

آنالیز نانو کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با نانو ذرات آلومینیوم اکساید اصلاح شده: پیشرفت های جدید در مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

محمد حسین کرمی^{۱*}، امید معینی جزنی^{۲*}، محمد علی اطمینانی اصفهانی^۳

^۱ پژوهشگر پسا دکترا و دستیار تحقیقاتی، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی ۷۳۴۴۱-۸۱۷۴۶، اصفهان، ایران

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

^۳ استادیار، مهندسی پلیمر، گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

نانو کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با نانوذرات آلومینیوم اکساید اصلاح شده (آلومینا)، به ویژه در ترکیب با الیاف طبیعی اصلاح شده، به عنوان روشی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و ساختاری شناخته می شوند. اصلاح سطح نانوذرات و الیاف با استفاده از عوامل شیمیایی نظیر سیلان، ایندول و هیدروکسید سدیم موجب افزایش چسبندگی بین ماتریس و الیاف، توزیع یکنواخت ذرات و کاهش تخلخل می شود، که در نهایت منجر به ارتقاء استحکام کششی، مقاومت ضربه ای، سختی سطح و پایداری حرارتی کامپوزیت ها می گردد. همچنین، حضور نانوذرات آلومینا حرکت زنجیره های پلیمری را محدود و تخریب حرارتی را به تأخیر می اندازد، که این امر موجب افزایش دمای تخریب و بهبود دوام ساختاری در شرایط محیطی سخت می شود. نتایج پژوهش ها نشان می دهد که به کارگیری بهینه نانوذرات آلومینا در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد وزنی، علاوه بر ارتقاء خواص مکانیکی و حرارتی، مقاومت قابل توجهی در برابر خوردگی و سایش ایجاد می کند. بنابراین، ترکیب نانوذرات آلومینای اصلاح شده با الیاف طبیعی، همراه با بهینه سازی پارامترهای فرمولاسیون و فرایند ساخت، روشی کارآمد، پایدار و اقتصادی برای توسعه کامپوزیت های پیشرفته با عملکرد چندگانه در صنایع مختلف محسوب می شود. در این پژوهش، اثر نانوذرات آلومینای اصلاح شده بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رفتار تخریب گرمایی نانو کامپوزیت های اپوکسی به طور جامع بررسی شده و پیشرفت های اخیر در این زمینه تحلیل و جمع بندی شده اند.

کلید واژه: رزین اپوکسی، نانو ذرات آلومینا اصلاح شده، مورفولوژی، خواص مکانیکی، تخریب گرمایی.

*

رایانامه نویسندگان مسئول مکاتبات:

(karami.polymerpostdoc@gmail.com and mh.karami@eng.ui.ac.ir), and o.moini@eng.ui.ac.ir.

Analysis of Epoxy Nanocomposites Reinforced with Modified Aluminum Oxide Nanoparticles: Recent Advances in Morphology, Mechanical Properties, Thermal Stability, and Thermal Degradation Behavior

Mohammad Hossein Karami^{1†}, Omid Moini Jazani^{2*}, Mohammad Ali Etminani Isfahane³

¹Postdoctoral Researcher and Research Assistant, Polymer Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran.

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

³ Assistant Professor, Polymer Engineering, Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University(TVU), Tehran, Iran.

Abstract

Epoxy nanocomposites reinforced with surface-modified aluminum oxide (alumina) nanoparticles, particularly in combination with chemically treated natural fibers, have emerged as an effective approach to enhance the mechanical, thermal, and structural properties of these materials. Surface modification of nanoparticles and fibers using chemical agents such as silane, indole, and sodium hydroxide improves interfacial adhesion, ensures uniform particle dispersion, and reduces porosity, ultimately leading to increased tensile strength, impact resistance, surface hardness, and thermal stability of the composites. Additionally, the presence of alumina nanoparticles restricts polymer chain mobility and delays thermal degradation, resulting in higher decomposition temperatures and improved structural durability under harsh environmental conditions. Studies indicate that optimal loading of alumina nanoparticles in the range of 5–15 wt.% not only enhances mechanical and thermal properties but also provides significant resistance against corrosion and wear. Therefore, the combination of surface-modified alumina nanoparticles with natural fibers, alongside optimization of formulation parameters and processing conditions, represents an efficient, sustainable, and cost-effective strategy for developing advanced multifunctional composites for various industrial applications. In this study, the effects of surface-modified alumina nanoparticles on the morphology, mechanical properties, thermal stability, and thermal degradation behavior of epoxy nanocomposites are comprehensively investigated, and recent advancements in this field are critically reviewed and summarized.

Keywords: Epoxy Resin, Modified Aluminum Oxide Nanoparticles, Morphology, Mechanical properties, Thermal Degradation.

†and* Corresponding author's email:

(karami.polymerpostdoc@gmail.com and mh.karami@eng.ui.ac.ir), and o.moini@eng.ui.ac.ir.

۱- مقدمه

نانوکامپوزیت‌های پلیمری به ویژه آن‌هایی که بر پایه رزین اپوکسی ساخته می‌شوند به دلیل برخورداری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطلوب از جمله استحکام بالا مدول یانگ مناسب مقاومت حرارتی خوب و قابلیت پردازش آسان جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای صنعتی یافته‌اند [۱]. افزودن نانوذرات به ویژه نانوذرات آلومینیوم اکساید یا آلومینا به این سیستم‌ها راهکاری مؤثر برای ارتقاء مورفولوژی ساختاری خواص مکانیکی پایداری حرارتی مقاومت در برابر تخریب گرمایی و بهبود خواص سطحی محسوب می‌شود [۲] با این حال دستیابی به پراکندگی یکنواخت نانوذرات و برهم‌کنش مؤثر میان ذرات و ماتریس پلیمری مستلزم اصلاح سطح نانوذرات با عوامل شیمیایی مانند سیلان‌ها یا هیدروکسیدها است که این امر موجب افزایش اتصال بین نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری و کاهش تجمع ذرات می‌شود [۳]. نانوذرات آلومینای اصلاح‌شده با ایجاد پیوندهای شیمیایی قوی‌تر با ماتریس اپوکسی قادر به بهبود خواص مکانیکی کلیدی نظیر استحکام کششی مدول الاستیک و مقاومت ضربه‌ای هستند همچنین اصلاح سطحی موجب افزایش پایداری حرارتی و مقاومت در برابر تخریب گرمایی کامپوزیت می‌شود و اثرات مثبتی بر ریزساختار ماتریس دارد [۴]. تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات آلومینا می‌تواند باعث کاهش تخلخل و ایجاد ساختارهای نانومقیاس پایدار در ماتریس اپوکسی شود که این امر به نوبه خود منجر به بهبود انتقال بار و افزایش مقاومت در برابر خستگی و سایش می‌گردد [۵]. علاوه بر این ترکیب نانوذرات اصلاح‌شده با الیاف طبیعی مانند الیاف موز یا آناناس امکان تولید کامپوزیت‌های زیست‌پایه با عملکرد بالا را فراهم می‌کند و باعث افزایش استحکام کششی مقاومت خمشی و سختی سطحی می‌شود حضور این الیاف زیست‌پایه همراه با نانوذرات موجب بهبود پیوند بین ماتریس و تقویت‌کننده و کاهش احتمال جداشدگی الیاف و تشکیل حفره‌ها در رابط ماتریس-الیاف می‌شود [۶]. از جمله کاربردهای مهم نانوذرات آلومینا در رزین اپوکسی می‌توان به تقویت خواص مکانیکی شامل استحکام کششی مدول یانگ مقاومت ضربه و سختی سطحی افزایش پایداری حرارتی به عنوان سد حرارتی برای جلوگیری از گسترش تخریب گرمایی بهبود مقاومت در برابر سایش و خراش به دلیل سختی ذاتی بالای آلومینا و کاربردهای الکترونیکی و عایق‌کاری به دلیل خواص دی‌الکتریک مناسب اشاره کرد [۷-۹] علاوه بر این، حضور نانوذرات آلومینا باعث افزایش دوام و طول عمر کامپوزیت‌ها و کاهش رشد ترک در شرایط محیطی و حرارتی می‌شود و این امر امکان استفاده گسترده از نانوکامپوزیت‌ها در صنایع پیشرفته از جمله خودروسازی هوافضا و پوشش‌های حفاظتی را فراهم می‌کند [۱۰]. در مجموع، نانوذرات آلومینا با ایجاد ساختارهای نانومقیاس پایدار در ماتریس اپوکسی، بهبود یکنواختی پراکندگی، افزایش چسبندگی ذرات به ماتریس، تقویت خواص مکانیکی و حرارتی و کاهش تشکیل نقص‌های ریزساختاری، عملکرد نهایی کامپوزیت‌ها را در شرایط کاری سخت به طور قابل توجهی ارتقاء می‌دهند و زمینه را برای توسعه مواد پیشرفته و زیست‌پایه در کاربردهای صنعتی فراهم می‌کنند [۱۱].

