanocarbon	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.6	92	140	24	92	2	Nanosilica and Amine	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.0	82	125	20	86	0.75	Modified with Amino groups	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles

3.2	85	128	21	87	1.25	Modified with Silane	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.4	89	133	23	90	1.75	Nanosilica and Polymer	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.3	87	131	22	89	2.5	Nanosilica and Amino groups	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles
3.5	91	138	24	91	1	Modified with Silane and Hybrid	Nanocomposite containing ZnO nanoparticles

۶ پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده

در پژوهشی اثر نانوذرات روی اکسید و نانوذرات اکسید آهن بر خواص نوری رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد که ترکیب نانوذرات اکسیدروی و نانوذرات اکسید آهن در رزین حساس به نور می‌تواند منجر به ساخت کامپوزیت‌های چندکاربردی شود. افزایش درصد وزنی نانوذرات اکسید تا ۵/۷۷ درصد، موجب بهبود چشمگیر عملکرد نوری کاتالیستی (با بازدهی ۲۴/۷۳ درصد) شد، هرچند این افزایش همراه با کاهش اندک خواص مغناطیسی بود. این نتایج بیانگر آن است که تنظیم نسبت نانوذرات در چنین سامانه‌هایی می‌تواند تعادلی میان ویژگی‌های نوری و مغناطیسی ایجاد کرده، مسیر را برای توسعه مواد پیشرفته با کاربردهای هم‌زمان در حوزه‌های زیست‌پزشکی، محیط‌زیست و فناوری‌های نوری هموار کند[۵۳].

در پژوهشی دیگر، مشخص شد که افزودن نانوذرات کروی اکسیدروی به رزین اپوکسی به‌طور قابل‌توجهی خاصیت آب‌گریزی و مقاومت در برابر خوردگی را بهبود می‌بخشد. نانوذرات کروی اکسیدروی که به روش سل-ژل سنتز شدند، با ایجاد تراکم بیشتر در ساختار پوشش، زاویه تماس را در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، افزایش داد و منجر به بهبود خواص سدکنندگی شد. آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان دادند که پوشش اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی، نرخ خوردگی را کاهش داده، مقاومت قطبی‌شدن را ۲۵ برابر افزایش می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که نانوذرات کروی اکسیدروی می‌توانند به‌عنوان افزودنی مؤثر برای تولید پوشش‌های حفاظتی با آب‌گریزی بالا و پایداری الکتروشیمیایی ممتاز به‌کار گرفته شوند[۵۴].

اثر نانوذرات اکسیدروی بر سطح نانوالیاف کربن و گروه‌های آمین فعال، بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد این حضور نانوذرات منجر به کاهش نرخ سایش در مقایسه با پوشش رزین اپوکسی شد. سازوکار این بهبود ناشی از اثر هم‌افزایی مکانیکی حاصل از لایه‌های نانوذرات اکسیدروی و تراکم پیوندهای شیمیایی ناشی از آمین‌دارکردن سطح بود. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب این ذرات با رزین اپوکسی، منجر به ایجاد ساختار زبر می‌شود که در نتیجه استحکام چسبندگی افزایش می‌یابد[۵۵].

پژوهشگران اثر نانوذرات نقره و نانوذرات اکسیدروی را بر خواص الکتریکی رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد این نانوکامپوزیت می‌تواند ویژگی‌های دی‌الکتریک را به‌طور چشمگیری تحت‌تأثیر قرار دهد. نتایج نشان داد که میزان کیفیت پراکنش ذرات نقش کلیدی در بهینه‌سازی رفتار دی‌الکتریک دارد. در نمونه حاوی ۲ درصد وزنی از نانوذرات نقره، بیشترین ثابت دی‌الکتریک و کمترین تلفات را به‌دلیل پراکنش یکنواخت‌تر پرکننده ارائه داد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب بهینه و پراکنش ذرات می‌تواند مسیر توسعه مواد پیشرفته با ویژگی‌های دی‌الکتریک تنظیم‌شده را هموار سازد[۵۶].

اصلاح سطحی نانوذرات اکسیدروی می‌تواند پراکندگی آن‌ها را در ماتریس پلیمری بهبود بخشد. پژوهشگران، نانوذرات اکسیدروی را با استفاده از ایزوپروپیل تری (دی‌اکتیل فسفات) تیتانات اصلاح کردند. نتایج نشان داد اصلاح منجر به تغییراتی در برخی ویژگی‌ها مانند آب‌گریزی، بار سطحی و پایداری حرارتی آن‌ها مشاهده شد. همچنین نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده، نسبت به نمونه نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌نشده، پراکندگی بهتری در رزین اپوکسی داشتند. بنابراین، نانوذرات اصلاح‌شده موجب بهبود خواص مکانیکی، مقاومت شیمیایی، پایداری حرارتی و توانایی ضدخوردگی پوشش رزین اپوکسی شد. مقاومت سایشی و چسبندگی پوشش اپوکسی حاوی ۲ درصد وزنی نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده، به‌ترتیب حدود ۴۰ و ۵۴ درصد افزایش یافت[۵۷].