این مقاله مروری به طور سیستماتیک اثر نانوذرات آلومینای اصلاح شده بر مورفولوژی، خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و رفتار تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را مورد بررسی قرار می‌دهد. برخلاف مرورهای پیشین که معمولاً تنها یک جنبه از خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را تحلیل کرده‌اند، این مطالعه به صورت یکپارچه و منسجم اثر اصلاح سطح نانوذرات آلومینا بر ترکیبی از خواص مکانیکی، حرارتی، رسانایی گرمایی، مقاومت خوردگی و سایش را بررسی می‌کند. برخلاف مرورهای پیشین که غالباً تنها بر یک جنبه از این نانوکامپوزیت‌ها تمرکز داشتند، این پژوهش با ادغام داده‌های منتشر شده از منابع مختلف، تصویری یکپارچه از روابط میان روش‌های اصلاح سطح، ساختار میکروسکوپی، و عملکرد مکانیکی و تخریب گرمایی ارائه می‌دهد. در شکل ۱، به صورت خلاصه عناوین مهمترین نکات ارایه شده در این مقاله نشان داده شده است.

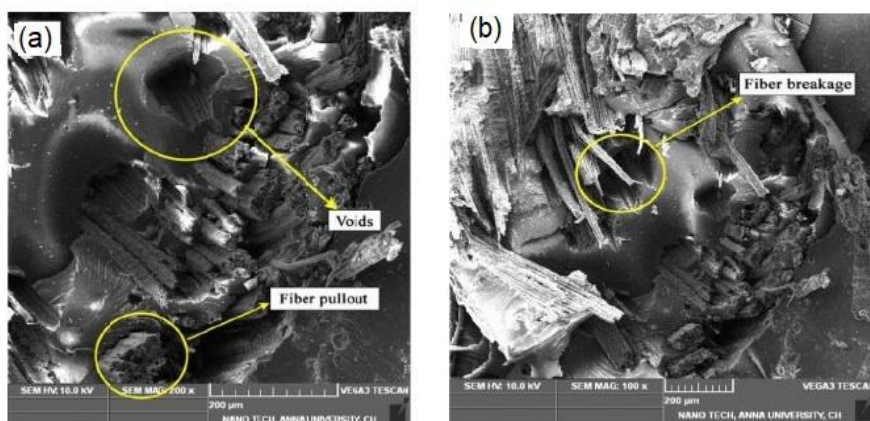


شکل ۱. عناوین مهمترین نکات ارایه شده در پیشرفت‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینا

Figure 1. Key Highlights Presented in Recent Advances of Epoxy Nanocomposites Containing Alumina Nanoparticles

۲- مورفولوژی

مورفولوژی کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف موز و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف موز همراه با ۵ درصد وزنی نانوذرات آلومینای اصلاح شده با هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۲) [۱۱]. نتایج نشان داد که در نانوکامپوزیت اصلاح شده، جدا شدگی های قابل توجهی بین الیاف و ماتریس و حفره هایی در رابط میان آنها مشاهده می شود که بیانگر اتصال ضعیف تر بین الیاف و ماتریس اپوکسی است. در نمونه های بدون نانوذرات، عدم حضور پرکننده نیز ممکن است علت اصلی این جدا شدگی ها و تشکیل حفره ها باشد. افزودن پودر آلومینا به طور قابل توجهی چسبندگی سطحی را بهبود می بخشد و احتمال ایجاد حفره و جدا شدگی الیاف را کاهش می دهد [۱۲]. فیلرها با بهبود سازگاری بین الیاف و ماتریس، انتقال بار را بهبود می بخشد و مقاومت کششی کامپوزیت را افزایش می دهند. همان طور که در تصاویر نانوکامپوزیت مشاهده می شود، حضور فیلرها موجب تقویت پیوند بین الیاف موز و ماتریس اپوکسی می گردد [۱۳]. این نتایج نشان دهنده نقش کلیدی نانوذرات اصلاح شده در بهبود ریز ساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت های زیست پایه است.

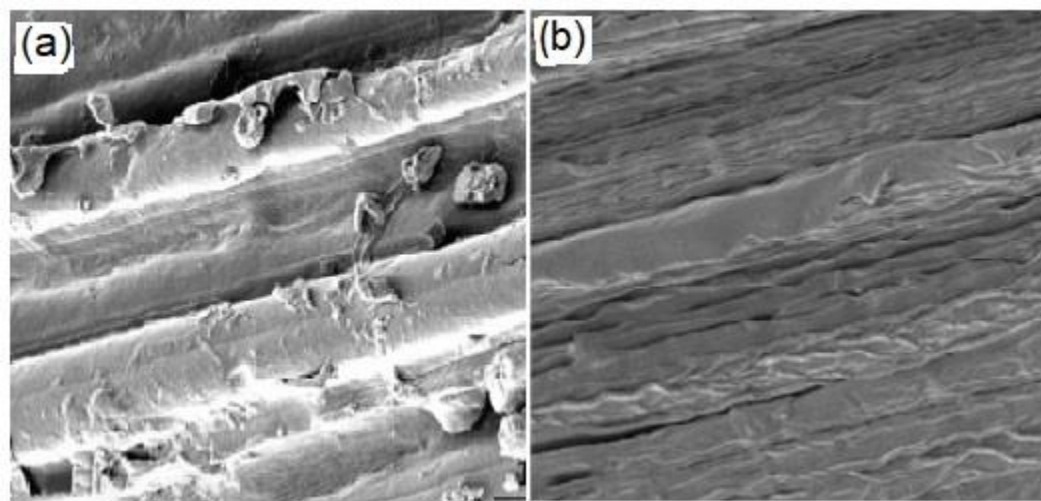


شکل ۲. (الف). کامپوزیت اپوکسی (ب). نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده

Figure 2. (a). Epoxy Composite (b). Modified Epoxy Nanocomposite

در پژوهشی دیگر، ریخت شناسی کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف برگ آناناس و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف آناناس و ۵ درصد وزنی نانوذرات آلومینای اصلاح شده با هیدروکسید سدیم مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳). نتایج نشان می دهد که الیاف اصلاح نشده دارای سطحی زبر و ناهموار هستند که با لیگنین، موم و سایر آلاینده های غیرسلولزی پوشیده شده اند [۱۳]. در کاربردهای کامپوزیتی، این مواد به عنوان یک مانع فیزیکی عمل کرده و مانع از ایجاد اتصال مؤثر با ماتریس پلیمری می شوند. همچنین، سطح الیاف دارای حفره ها و ذرات اضافی است که ظرفیت انتقال بار در ساختار کامپوزیت را کاهش می دهد (شکل ۲).

ترکیب طبیعی الیاف، که شامل مقادیر قابل توجهی از همی سلولز، لیگنین و موم است، منجر به ناهمواری‌ها و وجود ناخالصی‌های سطحی می‌شود [۱۴]. پس از اصلاح سطح الیاف با هیدروکسید سدیم، تغییر چشمگیری را در مورفولوژی سطح نشان می‌دهد. اصلاح قلیایی موجب حذف همی سلولز و لیگنین و در نتیجه ایجاد سطحی صاف‌تر و تمیزتر شده است [۱۵]. میکروفیبریل‌های سلولزی در این مرحله بیشتر در معرض قرار گرفته و هم‌راستا شده‌اند که این امر منجر به افزایش سطح ویژه می‌شود. این بهبود در وضعیت سطحی کامپوزیت، اتصال بین‌سطحی با ماتریس اپوکسی را تقویت می‌کند. نبود ذرات زائد سطحی موجب بهبود ترشوندگی الیاف شده و نفوذ مؤثرتر ماتریس به درون ساختار کامپوزیت را امکان‌پذیر می‌سازد. به طور کلی، بهبود خواص مکانیکی، گرمایی و سایشی کامپوزیت‌ها به‌طور مستقیم ناشی از این تغییرات مورفولوژیکی است [۱۶].



شکل ۳. (الف). کامپوزیت اپوکسی (ب). نانو کامپوزیت اپوکسی

Figure ۳. (a) Epoxy Composite (b) Epoxy Nanocomposite

اثر نانوذرات آلومینا و نانولوله‌های کربنی بر مورفولوژی رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که حتی تحت امواج فرا صوت با فرکانس بالا در طول فرآیند سنتز نانوکامپوزیت، نانولوله‌های کربنی و ذرات آلومینا تمایل به چسبندگی و تجمع دارند. این رفتار نشان می‌دهد که پراکنش یکنواخت این نانوذرات در ماتریس اپوکسی چالش‌برانگیز است و بر خواص مکانیکی و گرمایی نانوکامپوزیت تأثیر قابل توجهی دارد [۱۷].

تفاوت مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینا و نانوذرات اکسید روی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نانوکامپوزیت‌ها در حالت پودری تمایل به تشکیل کلوخه‌ای (خوشه‌های بزرگ‌تر) دارند. همچنین ذرات روی سطح نانوکامپوزیت‌ها به‌طور واضح قابل مشاهده نبودند و زبری ظاهری سطح نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۰.۵ در صد وزنی نانوالومینا بیشتر از نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ۰.۵ در صد وزنی نانوذرات اکسید روی است. این نتایج نشان می‌دهد که نوع نانوذره و تعامل آن با ماتریس اپوکسی بر پراکنش ذرات و ویژگی‌های سطحی نانوکامپوزیت تأثیر قابل توجهی دارد. [۱۳].

اثر اصلاح سطح نانوذرات آلومینا با گروه‌های سیلانی بر مورفولوژی رزین اپوکسی بررسی شد و نتایج با نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح شده مقایسه گردید [۱۴]. بررسی‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان داد که نانوذرات اصلاح شده به‌طور نسبتاً یکنواخت در ماتریس اپوکسی پخش شده‌اند، در حالی که نمونه‌های اصلاح نشده تمایل به تجمع و تشکیل توده‌های ناهمگن داشتند. این پراکندگی یکنواخت ناشی از واکنش سطحی نانوذرات با گروه‌های اپوکسی و تعامل مناسب بین ذرات و ماتریس است، که منجر به بهبود خواص مکانیکی و پایداری حرارتی کامپوزیت می‌شود. همچنین، نتایج نشان دادند که اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های سیلانی، کاهش تخلخل و افزایش اتصال بین ماتریس و ذرات را به همراه دارد، که از ایجاد نقاط ضعف ساختاری جلوگیری می‌کند و عملکرد نهایی کامپوزیت را ارتقا می‌دهد [۱۵].

مورفولوژی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینای اصلاح شده با ایندول مورد بررسی قرار گرفت [۱۵]. نتایج نشان داد که این نانوکامپوزیت، هم پس از یک روز و هم پس از ۴۰ روز، در حالت اولیه خود به صورت ساختار کلوخه‌ای باقی می‌ماند. با این حال، هنگامی که نانوکامپوزیت به مدت ۴۰ روز در آب دریا به عنوان پوشش مورد غوطه‌وری قرار گرفت (immersion)، کلوخه‌ای شدن از بین رفت و توزیع یکنواخت ذرات در ماتریس مشاهده شد. این رفتار نشان می‌دهد که فرآیند غوطه‌وری موجب بهبود پراکندگی نانوذرات و کاهش تجمع آنها می‌شود، که می‌تواند اثر مثبتی بر خواص مکانیکی و پایداری حرارتی پوشش داشته باشد. همچنین، این نتایج بیانگر اهمیت تعامل میان نانوذرات و محیط در اصلاح مورفولوژی و جلوگیری از تجمع ذرات در نانوکامپوزیت‌ها است [۱۶].

کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی آلومینا اصلاح شده با گروه‌های اورگانوسیلیل و گرافیت سنتز شدند [۱۶]. نتایج نشان داد که این کامپوزیت‌ها نسبتاً شکننده بوده و حتی در دمای اتاق به راحتی دچار شکست می‌شوند. در کامپوزیت حاوی گرافیت منبسط شده، ساختارهای صفحه‌ای و نامنظم با اندازه کمتر از ۱۰ میکرومتر مشاهده شد، که برخی از صفحات در راستای سطح قرار گرفته‌اند و این هم‌راستایی به همراه اشکال متنوع گرافیت منبسط شده را تأیید می‌کند. در نانوکامپوزیت حاوی گرافیت، تجمع ذرات ریز مشاهده شد که احتمالاً به دلیل حضور نانوذرات گرافیت، پراکندگی محدود یا برهمکنش قوی بین ذرات است [۱۷]. به طور کلی، گرافیت با اندازه بزرگ‌تر ساختارهای ورقه‌ای مشخصی نشان می‌دهد که تا حدودی در راستای سطح قرار گرفته‌اند، در حالی که گرافیت نانومقیاس تمایل به تجمع دارد. این تجمع می‌تواند به طور مستقیم بر ریزساختار و خواص مکانیکی کامپوزیت تأثیرگذار باشد. این نتایج نشان می‌دهند که اندازه و مورفولوژی گرافیت نقش مهمی در عملکرد نهایی کامپوزیت دارد و پراکندگی یکنواخت برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب ضروری است [۱۸].

۳. اصلاح سطح

نانوذرات آلومینا به دلیل سطح ویژه بالا و خواص مکانیکی و گرمایی مناسب، کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلف دارند اهمیت اصلاح سطح این ذرات به منظور بهبود پراکندگی در ماتریس‌های پلیمری یا افزایش فعالیت کاتالیستی و ثبات شیمیایی بسیار بالاست. اصلاح سطح ذرات باعث جلوگیری از تجمع، افزایش سازگاری شیمیایی با ماتریس و بهبود ویژگی‌های عملکردی مواد مرکب می‌شود [۱۹]. روش‌های مختلفی برای اصلاح سطح نانوذرات آلومینا وجود دارد که هر کدام مکانیزم و تأثیر متفاوتی دارند. روش‌های رایج شامل استفاده از هیدروکسید سدیم، سیلان و ایندول است که در ادامه با جزئیات بیشتری بررسی می‌شوند. در جدول ۱، این نتایج جمع‌بندی شده است [۲۰-۲۳].

جدول ۱. مقایسه روش‌های اصلاح سطح نانوذرات آلومینا

Table 1. Comparison of Surface Modification Methods for Alumina Nanoparticles

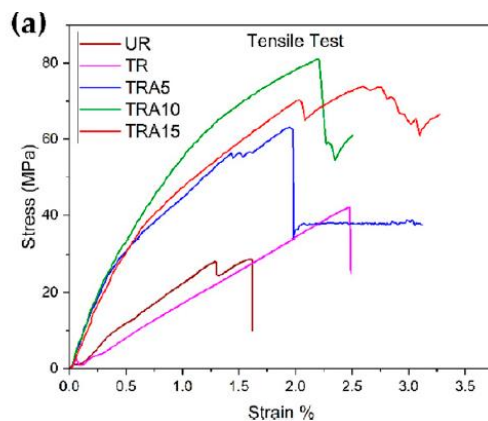
Modification Method	Reagent	Modification Mechanism	Effect on Dispersion	Approximate Cost	Advantages	Disadvantages	References
Sodium Hydroxide	NaOH	Surface charge alteration and increase of hydroxyl groups	Medium	Low	Cheap and simple	Possible particle aggregation and crystal structure damage	[18]
Silane	Silane	Covalent bonding of organic groups to particle surface, improves compatibility with organic matrices	Excellent	Medium	Improved dispersion and chemical compatibility	Requires precise control of reaction conditions	[19]
Indole	Indole	Organic coating on particle surface, increases hydrophobic and hydrophilic interactions	Good	High	Enhances chemical compatibility and dispersion in specific media	High cost and process complexity	[20]
Phosphoric Acid	H ₃ PO ₄	Formation of phosphate groups on surface to increase adsorption and catalytic activity	Good	Medium	Suitable for catalytic applications	May reduce thermal stability	[21]
Surface Polymers	PEG, PVP	Polymeric coating prevents aggregation and increases stability in aqueous or organic media	Excellent	Medium to High	Improves stability and dispersion	Increases weight and overall material cost	[22]

روش‌های مختلفی برای اصلاح سطح نانوذرات آلومینا وجود دارد که هر کدام مزایا، معایب و تأثیر متفاوتی بر پراکندگی ذرات و سازگاری با ماتریس دارند یکی از روش‌های متداول استفاده از هیدروکسید سدیم است در این روش با تغییر بار سطحی ذرات و افزایش گروه‌های هیدروکسیل، پراکندگی ذرات بهبود می‌یابد این روش ساده و کم‌هزینه است اما ممکن است باعث تجمع ذرات یا آسیب به ساختار کریستالی شود. [۲۰]. روش دیگری که به‌طور گسترده در کاربردهای پلیمری و به ویژه اپوکسی استفاده می‌شود، اصلاح با سیلان است در این روش گروه‌های آلی به سطح ذرات به صورت کووالانسی متصل می‌شوند که باعث افزایش سازگاری شیمیایی و پراکندگی یکنواخت در ماتریس می‌شود این روش اثر بخشی بالایی دارد اما نیاز به کنترل دقیق شرایط واکنش دارد [۲۱]. ایندول نیز به عنوان یک واکنشگر برای پوشش‌دهی ذرات استفاده می‌شود که با ایجاد پوشش آلی روی سطح، تعاملات هیدروفوبیک و هیدروفیلیک ذرات را افزایش می‌دهد این روش باعث بهبود پراکندگی و سازگاری شیمیایی در محیط‌های خاص می‌شود ولی هزینه بالایی دارد و فرآیند اجرای آن نسبتاً پیچیده است. اسید فسفریک روش دیگری است که با ایجاد گروه‌های

فسفات روی سطح ذرات، جذب و فعالیت کاتالیستی افزایش می‌یابد این روش برای کاربردهای کاتالیستی مناسب است اما ممکن است پایداری حرارتی ذرات را کمی کاهش دهد [۲۲]. در نهایت، استفاده از پوشش‌های پلیمری مانند PEG یا PVP باعث جلوگیری از تجمع ذرات و افزایش پایداری آنها در محیط‌های آبی یا ارگانیک می‌شود این روش پراکندگی بسیار خوبی ایجاد می‌کند اما هزینه بالاتر و افزایش وزن کلی مواد را به همراه دارد. با توجه به این موارد، انتخاب روش اصلاح سطح به کاربرد نانوذرات، خواص مورد نیاز، هزینه و شرایط فرآیند وابسته است برای مثال اصلاح با سیلان برای نانوذراتی که در ماتریس اپوکسی استفاده می‌شوند، مناسب‌ترین گزینه برای بهبود پراکندگی و چسبندگی است در حالی که هیدروکسید سدیم بیشتر برای تولید انبوه و کاهش هزینه کاربرد دارد و ایندول یا پوشش‌های پلیمری برای بهبود ویژگی‌های خاص و عملکرد بالا توصیه می‌شوند [۲۳].