اثر نانوذرات کربن سیلیس و نانوذرات روی اصلاح‌شده با گروه‌های سیلانی بر ضریب رسانایی گرمایی رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد این غشا بیش از ۵۰ درصد هدایت حرارتی بالاتری نسبت به رزین اپوکسی خالص داشته، زاویه تماس با آب آن ۱۶۰ درجه است که بیانگر مقاومت فوق‌العاده در برابر رطوبت و شرایط محیطی سخت است. با بهره‌گیری از اصلاح سطح با گروه‌های سیلانی، و ایجاد ساختار میکرو و نانو، این روش

ضمن حذف نیاز به فرایندهای پیچیده لایه‌به‌لایه، امکان تولید صنعتی و یکنواختی پوشش را فراهم می‌سازد. این تحقیق نه‌تنها مشکل تعادل بین مدیریت حرارتی و مقاومت محیطی را حل کرده، بلکه راهکاری مقیاس‌پذیر برای فناوری‌های 5G (فناوری‌های 5G به نسل پنجم شبکه‌های موبایل اشاره دارد) است. به‌این‌ترتیب، طراحی هم‌افزایانه مواد و پایداری طولانی‌مدت این کامپوزیت‌ها، معیار جدیدی برای استفاده از مواد چندکارکرده در شرایط عملیاتی چالش‌برانگیز ایجاد می‌کند[۵۸].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی پلی‌آکریلو نیتریل، نانوذرات اکسیدروی و نانوذرات اکسیدگرافن کاهش‌یافته بررسی شد. نتایج نشان داد این پوشش پس از یک روز غوطه‌وری، بیشترین بازدارندگی خوردگی معادل ۹۹/۹۸ درصد را از خود نشان داد. همچنین، داده‌های طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی بیانگر عملکرد ضدخوردگی فوق‌العاده پوشش حتی پس از ۴۵ روز غوطه‌وری بود که در مقایسه با سایر پوشش‌ها برتری آشکاری داشت. این نتایج نشان می‌دهد که نانوکامپوزیت تولید شده، می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر، پایدار و بلندمدت برای محافظت از فولاد نرم در محیط‌های خورنده معرفی شود[۵۹].

پژوهشگران اثر نانوذرات اکسیدروی، الیاف شیشه و اوزون را بر رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت کششی در نمونه‌های حاوی ۲ درصد نانوذرات اکسیدروی تحت مواجهه زیاد با اوزون مشاهده شد که ۱۳/۵ درصد افزایش نسبت به کامپوزیت اصلاح‌نشده دارد و تأثیر هم‌افزایی واضح بین نانوذرات اکسیدروی و اوزون را آشکار می‌کند. تحلیل‌های حرارتی نشان داد که اکسیدروی باعث بهبود پایداری حرارتی و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای می‌شود. همچنین، نتایج طیف‌سنجی، نشان داد که اکسیدروی تغییرات اکسایشی ناشی از اوزون را به‌طور مؤثر کاهش می‌دهد[۶۰].

بررسی ویژگی‌های فرسایش سطحی و پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی انجام شد. تأثیر عواملی مانند میزان پرکننده، ترکیب نانو و ریزپرکننده‌ها و روش سنتز بر عملکرد ماده مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌های فرسایش سطحی طبق استاندارد IEC60112انجام شد. نتایج نشان دادند افزایش میزان نانوذرات اکسیدروی، موجب کاهش چاله‌ها و مسیرهای هدایت پیوسته، بهبود اتصال بین ماتریس اپوکسی و پرکننده‌ها و تأخیر در تخریب گرمایی می‌شود. استفاده از ترکیب نانو و ریزپرکننده‌ها باعث کاهش تحرک رزین، ارتقای پایداری گرمایی نسبت به نمونه‌های تک‌پرکننده شد. این نتایج نشان می‌دهد که بهینه‌سازی میزان و ترکیب پرکننده‌ها و انتخاب روش مناسب سنتز می‌تواند عملکرد الکتریکی و حرارتی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد و آن‌ها را برای کاربردهای صنعتی مقاوم در برابر فرسایش و حرارت مناسب سازد[۶۱].

پژوهشگران، تأثیر ۳-(تری‌متوکسوسیلیل)پروپیل متاکریلات بر پوشش‌های نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی را بررسی کرده‌اند. تحلیل طیف‌سنجی نشان داد که رزین اپوکسی اصلاح‌شده در مقایسه با به رزین اپوکسی معمولی گروه‌های هیدروکسیل و اپوکسی کمتری دارد. پوشش‌های حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده خواص مکانیکی بهتری نسبت به نمونه‌های اصلاح‌نشده داشتند. بنابراین پوشش‌های دوگانه ساختار فشرده‌تر و توزیع بهتری دارند که منجر به عملکرد ضدخوردگی بالاتر آن‌ها شده است[۶۲].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی اپوکسی حاوی الیاف آریکا (الیاف آریکا همان الیاف طبیعی استخراج‌شده از پوسته‌ی خارجی میوه‌ی درخت نخل آریکا هستند.) را تولید کردند و این نانوکامپوزیت با نانوذرات اکسیدروی تقویت شد. بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که افزودن مقادیر مختلف وزنی (۱ و ۲ درصد وزنی) موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. نتایج آزمون‌ها نشان دادند که حضور ۲ درصد وزنی از نانوذرات اکسیدروی، بهترین عملکرد را از نظر استحکام مکانیکی، مقاومت حرارتی و پایداری ساختاری ایجاد می‌کند. از سوی دیگر، نانوکامپوزیت‌های ساخته‌شده، فعالیت ضدباکتریایی قابل‌توجهی از خود نشان دادند. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که سامانه اپوکسی و الیاف آریکا اصلاح‌شده با ۲ درصد وزنی نانوذرات اکسیدروی می‌تواند به‌عنوان ماده‌ای چندمنظوره با کارایی بالا، در گستره وسیعی از کاربردهای صنعتی و زیست‌پزشکی مورداستفاده قرار گیرد[۶۳].