۴- خواص مکانیکی

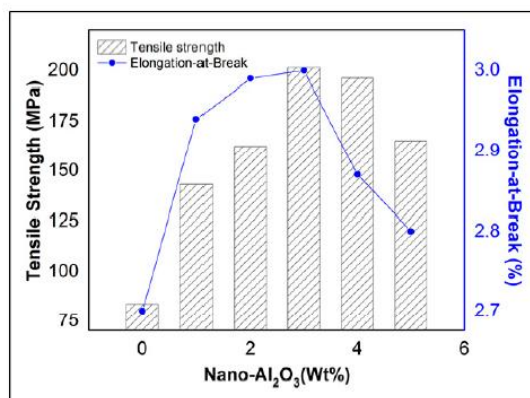
استفاده از محتوای پرکننده آلومینا و الیاف رزله اصلاح شده با هیدروکسید سدیم، تأثیرات مثبتی بر خواص مکانیکی، کامپوزیت‌ها دارد (شکل ۴). منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون‌های کششی نشان می‌دهند که رفتار مکانیکی کامپوزیت‌های حاوی الیاف رزله به طور قابل توجهی تحت تأثیر اصلاح سطح و افزودن پرکننده آلومینا قرار می‌گیرد. کامپوزیت اصلاح نشده (UR) به دلیل پیوند ضعیف بین الیاف و ماتریس، مقاومت کششی و کرنش پایینی از خود نشان می‌دهد. [۱۸]. اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم، موجب حذف لیگنین و سلولز شده و در نتیجه چسبندگی الیاف و ماتریس و خواص مکانیکی بهبود می‌یابد. افزودن آلومینا به ویژه در نمونه‌های نانو کامپوزیت اصلاح شده با ۵ در صد نانو آلومینا (TRA5) و نانو کامپوزیت اصلاح شده با ۱۰ در صد نانو آلومینا (TRA10)، با بهبود پراکندگی پرکننده، موجب افزایش چشمگیر مقاومت و کرنش کششی می‌شود؛ به طوری که TRA10 با رسیدن به مقدار استحکام تنش ۸۴/۵۲ مگاپاسکال و مقدار در صد کرنش ۱۰/۳، بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد. اما در نمونه TRA15، به دلیل تجمع بیش از حد پرکننده، کاهش خواص مکانیکی مشاهده می‌شود [۱۹].



شکل ۴. نمودار تنش - کرنش کامپوزیت اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده

Figure 4. Stress-Strain Curve of Epoxy Composite and Modified Epoxy Nanocomposite

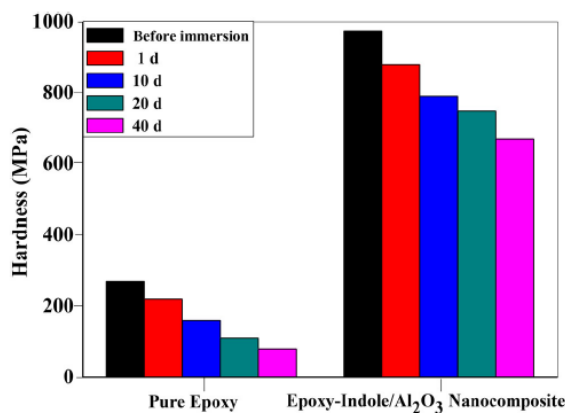
در پژوهشی دیگر، افزودن نانوالومینا به ماتریس اپوکسی حاوی نووالاک تأثیر قابل توجهی بر افزایش مقاومت ضربه و توان مقاومت پذیری نمونه‌های نانومحصول داشته است (شکل ۵) [۲۰]. به ویژه، افزودن تا میزان ۳ درصد وزنی نانوالومینا بهبود قابل توجهی در این خواص ایجاد کرده است، در حالی که افزودن بیش از این مقدار باعث کاهش آن‌ها شده است. این بهبود در خواص می‌تواند به دلیل افزایش جذب انرژی در نواحی زیرتر نانومحصولات پس از مخلوط کردن نانوالومینا در ماتریس باشد، که نشان‌دهنده اثربخشی این نانوذره در بهبود ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی است. بنابراین، استفاده بهینه از نانوالومینا در محدوده مشخص، می‌تواند منجر به توسعه مواد با خواص مکانیکی برتر در صنایع مختلف شود [۲۱].



شکل ۵. نمودار استحکام ضربه رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نووالاک

Figure 5. Impact Strength of Epoxy Resin and Epoxy Nanocomposite Containing Novolac

نمودار آزمون سختی برای اپوکسی خالص و فولاد نرم پوشش داده شده با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ایندول و آلومینا، قبل و بعد از غوطه‌وری در آب دریا به مدت ۱، ۱۰، ۲۰ و ۴۰ روز، در شکل ۶، نشان داده شده است. نتایج نشان داد که سختی نمونه‌های پوشش داده شده با اپوکسی خالص پس از ۴۰ روز به ۹۵ مگاپاسکال رسید [۲۲]، در حالی که نمونه‌های پوشش شده با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ایندول و آلومینا در همان مدت دارای سختی ۶۸۰ مگاپاسکال بودند. سختی بالاتر پوشش در نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی-ایندول و آلومینا نشان‌دهنده تخلخل کمتر و یکپارچگی بالاتر ساختار پوشش است [۲۳]، که می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی و مقاومت در برابر محیط‌های خورنده شود.

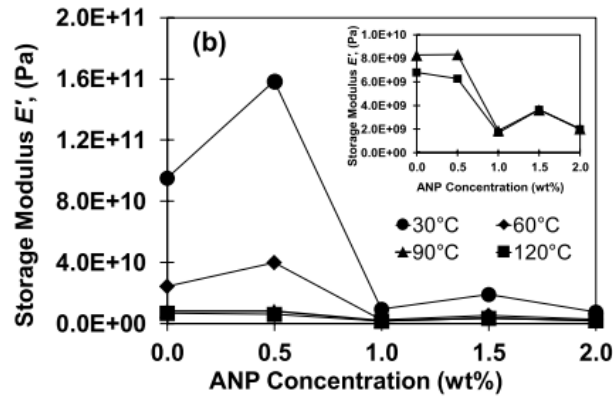


شکل ۶. نمودار سختی اپوکسی خالص و فولاد نرم پوشش داده شده با نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی ایندول و آلومینا

Figure 6. Hardness of Pure Epoxy and Mild Steel Coated with Epoxy Nanocomposite Containing Indole and Alumina

نتایج به دست آمده از بررسی مدول ذخیره و مدول اتلاف چسب اپوکسی تقویت شده با نانوذرات آلومینا نشان می‌دهد که افزودن مقدار بهینه‌ای از نانوذرات، به‌ویژه در حدود ۰/۵ درصد وزنی، می‌تواند به بهبود چشمگیر خواص ویسکوالاستیک چسب منجر شود (شکل ۷) [۲۱، ۲۴]. این بهبود به صورت افزایش قابل توجهی در هر دو مدول ذخیره و اتلاف در دمای پایین (۳۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد که نشان‌دهنده افزایش سختی و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در ماده است [۲۵]. این پدیده عمدتاً ناشی از تعامل فیزیکی مؤثر میان نانوذرات و ماتریس پلیمری بوده که موجب محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری در ناحیه اطراف نانوذرات می‌شود. با این حال، افزایش بیش از حد نانوذرات (بیش از ۰/۵ درصد وزنی) منجر به کاهش مقادیر مدول‌ها شده است که احتمالاً به دلیل تجمع نانوذرات و تسهیل حرکت زنجیره‌های پلیمری رخ می‌دهد. همچنین، افزایش دما نیز منجر به کاهش تدریجی این مدول‌ها گردیده که به حرکت آزادتر زنجیره‌های پلیمری مربوط است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار و دمای

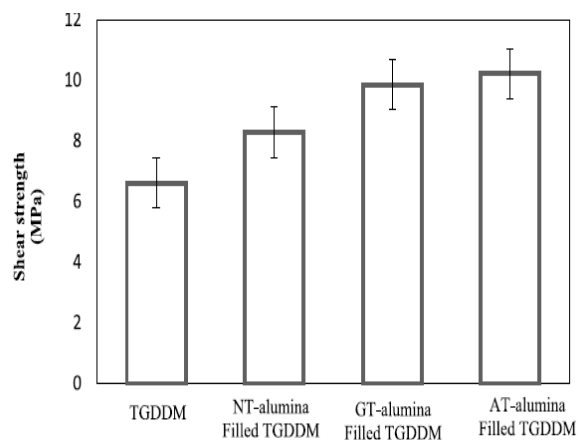
بهینه نقش تعیین کننده‌ای در دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب در چسب‌های اپوکسی تقویت شده با نانوذرات آلومینا دارند و بررسی‌های بیشتر و دقیق‌تری برای درک سازوکارهای دقیق حاکم بر این رفتار ضروری است [۲۵].