افزودن نانوذرات اکسیدروی به ماتریس اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربن، موجب بهبود قابل‌توجه خواص مکانیکی و حرارتی کامپوزیت‌ها می‌شود (نمونه حاوی ۱۵ گرم نانوذرات اکسیدروی). همچنین با ساخت این نانوکامپوزیت تقویت‌شده، می‌توان چسبندگی بهتر بین الیاف و ماتریس ایجاد کرد که نقش مهمی در بهبود انتقال بار و عملکرد کلی کامپوزیت ایفا می‌کند. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از نانوذرات اکسیدروی نه‌تنها موجب ارتقای کارایی مکانیکی و پایداری حرارتی می‌شود، بلکه می‌تواند مسیر را برای توسعه کاربردهای پیشرفته در صنایع هوافضا، خودروسازی و دیگر حوزه‌های مهندسی هموار سازد[۶۴].اثر افزودن نانوذرات اکسیدروی به رزین اپوکسی، تأثیر چشمگیری بر بهبود خواص مکانیکی، چسبندگی و مقاومت به خوردگی این کامپوزیت‌ها دارد. نانوپرکننده‌های اکسیدروی به‌دلیل ویژگی‌هایی چون غیرسمی بودن، مقاومت در برابر تخریب فرابنفش، خاصیت بازدارندگی خوردگی و سازگاری زیست‌محیطی، گزینه‌ای مناسب برای افزایش دوام پوشش‌های اپوکسی و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگه‌داری محسوب می‌شوند. بررسی روش‌های تهیه، عملکرد مکانیکی و خواص ضدخوردگی این سامانه‌ها نشان داد که امکان بهینه‌سازی خواص با انتخاب صحیح نوع، غلظت و اصلاح سطحی نانوذرات وجود دارد[۶۰].

پژوهشگران، نانوذرات اکسید سریم–زیرکونیوم و اکسیدروی با استفاده از دوپامین اصلاح سطح و به کمک فرایند پرس داغ به ماتریس اپوکسی اضافه کردند. نتایج آزمون گرماوزن‌سنجی نشان داد که اصلاح سطحی با موجب کاهش مقاومت حرارتی ماتریس نشده، بلکه سبب افزایش دمای اولیه و بیشینه تخریب گرمایی شده است. همچنین نانوذرات اصلاح‌شده با دوپامین می‌تواند به‌طور هم‌زمان موجب ارتقای پایداری گرمایی و افزایش کارایی حفاظتی در برابر پرتو UV شود. به‌طورکلی، این پژوهش ثابت می‌کند که استفاده از این نانوکامپوزیت اصلاح‌شده، در کامپوزیت‌های اپوکسی رویکردی کارآمد برای توسعه مواد پیشرفته با پایداری حرارتی بالا و بازده مناسب محافظت در برابر UV است و می‌تواند مسیر کاربردهای گسترده در صنایع پوشش، الکترونیک و بسته‌بندی را هموار سازد[۶۱].

در پژوهشی دیگر، نانوذرات آلومینا و نانوذرات اکسیدروی با گروه‌های تری

آزول تیول اصلاح‌شده، به رزین اپوکسی اضافه شدند تا پوشش‌های ضدخوردگی بر روی فولاد ایجاد شود. نتایج نشان داد که پوشش ساخته‌شده، عملکرد محافظتی برجسته‌ای در برابر خوردگی در آب دریا دارد. مقاومت پوشش نانوکامپوزیت ساخته‌شده بیش از ۳۴ درصد بالاتر از پوشش‌های مشابه و پوشش‌های پلیمری سنتی بود. همچنین حضور هم زمان نانوذرات در ماتریس اپوکسی، منجر به کلوخگی می‌شود و فرایند شروع خوردگی را به تأخیر می‌اندازد. به‌طورکلی، افزودن هیبرید نانوذرات اصلاح‌شده به رزین اپوکسی منجر به ایجاد پوشش محافظ مکانیکی و شیمیایی بسیار مؤثر شد که از تخریب مواد جلوگیری کرده، طول عمر فولاد پوشش‌دار را افزایش می‌دهد. این نانوکامپوزیت نوین، ترکیبی از خواص مکانیکی بالا، مقاومت به خوردگی را ارائه می‌دهد و برای کاربردهای صنعتی در محیط‌های خورنده گزینه‌ای ایده‌آل است[۶۲]. نانوذرات اکسیدروی با استفاده از گلیسیدوکسی‌پروپیل‌تری‌متوکسی‌سیلان اصلاح شدند تا به‌عنوان افزودنی‌های هیبریدی نانوساختار در پوشش‌های اپوکسی حاوی سیلیکون برای بهبود مقاومت در برابر شرایط جوی استفاده شوند. نانوذرات اصلاح‌شده در مقادیر مختلف (۰/۱، ۰/۵ و ۱ وزنی) به ماتریس پوشش اضافه شدند و پوشش‌ها تحت آزمایش شتاب‌یافته شرایط جوی قرار گرفتند و در فواصل زمانی مشخص (۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ ساعت) برای تحلیل‌های بیشتر برداشته شدند. نتایج حاصل نشان داد که افزودن نانوذرات اصلاح‌شده به‌طور مؤثری مقاومت پوشش در برابر شرایط جوی را افزایش می‌دهد؛ به‌طوری که شاخص کربونیل، بهبود شش‌برابری را نشان داد. به‌طورکلی، استفاده از نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده به‌عنوان افزودنی در پوشش‌های اپوکسی-سیلیکون، راهکاری مؤثر برای افزایش مقاومت پوشش‌ها در برابر شرایط جوی و بهبود دوام و عملکرد طولانی‌مدت آن‌ها ارائه می‌دهد[۶۳].

اثر نانوذرات اکسیدروی، اسیدتانیک و بنزوکسازین بر رزین اپوکسی بررسی شد. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از ترکیب پلیمری جدید مبتنی بر اسید تانیک-بنزوکسازین تقویت‌شده با رزین اپوکسی و نانوذرات اکسیدروی، رویکردی مؤثر و پایدار برای بهبود عملکرد ضدخوردگی و مکانیکی پوشش‌ها فراهم می‌آورد. بررسی‌های طیفی، حرارتی، ریزساختاری و الکتروشیمیایی حاکی از آن است که نانوذرات اکسیدروی به‌ویژه در غلظت ۵ درصد وزنی، موجب ایجاد توزیع یکنواخت و مانع مؤثری در برابر عوامل خورنده می‌شوند. نانوکامپوزیت ساخته‌شده، با نرخ خوردگی بسیار پایین (۰/۰۶میلی‌متر در سال) بالاترین کارایی را از خود نشان داد که گواهی بر نقش کلیدی ترکیب بهینه و تعامل میان فاز پلیمری و نانوساختار معدنی است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که این نانوکامپوزیت‌ها، گزینه‌ای نوین و دوستدار محیط زیست برای جایگزینی پوشش‌های متداول در صنایع حساس به خوردگی محسوب می‌شوند[۶۴].

در پژوهشی دیگر، نانولوله‌های هالوزیت و نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با گروه سیلانی، در ماتریس رزین اپوکسی موجب بهبود قابل‌توجه خواص حرارتی و مکانیکی کامپوزیت می‌شود. تحلیل‌های گرمایی، بیانگر افزایش پایداری گرمایی و تغییر دمای انتقال شیشه‌ای در اثر برهم‌کنش فیزیکی بین رزین اپوکسی و فاز تقویت‌کننده بودند. در مجموع، یافته‌ها بیانگر آن است که استفاده از هیبرید نانوذرات می‌تواند بستر مناسبی برای طراحی پوشش‌های دریایی نوین بر پایه اپوکسی با مقاومت مکانیکی و پایداری گرمایی برتر فراهم سازد[۶۵]. پژوهشگران، اثر نانوذرات اکسیدروی و کربیدسیلیس را بر کولار و رزین اپوکسی بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن نانوپرکننده‌های ترکیبی نانوذرات اکسیدروی و کربیدسیلیس به کامپوزیت‌های کولار و اپوکسی، موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، خمشی و برشی بین‌لایه‌ای می‌شود. نتایج آزمایش‌ها بیانگر آن بود که در درصدهای وزنی ۰/۷۵ و ۱ درصد از نانوپرکننده‌ها، بیشترین بهبود در خواص مکانیکی حاصل شد که به توزیع مناسب و هم‌افزایی ایجادشده بین نانوپرکننده‌ها و ماتریس پلیمری نسبت داده می‌شود. این دستاوردها نشان می‌دهد که استفاده از نانوپرکننده‌های چندگانه رویکردی مؤثر در توسعه کامپوزیت‌های پیشرفته با عملکرد مکانیکی بهینه بوده و می‌تواند مسیر جدیدی برای کاربردهای مهندسی با نیاز به استحکام بالا فراهم کند[۶۶].

غشاهای نانوکامپوزیتی ابرآب‌گریز به روش ساده و مقیاس‌پذیر، بدون نیاز به اصلاح‌کننده‌های کم‌انرژی سطحی، رویکردی کارآمد برای جداسازی روغن از آب فراهم می‌کند. نتایج نشان داد غلظت محلول پاششی و نسبت‌های جرمی نانوذرات سیلیکا و نانوذرات اکسیدروی در حضور رزین اپوکسی، تأثیر قابل‌توجهی بر شار نفوذ و بازده جداسازی دارند. علاوه بر این، غشاهای پوشش‌داده‌شده دارای خواص ابرآب‌گریزی برتر، مقاومت شیمیایی عالی، دوام مکانیکی بالا مناسب بودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که غشاهای نانوکامپوزیتی توسعه‌یافته می‌توانند گزینه‌ای بسیار کارآمد و پایدار برای کاربردهای جداسازی در محیط‌های سخت صنعتی باشند[۶۷].

در پژوهشی دیگر، نانوذرات اکسیدکادمیم و اکسیدروی سنتزشده در اختلاط با رزین اپوکسی به‌کمک روش فراصوت، منجر به‌تولید کامپوزیت‌هایی با خواص نیمه‌رسانا شد. این کامپوزیت‌ها در بسامدهای بالا رفتار نیمه‌رسانایی پایدار همراه با حداقل تلفات حرارتی از خود نشان دادند که بیانگر سازوکارهای مؤثر انتقال بار، رسانش و قطبش یونی است[۶۸]. بررسی‌های ساختاری، حرارتی، نوری و مکانیکی نیز گواه بر تعامل بهینه نانوذرات اکسیدکادمیم و اکسیدروی با اپوکسی و بهبود چشمگیر کارایی مکانیکی و بازده حفاظتی در برابر پرتو فرابنفش بود. به‌طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با دارا بودن ترکیبی از خواص نیمه‌رسانایی، مقاومت مکانیکی و پایداری نوری، چشم‌انداز وسیعی برای کاربرد در حوزه‌های الکترونیک، نوری و پوشش‌های حفاظتی پیشرفته فراهم می‌آورند[۶۹-۷۱]. در جدول ۴، مهم‌ترین نکات در پیشرفت‌های اخیر، جمع‌آوری شده است.

۴ نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات اکسیدروی اصلاح شده به ماتریس رزین اپوکسی و استفاده از هیبریدهای نانوکامپوزیتی می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر خواص مکانیکی، گرمایی، ضدخوردگی و سایر ویژگی‌های عملکردی کامپوزیت‌ها داشته باشد. نتایج نشان داد که توزیع یکنواخت نانوذرات اکسیدروی اصلاح سطح شده با گروه‌های سیلانی، آمینی یا پلیمرهای هیبریدی در ماتریس اپوکسی باعث افزایش چسبندگی بین فازهای مختلف، جلوگیری از گسترش ترک‌ها، افزایش مدول کشسانی، مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای و همچنین بهبود سختی می‌شود. تنظیم