شکل ۷. نمودار مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

Figure 7. Storage Modulus of Epoxy Resin and Epoxy Nanocomposite

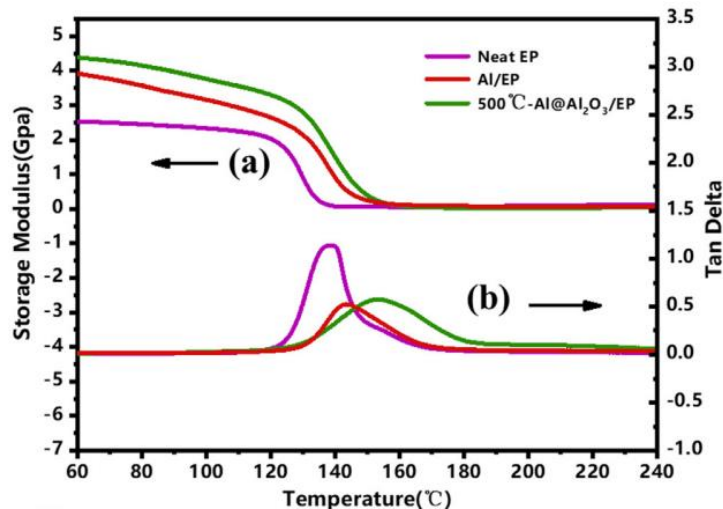
اثر نانو ذرات آلومینا اصلاح شده با دو گروه سیلانی (آمینوسیلان و پروپیل سیلان) بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۸، نشان داده شده است، استحکام برشی چسب با افزودن نانوذرات آلومینا به‌طور قابل توجهی افزایش یافت. این بهبود در استحکام برشی در نانوکامپوزیت‌هایی که حاوی نانوذرات آلومینای سیلان دار شده بودند، بیشتر مشهود بود [۲۶،۲۴]. همان‌طور که از نتایج مطالعه DSC در مورد فرایند پخت مشاهده شد، افزودن نانوذرات آلومینای سیلان دار موجب پخش بهتر نانوذرات در رزین اپوکسی و افزایش گرمای واکنش پخت شد. درجه بالای پخت و چگالی بالای شبکه‌ای شدن، نقش مثبتی در افزایش استحکام برشی چسب دارد [۲۷]. علاوه بر این، برهم‌کنش‌های قوی بین نانوذرات سیلان دار و ماتریس اپوکسی انتقال تنش در لایه چسب را تسهیل می‌کند. استحکام برشی چسب برای رزین اپوکسی خالص برابر با ۶/۶ مگاپاسکال بود که با افزودن نانوذرات آلومینای تغییر سطح یافته به ۱۰/۲ مگاپاسکال افزایش یافت که این امر عمدتاً به دلیل پراکندگی بهبود یافته نانوذرات آلومینا با مدول بالا در ماتریس اپوکسی می‌باشد [۲۸].



شکل ۸. نمودار استحکام برشی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

Figure 8. Shear Strength of Epoxy Resin and Epoxy Nanocomposite

اثر هیبرید نانو ذرات آلومینا و آلومینیوم بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شد. تحلیل مکانیکی دینامیکی (DMA) به عنوان ابزاری مؤثر برای مشخصه‌یابی خواص مکانیکی و گرمایی رزین اپوکسی خالص و کامپوزیت‌های آن شناخته می‌شود. با در نظر گرفتن تمامی شرایط بهینه‌سازی فوق، کامپوزیت اپوکسی حاوی ۶۰ درصد وزنی از هیبرید نانو ذرات به عنوان نمونه تحقیقاتی انتخاب شد و کامپوزیت اپوکسی حاوی آلومینیوم به عنوان نمونه کنترل در نظر گرفته شد [۲۹]. همان‌طور که در شکل ۹، مشخص است، افزودن ذرات Al و Al_2O_3 موجب افزایش مدول ذخیره در کل محدوده دمایی آزمون نسبت به رزین اپوکسی خالص گردید. این افزایش عمدتاً ناشی از اثر تقویتی ذرات پرکننده میکرو است که باعث افزایش سختی می‌شود. در ابتدای ناحیه شیشه‌ای، کامپوزیت Al/epoxy مدول ذخیره تقویت‌شده‌ای را نشان داد و هیبرید نانو کامپوزیت در دمای ۵۰۰ درجه سانتیگراد، بیشترین میزان تقویت مدول ذخیره را ارائه داد [۳۰].



شکل ۹. نمودار مدول ذخیره رزین اپوکسی و نانو کامپوزت اپوکسی

Figure 9. Storage Modulus of Epoxy Resin and Epoxy Nanocomposite

۵- بررسی خواص خوردگی و سایش نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینا

نانوکامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانوذرات آلومینا به دلیل ساختار یکنواخت و سطح ویژه بالا، از خواص مکانیکی و شیمیایی برجسته‌ای برخوردارند. وجود نانوذرات Al_2O_3 باعث افزایش مقاومت به سایش و کاهش نرخ خوردگی اپوکسی می‌شود [۳۱]. این ذرات با ایجاد سدهای فیزیکی در ماتریس رزین، مانع نفوذ عوامل خوردنده به عمق لایه کامپوزیت می‌شوند و در نتیجه مقاومت به خوردگی را بهبود می‌بخشند. از منظر سایش، ذرات نانو آلومینا به عنوان تقویت کننده سختی عمل کرده و میزان فرسایش سطحی را کاهش می‌دهند. افزایش درصد وزنی نانوذرات معمولاً باعث افزایش سختی سطحی و کاهش عمق فرسایش می‌شود، اما توزیع یکنواخت نانوذرات و عدم تجمع آن‌ها نقش مهمی در دستیابی به خواص مطلوب دارد (جدول ۲) [۳۲].

Table 2. Summary of Key Studies (2022–2025) - Epoxy Nanocomposites

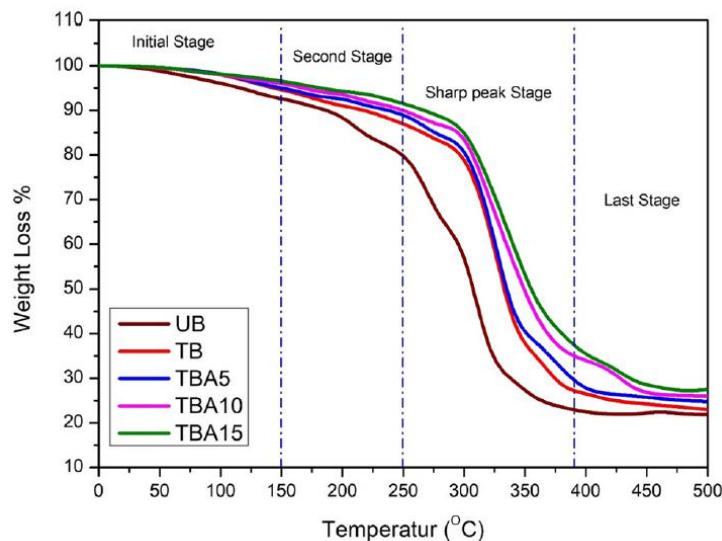
Study / Topic (Summary)	Time Range	System (Nanofillers)	Loading (wt%) / Ratio	Corrosion Resistance Effect	Wear Rate Effect	Notes & Limitations	References
Epoxy + N-doped Graphene	2024–2025	Nitrogen-doped graphene	Very low (~0.01–0.05)	Significant improvement	Strong reduction (~60–70%)	Dispersion critical; optimal dosage very low	[29]
Epoxy + Al ₂ O ₃ - modified GO	2025	Al ₂ O ₃ encapsulated on graphene oxide	~1–3 total	Good improvement	Moderate reduction	Surface modification required for stability	[31]
Epoxy + α-Al ₂ O ₃ / ZrO ₂ (Hybrid)	2023–2024	α-Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ (dual system)	2–5 total	Acceptable improvement	Significant reduction	Uniform dispersion & interface bonding crucial	[30]
Review on epoxy-based composite coatings	2022–2025	TiO ₂ , ZnO, MOFs, Graphene, Al ₂ O ₃ mixes	Variable	Carbon+oxide hybrids perform best	Variable	Need for long-term, standardized testing	[28]
Epoxy + Al ₂ O ₃ + Graphene (Binary Hybrid)	2023–2025	Al ₂ O ₃ + Graphene	2–5 total; ratio ~2:1	Significant improvement	Strong reduction	Clear synergy; graphene dispersion challenging	[32]
Epoxy + TiO ₂ + Graphene (Binary Hybrid)	2023–2025	TiO ₂ + Graphene	2–4 total; ratio ~2:1	Very high improvement	Very strong reduction	Best barrier + hardness performance; higher cost	[33]
Epoxy + Al ₂ O ₃ + TiO ₂ + Graphene (Ternary Hybrid)	2024–2025	Al ₂ O ₃ + TiO ₂ + Graphene	~5 total example	Maximum improvement	Lowest wear rate	Complex formulation; cost optimization required	[35]
Dispersion & interfacial bonding improvement methods	2022–2025	Surface silanization, coupling agents, ultrasonics	Variable	Improved coating durability	Better particle dispersion	Surface functionalization usually essential	[36]