درصد وزنی نانوذرات نقش کلیدی در عملکرد نانوکامپوزیت دارد و در درصدهای پایین (۰/۲۵ تا یک درصد وزنی) باعث پراکندگی مناسب و افزایش خواص مکانیکی و گرمایی می‌شوند، درحالی‌که درصدهای بالاتر موجب کلوخه‌ای‌شدن نانوذرات شده، موجب کاهش توزیع یکنواخت نانوذرات در ماتریس و کاستی درخواص مکانیکی می‌شود. استفاده از نانوکامپوزیت‌های هیبریدهای نانوذرات مانند اکسیدروی– اکسیدگرافن، اکسیدروی – کربیدسیلیس و اکسیدکادمیم – اکسیدروی، اثرات هم‌افزایی ایجاد کرده، بهبود هم‌زمان در مقاومت گرمایی، پایداری گرمایی، مقاومت در برابر پرتو فرابنفش، خواص دی‌الکتریک و فعالیت ضدخوردگی فراهم می‌کند. همچنین، نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده با پلیمرهای عملکردی یا گروه‌های عاملی پیشرفته نشان دادند که می‌توانند مقاومت حرارتی و دمای انتقال شیشه‌ای رزین اپوکسی را افزایش دهند، نرخ تخریب گرمایی را به تأخیر اندازند و در شرایط محیطی سخت، از جمله در حضور اوزون یا در کاربردهای دریایی، دوام بیشتری ارائه کنند. پوشش‌های ابرآب‌گریز و مقاوم در برابر فرسایش، به‌ویژه در ترکیب با نانوذرات سیلیکا یا هیبریدهای نانوذرات اکسیدروی، کاربرد موفقی در جداسازی روغن از آب و حفاظت از سطوح در محیط‌های صنعتی سخت دارند. در نهایت، نتایج این مطالعات نشان داده طراحی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با استفاده از نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده و هیبریدی، نه‌تنها خواص مکانیکی و گرمایی را بهبود می‌بخشد، بلکه توانمندی بالایی در زمینه‌های ضدخوردگی، مقاومت در برابر پرتو فرابنفش، هدایت حرارتی، عملکرد الکتریکی و کاربردهای چندمنظوره در صنایع الکترونیک، نوری، دریایی، زیست‌پزشکی و هوافضا ایجاد می‌کند. بنابراین، این رویکرد مسیری مؤثر و مقیاس‌پذیر برای توسعه مواد پیشرفته و نانوکامپوزیت‌های چندکارکرده فراهم می‌آورد.

جدول۴ مهم‌ترین نکات در پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات اکسیدروی اصلاح‌شده[۶۹-۷۱]

Table 4 Key points on recent advances in epoxy nanocomposites containing surface-modified zinc oxide nanoparticles[69-71]

Sample Name	Year	Key Results
Epoxy Resin – Iron Oxide Nanoparticles – Zinc Oxide Nanoparticles	2025	Improved optical and magnetic properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles	2025	Increased anti-corrosion properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles – Carbon Fibers	2025	Increased anti-corrosion properties and increased adhesion
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles – Silver Nanoparticles	2025	Improved dielectric properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles - Isopropyl tri(dioctyl phosphate) titanate	2025	Improved mechanical properties and adhesion
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles – Silicon Carbide Nanoparticles - Silane groups	2025	Fifth-generation telecommunications
Epoxy Resin - Polyacrylonitrile - Zinc Oxide Nanoparticles - Reduced Graphene Oxide Nanoparticles	2025	Improved anti-corrosion properties
Epoxy Resin - Glass Fibers – Zinc Oxide Nanoparticles - Ozone	2025	Increased mechanical properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles	2024	Improved thermal degradation
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles - 3-(Trimethoxysilyl)propyl methacrylate	2024	Increased anti-corrosion properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles– Areca Fibers	2024	Improved mechanical properties and thermal stability
Epoxy Resin - Carbon Fibers - Zinc Oxide Nanoparticles	2024	Improved mechanical properties and thermal stability
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles	2024	Improved anti-corrosion properties - Protective coatings against UV radiation
Epoxy Resin – Alumina Nanoparticles - Zinc Oxide Nanoparticles– Triazole Thiol	2024	Improved anti-corrosion properties

Epoxy Resin – Silicone - Zinc Oxide Nanoparticles - Glycidoxypropyltrimethoxysilane	2022	Improved performance in atmospheric conditions
Zinc Oxide Nanoparticles - Tannic Acid - Benzoxazine - Epoxy Resin	2025	Improved anti-corrosion properties
Epoxy - Zinc Oxide Nanoparticles - Halloysite Nanoparticles	2025	Design of novel marine coatings based on epoxy with mechanical strength and thermal stability
Epoxy - Kevlar - Zinc Oxide Nanoparticles – Silicon Carbide	2024	Increased mechanical properties
Zinc Oxide Nanoparticles - Silica Nanoparticles - Epoxy Resin	2023	Excellent chemical resistance, high mechanical durability (applications in separation in harsh industrial environments)
Epoxy Resin - Cadmium Oxide - Zinc Oxide Nanoparticles	2024	Applications in electronics, optics, and protective coatings
Epoxy Resin – Polydopamine - Boron Nitride - Zinc Oxide Nanoparticles	2024	Durable anti-corrosion coating
Epoxy Resin - Graphene Oxide Nanoparticles - Zinc Oxide Nanoparticles - Polydopamine	2024	Anti-corrosion and antibacterial properties
Epoxy Resin - Zinc Oxide Nanoparticles - Polyvinyl Chloride	2024	Desalination efficiency, energy stability, and economic savings
Epoxy Resin - Ammonium Polyphosphate - Copper Oxide – Zinc Oxide	2024	Fire-resistant coatings and advanced thermal insulators
Epoxy Resin - Zinc Oxide - Nickel Oxide	2024	Anti-corrosion coating for steel
Epoxy Resin – Basalt Fibers – Zinc Oxide Nanoparticles - Polydopamine	2024	Improved mechanical properties of composites

مراجع

[1] Karami, M. H., Kalaee, M. R. 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, (2022). (In Persian).

[2] Mehdizadeh, H., & Moradi, G. R. 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, 2024, (In Persian).

[3] Abbasi, H., Hashemizadeh, A., Navaie, F. 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, 2023, (In Persian).

[4] Mousavi, S. A., Khademzadeh Yeganeh, J. 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, 2023, (In Persian).

[5] Masoudi, M., Salem, S. 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, 2025, (In Persian).