در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها در بازه ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات با خواص مکمل، مانند ترکیب ذرات سخت آلومینا با لایه‌های سدکننده یا رسانای گرافن، منجر به ایجاد یک اثر هم‌افزایانه قوی در بهبود مقاومت به خوردگی و کاهش سایش می‌شود [۳۳]. حضور این نانوذرات در ماتریس اپوکسی موجب افزایش سختی سطحی و ایجاد مسیرهای پیچیده برای نفوذ یون‌ها و مولکول‌های مهاجم می‌شود که در نهایت از پیشروی خوردگی جلوگیری می‌کند. حتی مقادیر بسیار اندک از گرافن اصلاح شده، از جمله گرافن دوپ شده با نیتروژن یا گرافن اکسید، می‌توانند نقش چشمگیری در بهبود خواص پوشش‌ها داشته باشند. این ذرات لایه‌های تقریباً نفوذناپذیری ایجاد می‌کنند و با کاهش نفوذپذیری رطوبت و یون‌ها، طول مسیر مهاجرت آنها را افزایش می‌دهند [۳۴]. با این حال، غلظت بیش از حد گرافن یا توزیع نامناسب آن ممکن است موجب تجمع ذرات و تشکیل نقاط ضعف موضعی در پوشش شود که به تضعیف عملکرد منجر خواهد شد. نانوذرات آلومینا به عنوان تقویت‌کننده‌های سختی و مقاومت در برابر سایش شناخته می‌شوند. در سیستم‌های هیبریدی، حضور آلومینا موجب افزایش سختی سطح و مقاومت مکانیکی

شده و عمق فرسایش را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد. ترکیب آلومینا با مواد کربنی یا اکسیدی دیگر باعث می‌شود که بهبود همزمانی در خواص سایشی و مکانیکی مشاهده شود. افزودن TiO_2 یا ZrO_2 در کنار آلومینا یا گرافن، خواص خوردگی و سایش را به طور همزمان بهبود می‌دهد TiO_2 . علاوه بر ایجاد پایداری شیمیایی سطح، در برخی موارد اثرات فتوکاتالیستی نیز ارائه می‌دهد و ZrO_2 به دلیل چقرمگی و دوام مکانیکی بالایش شناخته می‌شود. سیستم‌های دوگانه و سه‌گانه متشکل از این اکسیدها همراه با گرافن یا گرافن اکسید معمولاً بهترین نتایج عملکردی را به دست می‌دهند [۳۵]. یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، پراکندگی یکنواخت نانوذرات در ماتریس اپوکسی است. روش‌هایی نظیر اصلاح سطح ذرات با عامل‌های سیلانی، پوشش‌دهی شیمیایی، استفاده از امولسیفایرها و اعمال امواج فراصوت برای جداسازی تجمعات و کنترل شرایط اختلاط و پخت، نقش کلیدی در دستیابی به توزیع یکنواخت و افزایش چسبندگی بین‌فازی دارند و برای دوام بلندمدت پوشش ضروری هستند. میزان بهینه نانوذرات بسته به نوع ذره متفاوت است. داده‌ها نشان می‌دهند که مقادیر پایین برای گرافن معمولاً کافی هستند، در حالی که ذرات اکسیدی سخت مانند آلومینا یا زیرکونیا به درصد‌های اندکی بالاتر نیاز دارند. بارگذاری بیش از حد نانوذرات، به‌ویژه در غیاب کنترل پراکندگی، منجر به تضعیف خواص و ایجاد نقاط نفوذپذیر خواهد شد. در مطالعات اخیر، توجه ویژه‌ای به آزمون‌های محیطی و طولانی‌مدت شده است. آزمایش‌هایی مانند چرخه‌های دمایی، غوطه‌وری طولانی‌مدت و نمک‌پاشی برای ارزیابی دوام واقعی این پوشش‌ها در شرایط صنعتی ضروری تلقی می‌شوند، زیرا بهبودهای مشاهده شده در آزمایش‌های کوتاه‌مدت لزوماً نشان‌دهنده عملکرد پایدار در میدان واقعی نیستند [۳۶]. در نهایت، ترکیبات چندگانه و سیستم‌های اصلاح‌شده اگرچه بهترین خواص خوردگی، سایش و مکانیکی را ارائه می‌دهند، اما هزینه و پیچیدگی تولید آنها مانعی برای استفاده گسترده صنعتی است. بنابراین، تمرکز آینده بر روی توسعه روش‌های مقرون‌به‌صرفه، بهینه‌سازی فرآیندهای تولید و ایجاد پوشش‌های با کارایی بالا و پایداری طولانی‌مدت خواهد بود [۳۷].

۶- پایداری گرمایی و رفتار تخریب گرمایی

نانوکامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات آلومینای اصلاح‌شده با هیدروکسید سدیم و الیاف برگ آناناس (PALF) مورد مطالعه قرار گرفت (شکل ۱۰). الیاف PALF، نوعی الیاف لیگنوسلولزی استخراج شده از برگ‌های گیاه آناناس، شامل سلولز، همی سلولز و لیگنین هستند. این الیاف به دلیل زیست‌پایه بودن و قابلیت تجزیه‌پذیری، دوستدار محیط‌زیست محسوب می‌شوند [۳۱]. از ویژگی‌های برجسته این الیاف می‌توان به استحکام کششی بالا، وزن سبک و نسبت بالای استحکام به وزن اشاره کرد، هرچند مانند سایر الیاف طبیعی، دارای جذب رطوبت نسبتاً بالایی هستند. کاربردهای متنوع این الیاف شامل کامپوزیت‌های پلیمری، تولید پارچه‌ها، طناب‌ها، کاغذسازی، صنایع خودروسازی و وسایل تزئینی و پوشاک سنتی می‌باشد [۳۲] و در برخی مناطق مانند فیلیپین، نقش مهمی در صنایع محلی ایفا می‌کنند. نتایج تحلیل تخریب گرمایی نشان داد که فرآیند تخریب کامپوزیت‌های حاوی الیاف آناناس اصلاح‌شده با هیدروکسید سدیم و تقویت‌شده با آلومینا، چند مرحله‌ای بوده و در هر مرحله رفتار متفاوتی از نظر پایداری گرمایی دارند. اصلاح شیمیایی الیاف با هیدروکسید سدیم موجب کاهش محتوای سلولز و لیگنین و در نتیجه افزایش مقاومت گرمایی کامپوزیت شد [۳۳]. همچنین، افزودن نانوذرات آلومینا نقش موثری در بهبود پایداری حرارتی و کاهش نرخ تخریب گرمایی ایفا کرد. این ذرات با ایجاد مانع حرارتی، انتقال گرما را کاهش داده و فرآیند تخریب را به تأخیر می‌اندازند. به ویژه، کامپوزیت‌های حاوی ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی از نانوالومینای اصلاح‌شده، بهترین عملکرد گرمایی را نشان دادند و به دلیل حفظ بیشتر جرم و تشکیل ذغال، برای استفاده در دماهای بالا مناسب هستند. بنابراین، ترکیب اصلاح شیمیایی الیاف و تقویت با آلومینا راهکاری مؤثر برای افزایش پایداری حرارتی و بهبود خواص زیست‌کامپوزیت‌ها محسوب می‌شود [۲۶، ۳۴].