[6] Karami, M. H., Moeini Jazni, O., & Bagheri, A. 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, 2025.

[7] Saputri, D. D., Saraswati, T. E., Raharjo, W. W., & Anggoro, P. A. Reinforcement of epoxy resin-polyimide composites using magnetic-carbon nanofiber and titanium dioxide as hybrid filler for electromagnetic interference shielding material. *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, *28*(5), 1012–1031, 2024.

[8] Bai, G., Niu, C., Lang, L., Liang, X., Gu, W., Wei, Z., Chen, K., Bohinc, K., & Guo, X. In-situ formation of dual-gradient hydrogels through microfluidic mixing and co-extrusion for constructing an engineered antibacterial platform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *187*, 108497, 2024.

[9] Klinthoopthamrong, N., Thanawan, S., Schrodj, G., Mougin, K., Goh, K.-L., & Amornsakchai, T. (2023). Synergistic toughening of epoxy composite with cellulose nanofiber and continuous pineapple leaf fiber as sustainable reinforcements. *Nanomaterials*, *13*, 1703, 2023.

[10] Gharieh, A., Sharifian, A., & Dadkhah, S. Enhanced long-term corrosion resistance and self-healing of epoxy coating with HQ-Zn-PA nanocomposite. *Scientific Reports*, *15*, 8154, 2025.

[11] Zhang, L., Yang, D., Li, Z., Zhai, Z., Li, X., de La Vega, J., & Wang, D.-Y. Ultrafine iron oxide decorated mesoporous carbon nanotubes as highly efficient flame retardant in epoxy nanocomposites via catalytic charring effect. *Sustainable Materials and Technologies*, *39*, e00845, 2024.

[12] Ali, Z., Yaqoob, S., & D'Amore, A. (2024). Impact of dispersion methods on mechanical properties of carbon nanotube (CNT)/iron oxide (Fe_3O_4)/epoxy composites. *Journal of Carbon Research*, *10*(3), 66, 2024.

[13] Klinthoopthamrong, N., Thanawan, S., Schrodj, G., Mougin, K., Goh, K. L., & Amornsakchai, T. (2023). Synergistic toughening of epoxy composite with cellulose nanofiber and continuous pineapple leaf fiber as sustainable reinforcements. *Nanomaterials*, 13, 1703, 2023.

[14] Shariatmadar, M., Gholamhosseini, P., Abdorrezaee, Z., Ghorbanzadeh, S., Feizollahi, S., Hosseini, F. S., Azad Shahraki, F., & Mahdavian, M. Leveraging polyaniline-grafted micaceous iron oxide as a dual active-barrier pigment for anti-corrosion polymer coatings. *Surface and Coatings Technology*, *479*, 130501, 2024.

[15] Zhong, F., Yang, X., Chen, C., Wang, M., Wang, B., Xia, H., & Song, J. Cobalt-doped iron-based Prussian blue analogue cubes anchored to phosphorus-nitrogen-covered BN surfaces for enhancing the flame retardancy of epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, *198*, 2025.

[16] Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. Thermal and mechanical characterization of alumina modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, *30*, 2022.

[17] Khalil, M. M., Gouda, M. M., & Abbas, M. I. Impact of nano-Fe_2O_3 on radiation parameters of epoxy reinforced with nano carbon. *Scientific Reports*, *14*, 21940, 2024.

[18] Wang, B., Zhang, C., Huang, B., Wang, H., Miao, X., & Deng, W. A facile dip-coating approach to prepare robust superhydrophobic fabric modified by γ-Fe_2O_3/epoxy resin/lauric acid for oil/water separation, lossless water transportation, and flame retardancy. *Surfaces and Interfaces*, *45*, 103896, 2024.

[19] Sengottaiyan, S., Subbarayan, S., Natarajan, R., & Gurunathan, V. Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2025.

[20] Wei, Z., Guan, J., Yan, L., & Niu, G. The role of nano-Fe_2O_3 crystal structure on the thermal stability, flame retardancy, and smoke suppression of intumescent flame-retarded epoxy resins. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, *31*(1), 59–70, 2024.

[21] Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. Thermal and mechanical characterization of alumina modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, *30*, 2022.

[22] Khalil, N. Z., Johanne, M. F., & Ishak, M. Influence of Al_2O_3 nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, *172*, 9–15, 2019.

[23] Nur Zalikha Khalil, Mohamed Feisal Johanne, Mahadzir Ishak, Influence of Al_2O_3 nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive, *Composites Part B: Engineering*, *172*, 9-15, 2019.

[24] Maghsoudian, S., Salimi, A., & Mirzataheri, M. The effect of nanoalumina silanisation in tetraglycidylether epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *92*, 119–124, 2019.

[25] Sari, N. H., Suteja, S., Pruncu, C. I., Setyawan, I., Ilyas, R. A., & Lamberti, L. Physicomechanical, water absorption and thermal properties and morphology of *Paederia foetida* fiber–Al_2O_3 powder hybrid-reinforced epoxy composites. *Polymer International*, *73*(7), 573–585, 2024.

[26] Zhang, X., Huang, Y., Gao, H., Luo, X., Liang, Z., & Tontiwachwuthikul, P. Zeolite catalyst-aided tri-solvent blend amine regeneration: An alternative pathway to reduce the energy consumption in amine-based CO_2 capture process., Applied Energy, *240*, 827-841, 2019.

[27] Shikha, D., Kamani, P. K., & Shukla, M. C. Studies on synthesis of water-borne epoxy ester based on RBO fatty acids. Progress in Organic Coatings, 47 (2), 87-94, 2003.

[28] Khaleel, N. A., Salih, R. M., & Musa, B. H. Effect of nano powders on the surface and adhesion properties of epoxy and polyester-based polymeric coatings. *Journal of Elastomers & Plastics*, Advance online publication, Vol???, page???, 2025.