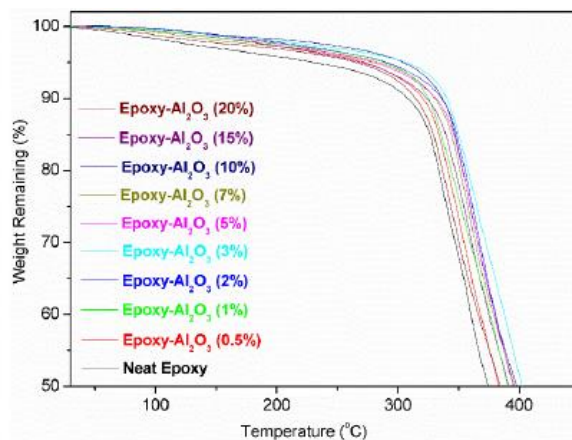


شکل ۱۰. نمودار آنالیز گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف موز و الیاف موز اصلاح شده با هیدروکسید سدیم

Figure 10. Thermal Analysis of Epoxy Nanocomposite Containing Banana Fibers and NaOH-Treated Banana Fibers

تخریب گرمایی نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانو ذرات آلومینای اصلاح شده با هیدروکسید سدیم و الیاف رزله بررسی شد. سنتز نمونه کامپوزیت اپوکسی، نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح شده با ۵ و ۱۰ درصد وزنی نانو ذرات آلومینا (نتایج نشان داد که، اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم و افزودن پرکننده آلومینا به طور قابل توجهی پایداری گرمایی را بهبود می بخشد [۳۷]. در مرحله اولیه (تا حدود ۱۰۰ درجه سانتی گراد)، کامپوزیت‌های اصلاح شده وزن بیشتری حفظ کردند که ناشی از کاهش جذب رطوبت و اثر حفاظتی پرکننده آلومینا است. در مرحله دوم (بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد)، نمونه کامپوزیت اصلاح نشده (بدون حضور آلومینا)، سریع‌ترین کاهش وزن را نشان داد، در حالی که نانو کامپوزیت اصلاح شده در حضور ۱۰ درصد وزنی از نانو ذرات آلومینا، بیشترین درصد وزن باقی مانده را داشت. این موضوع ناشی از پراکندگی بهتر پرکننده و تأثیر آن در کاهش نفوذ حرارت است [۳۸]. در مرحله اوج تخریب (۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد)، کامپوزیت‌های اصلاح شده به ویژه نانو کامپوزیت اصلاح شده در حضور ۱۰ درصد وزنی از نانو ذرات آلومینا، با حفظ وزن بهتر، نشان دهنده مقاومت گرمایی بالاتر بودند. به طور کلی، اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم با حذف لیگنین و سلولز و همچنین افزودن آلومینا، موجب افزایش پایداری گرمایی و کاهش سرعت تخریب گرمایی نانو کامپوزیت‌ها شده است. نتایج نشان می دهد که نمونه نانو کامپوزیت اصلاح شده در حضور ۱۰ درصد وزنی از نانو ذرات آلومینا با حفظ بهینه وزن و مقاومت گرمایی، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای نیازمند دوام گرمایی بالا می باشد [۳۹].

اثر نانوذرات آلومینا بر پایداری گرمایی و رفتار تخریب حرارتی رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن این نانوذرات موجب افزایش قابل توجه دمای تخریب (Td) در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مقایسه با اپوکسی خالص می‌شود (شکل ۱۱). برای نمونه‌ای که حاوی ۳ درصد وزنی نانوذرات آلومینا است، دمای تخریب برای ۱۰ درصد کاهش وزن به ۳۴۱ درجه سانتی‌گراد می‌رسد، در حالی که این مقدار برای اپوکسی خالص ۳۰۷ درجه سانتی‌گراد است [۴۰]. همچنین، در ۵۰ درصد کاهش وزن، دمای تخریب نانوکامپوزیت با ۳ درصد وزنی نانوذرات، ۴۰۱ درجه سانتی‌گراد است که نسبت به اپوکسی خالص (۳۷۵ درجه سانتی‌گراد) افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش غلظت نانوذرات آلومینا از ۰/۵ تا ۳ درصد وزنی، پایداری گرمایی نانوکامپوزیت بهبود می‌یابد. با این حال، افزایش غلظت بیش از حد نانوذرات (تا ۲۰ درصد وزنی) باعث کاهش شدید پایداری گرمایی می‌شود که احتمالاً ناشی از تجمع ذرات و اثرات منفی آن بر ساختار ماتریس است. بنابراین، بهینه‌سازی میزان غلظت نانوذرات برای دستیابی به بهترین عملکرد تخریب گرمایی ضروری است [۴۱].



شکل ۱۱- نمودار تخریب گرمایی رزین اپوکسی و نانو کامپوزیت اپوکسی

Figure 11. Thermal Degradation of Epoxy Resin and Epoxy Nanocomposite

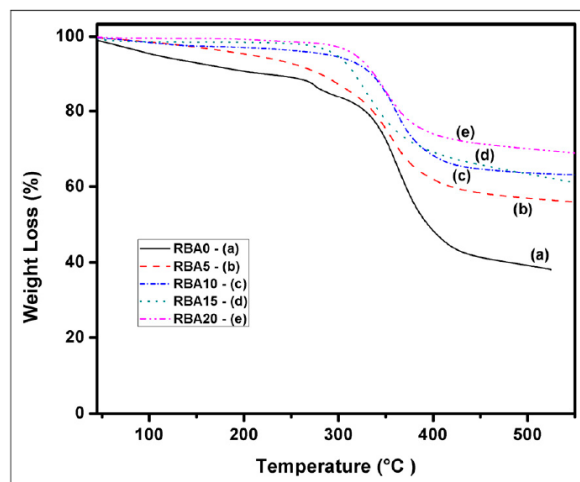
تأثیر افزودن نانوذرات به ماتریس اپوکسی خالص بر پایداری حرارتی بررسی شد. نتایج آنالیز تخریب حرارتی نشان داد که نمونه‌های نانوکامپوزیتی در مقایسه با ماتریس خالص، در دماهای بالاتر و به‌صورت تک‌مرحله‌ای دچار تخریب می‌شوند. پارامترهای مهم مانند T_{5%}، T_{50%}، T_f و درصد ذغال باقی‌مانده در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد (CY) با افزودن نانوذرات به طور قابل توجهی افزایش یافتند، به‌خصوص در نمونه‌ای که حاوی ۳ درصد وزنی نانوذرات بود [۴۲]. این افزایش نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در

پایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌ها است. این بهبود می‌تواند به دلایل مختلفی باشد. نانوذرات با هدایت گرمایی بالا ($35 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$) نقش جذب‌کننده گرمایی را ایفا کرده و از همچنین، حضور نانوذرات باعث محدود شدن حرکت زنجیره‌های پلیمری و کاهش سرعت تخریب می‌شود و پیوندهای هیدروژنی بین نانوذرات و زنجیره‌های پلیمری نیز منجر به افزایش پایداری گرمایی نانوکامپوزیت می‌شوند [۴۳]. افزایش در صد ذغال باقی‌مانده (CY) به میزان ۱۴ / ۲۶ درصد نسبت به ماتریس خالص، نشان‌دهنده کاهش تولید گازهای قابل‌احتراق و کاهش واکنش‌های گرمایی است که در نتیجه منجر به کاهش خطر آتش‌سوزی و بهبود ایمنی مواد می‌شود. در مجموع، افزودن نانوذرات به ماتریس اپوکسی، به‌خصوص در ۳ درصد وزنی، منجر به بهبود چشمگیر خواص گرمایی و مقاومت در برابر تخریب گرمایی می‌شود [۴۴]. در این مطالعه، افزایش میزان پرکننده در کامپوزیت‌ها منجر به بهبود پایداری گرمایی آن‌ها شد، به طوری که میزان باقی‌مانده جرم در حین فرآیندهای تخریب گرمایی افزایش یافت. همچنین، درصد باقیمانده ذغال در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان‌دهنده میزان ماده غیرتخریب شده و میزان پرکننده‌های غیرقابل تخریب در کامپوزیت‌ها بود. این نتایج امکان ارزیابی مناسب پارامترهای سینتیکی فرآیندهای گرمایی را فراهم ساخت [۴۵].

اثر نانو ذرات آلومینا و نانو لوله های کربنی بر رفتار تخریب گرمایی رزین اپوکسی بر سی شد (شکل ۱۲). نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تخریب گرمایی نمونه در دمای حدود ۴۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. محدوده دمایی ۱۰۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس نشان‌دهنده دو مرحله عمده فرآیند تخریب گرمایی مشاهده شد [۴۶]. مرحله اول مربوط به تبخیر آب و حباب‌های هوا در محدوده دمایی ۵۰-۲۵۰ درجه سلسیوس و مرحله دوم در محدوده دمایی ۳۰۰-۴۵۰ درجه سلسیوس مربوط به شکستن پیوندها، شکست زنجیره اصلی و دهیدراتاسیون در محدوده دمایی ۳۰۰-۴۵۰ درجه سلسیوس می‌باشد [۴۷].