[29] Yang, K. R., Dai, J. Y., Wang, S. P., & Others. Bio-based epoxy composites demonstrating high temperature breakdown strength and thermal conductivity for high voltage insulation. *Chinese Journal of Polymer Science*, *43*, 40–52, 2025.

[30] Mao, D., Chen, J., Ren, L., Zhang, K., Yuen, M. M. F., Zeng, X., Sun, R., Xu, J.-B., & Wong, C.-P. Spherical core-shell Al@Al_2O_3 filled epoxy resin composites as high-performance thermal interface materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *123*, 260–269, 2019.

[31] Aghamohammadi, H., Amousa, N., & Eslami-Farsani, R. Recent advances in developing the MXene/polymer nanocomposites with multiple properties: A review study. *Synthetic Metals*, 273, 116695, 2021.

[32] Paraskar, P., Bari, P., & Mishra, S. Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Irannian Polymer Journal*, *29*(1), 47–55, 2020.

[33] Peng, C., Yu, Z., Liao, K., Li, K., Chen, J., Chen, Y., & Han, Y. Robust, photothermal superhydrophobic epoxy anti-corrosion coating based on micro nano structured Al_2O_3-TiN. *Chemical Engineering Science*, *315*, 121843, 2025.

[34] Saravanakumar, S., Sathiyamurthy, S., Vinoth, V. et al. Effect of alumina on epoxy composites with banana fiber: Mechanical, water resistance and degradation property analysis. *Fibers Polym, 25*, 275–287, 2024.

[35] Cho, J., Jang, E., Kim, J., Kim, M., Su, P.-C., & Kim, J. Development of boron nitride hydroxide/aluminum oxide/epoxy resin spheres and graphene oxide-loaded L-ascorbic acid aerogel for enhanced thermal conductivity and insulation via hot-pressing. *Polymers for Advanced Technologies*, *36*(2), e70120, 2025.

[36] Arunachalam, S. J., Saravanan, R., Othman, N. A., Thanikodi, S., Giri, J., Azizi, M., & Saidani, T. Artificial intelligence-driven prediction and optimization of tensile and impact strength in natural fiber/aluminum oxide polymer nanocomposites. *Engineering Reports* , 2025.

[37] Trinh, B. M., & Mekonnen, T. Hydrophobic esterification of cellulose nanocrystals for epoxy reinforcement. *Polymer*, 155, 64-74, 2018.

[38] Zhou, Y., Tian, X., Cao, X., Wang, Q., Wang, J., Xu, Y., Luo, M., & Wang, Z. Enhanced thermal conductivity and electrical insulation properties of liquid crystalline epoxy composites by using optimized alumina hybrid fillers. *Materials Today Physics*, *54*, 101719, 2025.

[39] Zhang, Y., & Ke, L. Application effect of nano modified epoxy resin adhesive materials in the repair of cracks in building concrete. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, *18*(1–2), 2025.

[40] Nipu, S. M. A., Rahman, M. Z., Alam, S. S., & Dev, B. Mechanical, thermal and morphological characterization of graphene/Al_2O_3-reinforced epoxy hybrid nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, *309*(12), 2400180, 2024.

[41] Goyat, M. S. Epoxy-Al_2O_3 nanocomposites with enhanced Tg and thermal stability. RW *Materials*, *2*(1), 71–82, 2024.

[42] Biswal, M. K., Kuila, C., Maji, A., et al. Thermal and mechanical behavior of APTES-modified Al_2O_3-embedded unidirectional carbon fiber/epoxy composites: An experimental and statistical approach. *Journal of Materials Engineering and Performance* , 2024.

[43] Karthik, A., Surendhiran, S., Savitha, S., Jagan, K. S. G., Vidaarth, T. M. N., Senthilmurugan, R., & Cheran, V. Oleic acid tailored Al_2O_3-ZrO_2/epoxy resin coating with enhanced wettability, mechanical property, and controlled surface

enhanced flame retardancy. *Journal of Colloid and Interface Science, 672*, 465–476, 2024.

[59] Mahtar, M. A., Kinloch, I. A., & Bissett, M. A. High-performance hybrid glass fibre epoxy composites reinforced with amine functionalised graphene oxide for structural applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 185*, 108265, 2024.

[60] Chowdhury, H., Saha, A., Hasan, M., & Haider, J. Effects of alkaline and carboxylated graphene oxide (CGO) treatment on mechanical, thermal, and electrical properties of jute fiber-reinforced epoxy composites. *Journal of Composites Science, 9*(3), 104, 2025.

[61] Kabeb, S. M. Environmentally benign high-performance composites-based hybrid microcrystalline cellulose/graphene oxide. *Polymer Advanced Technology, 35*(10), e6610, 2024.

[62] An, J., Zhang, Y., Zhang, X., He, M., Zhou, J., Zhou, J., Liu, Y., Chen, X., Hu, Y., Song, X., Chen, J., Wu, T., Kang, J., & Xie, Z. Structure and properties of epoxy resin/graphene oxide composites prepared from silicon dioxide-modified graphene oxide. *ACS Omega, 9*(15), 17577–17591, 2024.

[63] Liu, S., Zhang, J., Fan, X., Hu, L., Guan, J., & Zeng, S. Enhanced mechanical, thermal properties and thermal conductivities of epoxy composites via incorporating graphene oxide-grafted carbon nanotubes hybrids. *Polymer Composites, 45*(17), 15637–15648, 2024.

[64] Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N., et al. Thermal decomposition of CNTs and graphene-reinforced glass fibers/epoxy and their kinetics. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14*, 869–889, 2024.

[65] Si, A., Zhang, Y., Liu, Y., Jiang, Z., Li, C., Zhang, J., Huang, X., & Gong, C. Structural design in reduced graphene oxide (RGO) metacomposites for enhanced microwave absorption in wide temperature spectrum. *Journal of Materials Science & Technology, 206*, 211–220, 2025.

[66] Ping, T., Pan, X., Tang, E., Yuan, M., Xing, X., Chu, X., Liu, S., Li, H., & Cui, J. Enhancing antistatic property of epoxy resin coatings via formation of conductive networks with fibrous polyaniline/reduced graphene oxide. *Construction and Building Materials, 478*, 141191, 2025.

[67] Solodov, A. N., Balkaev, D. A., Shayimova, J. R., Vakhitov, I. R., Gataullina, R. M., Zagidullin, A. A., Zharkov, D. K., Leontyev, A. V., Shmelev, A. G., Nurtdinova, L. A., Nikiforov, V. G., Amirova, L. M., Drobyshev, S. V., Saifina, A. F., Gubaidullin, A. T., Zhuravleva, Y. I., & Amirov, R. R. Enhanced wear resistance and mechanical properties of epoxy nanocomposites through surface-concentrated magnetic and luminescent graphene oxide. *Tribology International, 204*, 110504, 2025.

[68] Ghanbari, R., & Zare, E. N. Engineered MXene-polymer composites for water remediation: Promises, challenges and future perspective. *Coordination Chemistry Reviews*, *518*, 216089, 2024.

[69] Singh, P., Sharma, S., Kumar, K., et al. A comparative study on mechanical properties of yttrium oxide and reduced graphene oxide reinforced epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Engineering and Performance, 34*, 3706–3716, 2025.

[70] Yuan, M., Zhang, Y., Xie, F., Yang, H., Bittencourt, C., Snyders, R., & Li, W. Nano copper-modified GO and CNTs for enhanced the epoxy resin composite thermal properties. *Applied Surface Science, 690*, 162616, 2025.

[71] Song, P., Cai, Z., Li, J., He, M., Qiu, H., Ren, F., Zhang, Y., Guo, H., & Ren, P. Construction of rGO-MXene@FeNi/epoxy composites with regular honeycomb structures for high-efficiency electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Science & Technology, 217*, 311–320, 2025

porosity for anticorrosion applications. *Ceramics International*, 2025.

[44] Shin, D. I., Lee, J., Kim, C., et al. Reduced interfacial thermal resistance in acidic alumina-filled adhesives for heat dissipative applications. *Macromolecular Research*, *32*, 885–895, 2024.

[45] Khorin, P. A., Chernykh, A. V., Shumigai, V. S., Dzyuba, A. P., Khonina, S. N., & Petrov, N. V. Self-interference defocusing multichannel diffractive optical element for neural-networks-assisted aberration recognition. Optics and Lasers in Engineering, *199*, 109551, 2026.

[46] Wu, X., Liu, W., Yang, L., & Zhang, C. Construction of alumina framework with a sponge template toward highly thermally conductive epoxy composites. *Polymer Engineering & Science*, *64*(4), 1812–1821, 2024.

[47] Guven, C., Kisa, M., Demircan, G., Ozen, M., & Kirar, E. Effect of seawater aging on mechanical, buckling, structural, and thermal properties of nano Al_2O_3 and TiO_2-doped glass-epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, *45*(8), 7376–7390, 2024.

[48] Simunin, M. M., Voronin, A. S., Fadeev, Y. V., Dobrosmyslov, S. S., Kuular, A. A., Shalygina, T. A., Shabanova, K. A., Chirkov, D. Y., Voronina, S. Y., & Khartov, S. V. Influence of the addition of alumina nanofibers on the strength of epoxy resins. *Materials*, *16*(4), 1343, 2023.

[49] Hou, Y., Chu, F., Qiu, S., Guo, W., Zhang, S., Xu, Z., & Hu, Y. (2020). Construction of graphite oxide modified black phosphorus through covalent linkage: An efficient strategy for smoke toxicity and fire hazard suppression of epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, e49405, 2020.

[50] Pandey, J. C., & Singh, M. Evidences of interphase formation and concomitant change in the dielectric properties of epoxy-alumina nanocomposites. *Polymer Testing*, *91*, 106802, 2020.

[51] Paraskar, P., Bari, P., & Mishra, S. Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iran Polym J, 29, 47–55, 2019.*

[52] Jayan, J. S., Saritha, A., Deeraj, B. D. S., & Joseph, K. Graphene oxide as a prospective graft in polyethylene glycol for enhancing the toughness of epoxy nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*, 2020.

[53] Ma, L., Wang, X., Wang, J., et al. Graphene oxide–cerium oxide hybrids for enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of epoxy coatings. *Journal of Materials Science, 56*, 10108–10123, 2021.

[54] Mirzapour, M., Cousin, P., Robert, M., & Benmokrane, B. Dispersion characteristics, mechanical, thermal stability, and durability properties of epoxy nanocomposites reinforced with carbon nanotubes, graphene, or graphene oxide. *Polymers, 16*(13), 1836, 2024.

[55] Garg, A., Basu, S., Mehta, R., & Mahajan, R. L. Enhancing the mechanical performance of E-glass fiber epoxy composites using coal-derived graphene oxide. *Polymer Composites, 45*(3), 2444–2461, 2023.

[56] Xue, G., Xing, J., Sun, M., Zhang, X., Liu, C., Xue, S., Yuan, Z., & Zhang, B. In situ exfoliation and surface functionalization of graphene oxide for epoxy composites with improved thermal and mechanical properties. *Polymer Composites, 45*(2), 1826–1838, 2024.

[57] Hu, P., Alizadeh, A., Jasim, D. J., Nasajpour-Esfahani, N., Shamsborhan, M., & Sabetvand, R. The effect of graphene oxide nanosheet size and initial temperature on the mechanical and thermal properties of epoxy/graphene oxide structure using molecular dynamics simulation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids, 184*, 111713, 2024.

[58] Li, H., Liu, C., Zhu, J., Huan, X., Xu, K., Geng, H., Chen, X., Li, T., Deng, D., Ding, W., Zu, L., Ge, L., Jia, X., & Yang, X. Intrinsically reactive hyperbranched interface governs graphene oxide dispersion and crosslinking in epoxy for