اثر مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی آلومینای باز یافتی حاصل از فرآیند چرخ‌سنگ‌زنی بر رفتار تخریب حرارتی رزین اپوکسی و الیاف شیشه مورد بررسی قرار گرفت [۴۸]. نتایج نشان داد که افزودن آلومینا به کامپوزیت‌ها تأثیر قابل توجهی بر پایداری گرمایی دارد. فرآیند تخریب در دو مرحله رخ می‌دهد: مرحله اول شامل تبخیر رطوبت موجود و حدود ۱۰ درصد از کل تخریب است، و مرحله دوم به نوع فیلر، قدرت پیوند و سازگاری آن با ماتریس وابسته است. کامپوزیت‌های حاوی ۲۰ درصد آلومینا بالاترین پایداری

گرمایی را نشان دادند که ناشی از استحکام و مقاومت بالای فیلر سرامیکی در دماهای بالا است [۴۹]. افزودن فیلرهای سرامیکی مانند آلومینا و سیلیکا می‌تواند مقاومت گرمایی کامپوزیت‌ها را بهبود بخشد [۵۰]. بنابراین، استفاده از فیلرهای سرامیکی تقویت‌کننده راهکاری مؤثر برای توسعه مواد کامپوزیتی مقاوم در برابر حرارت در صنایع مختلف است.



شکل ۱۲. رفتار تخریب گرمایی نمودار رزین اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانو کامپوزیت های اپوکسی

Figure 12. Thermal Degradation Behavior of Epoxy Resin Containing Glass Fibers and Epoxy Nanocomposites

دمای کاهش وزن ۲۰ در صد (تخریب گرمایی) برای رزین اپوکسی، نانو کامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینای اصلاح شده با گروه‌های سیلانی و نانو کامپوزیت اپوکسی اصلاح نشده مورد بررسی قرار گرفت [۵۱]. نتایج نشان داد که دمای ۲۰ درصد کاهش وزن برای رزین اپوکسی، نانو کامپوزیت اصلاح شده و نانو کامپوزیت اصلاح نشده به ترتیب برابر با ۳۵۷,۲۷، ۳۶۵,۷۲ و ۳۷۵,۹۴ درجه سانتی‌گراد است. این داده‌ها حاکی از آن است که اصلاح سطح نانوذرات با گروه‌های سیلانی موجب بهبود پایداری گرمایی کامپوزیت می‌شود و تخریب حرارتی را نسبت به رزین خالص کاهش می‌دهد.

۷- پیشرفت های اخیر

نانوکامپوزیت های اپوکسی حاوی نانوذرات آلومینا در سال های اخیر توجه گسترده ای در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، الکترونیک و پوشش های ضد خوردگی داشته اند دلیل این توجه، بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی رزین های اپوکسی با افزودن نانوذرات آلومینا و ترکیب آن ها با الیاف طبیعی، نانوذرات دیگر یا پرکننده های سرامیکی است. در صنعت هوافضا و خودروسازی، تحقیقات متعددی بر بهبود خواص مکانیکی و گرمایی تمرکز داشته اند برای مثال، ترکیب هیدروکسید سدیم-آلومینا با الیاف برگ آناناس در رزین اپوکسی منجر به افزایش مقاومت مکانیکی و حرارتی شده است (۲۰۲۵) همچنین اپوکسی-هیدروکسید سدیم-الیاف رزول بهبود خواص مکانیکی و حرارتی را به همراه داشته و کاربرد بالقوه ای در خودروسازی دارد نانوکامپوزیت های اپوکسی-آلومینا-الیاف موز آکومیناتا و اپوکسی-آلومینا-الیاف طبیعی *Paederia foetida* نیز در سال ۲۰۲۴ بهبود خواص مکانیکی و حرارتی مشابهی نشان داده اند [۳۲].

در بخش پوشش ها و چسبندگی، ترکیب اپوکسی-نووالاک-آلومینا با کوپلیمر بلوکی پلی (بوتیل آکریلات-بلوک-ا ستایرن) موجب افزایش خواص مکانیکی، حرارتی و چسبندگی شده است. همچنین اپوکسی-پلی استر حاوی نانو آلومینا، نانو رس یا نانو تیتانیوم دی اکساید افزایش چسبندگی و خواص مکانیکی را فراهم کرده است. برای افزایش عملکرد گرمایی و الکتریکی، ترکیب اپوکسی-آلومینا-بورون نیتريد یا اپوکسی-آلومینا-نیتريد بور-نانو ذرات گرافن اکساید کاهش یافته و اسید اسکوربیک نشان داده است که رسانایی گرمایی بالا، استحکام مکانیکی و عایق الکتریکی به طور همزمان قابل دستیابی است. همچنین رزین های اپوکسی زیست بنیان DGEMT حاوی نانو ذرات آلومینا افزایش رسانایی گرمایی داشته اند. در کاربردهای ضد خوردگی، استفاده از اپوکسی-نانو آلومینا-زیرکونیوم اکساید با اولئیک اسید، اپوکسی-نانو آلومینا-پلی اتیلن ایمین و اپوکسی-نانو آلومینا-نانو ذرات تیتانیوم دی اکساید همراه با الیاف شیشه نتایج موفقیت آمیزی در محافظت سطوح داشته اند. ترکیبات حاوی الیاف طبیعی و نانو ذرات مختلف، مانند اپوکسی-آلومینا-الیاف آرکا، اپوکسی-آلومینا-الیاف بنیان، و اپوکسی-آلومینا-الیاف جوت، کنف و شیشه، نه تنها پراکندگی مناسب ذرات را ایجاد کرده اند بلکه خواص مکانیکی و ضد باکتریایی را نیز بهبود داده اند. همچنین کاربردهای پیشرفته در مدیریت حرارتی و انرژی الکتریکی، مانند اپوکسی-نانو آلومینا-اپوکسی-پلی یورتان و اپوکسی-نانو آلومینا-نانو الماس نشان دهنده ظرفیت بالای این نانوکامپوزیت ها در سیستم های الکترونیکی و تبدیل انرژی است. در مجموع، پژوهش های اخیر نشان می دهد که انتخاب مناسب نوع نانوذره، اصلاح سطح و ترکیب با الیاف یا دیگر پرکننده ها می تواند خواص مکانیکی، حرارتی،

الکتریکی و ضد خوردگی رزین های اپوکسی را به طور همزمان بهبود بخشید. این پیشرفت ها موجب افزایش کاربرد نانوکامپوزیت های اپوکسی-آلومینا در صنایع پیشرفته شده و مسیرهای جدیدی برای توسعه مواد عملکرد بالا فراهم کرده است. در ادامه پیشرفت های اخیر به اثر نانو ذرات آلومینای اصلاح شده به رزین اپوکسی و مهمترین نتایج به دست آمده بررسی می شود [۳۳].

اثر نانوذرات آلومینا اصلاح شده با هیدروکسید سدیم بر رزین اپوکسی و الیاف برگ آناناس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان میدهد که، اصلاح سطح و افزودن پرکننده آلومینا تأثیر قابل توجهی بر خواص مکانیکی، جذب آب، پایداری گرمایی و سایش لغزشی کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با الیاف برگ آناناس دارد. اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم، باعث تقویت پیوند بین الیاف و ماتریس شده و به طور قابل توجهی استحکام کششی، خمشی و ضربه ای کامپوزیت ها را افزایش می دهد [۵۲]. همچنین، افزودن آلومینا به این کامپوزیت ها، خواص مکانیکی را بیشتر بهبود می بخشد. کامپوزیت حاوی ۱۰ درصد نانو ذرات آلومینا به بالاترین مقادیر استحکام کششی (۴۱/۴ مگاپاسکال)، استحکام خمشی (۶۳/۸ مگاپاسکال) و استحکام ضربه ای (۳۷/۶ کیلوژول بر متر مربع) دست یافته است [۵۳]. تحلیل پایداری گرمایی نشان می دهد که اصلاح سطح با هیدروکسید سدیم پایداری گرمایی را بهبود می بخشد و کامپوزیت حاوی ۱۵ درصد نانو ذرات آلومینا، مقدار ذغال باقیمانده ۱۵/۳ درصد را در دمای ۷۰۰ درجه سانتی گراد دارد. آزمایشات سایش لغزشی نشان می دهد که تقویت آلومینا به طور قابل توجهی نرخ سایش خاص و ضریب اصطکاک را کاهش می دهد. به طور کلی، این تحقیق نشان می دهد که نانو ذرات آلومینا اصلاح شده با هیدروکسید سدیم بر رزین اپوکسی و الیاف برگ آناناس می تواند خواص مکانیکی، و گرمایی نانو کامپوزیت اصلاح شده را بهبود بخشد [۵۴].

الیاف رُزله (Roselle fibers) از گیاه رُزله (*Hibiscus sabdariffa*) به دست می آیند. این الیاف به دلیل ویژگی های خاص خود، مانند استحکام و قابلیت تجزیه پذیری، در صنایع مختلفی از جمله نساجی و تولید کاغذ مورد استفاده قرار می گیرند. الیاف رُزله به عنوان یک منبع طبیعی و پایدار شناخته می شوند و می توانند به عنوان جایگزینی برای الیاف مصنوعی در نظر گرفته شوند [۵۵]. استفاده از محتوای پرکننده آلومینا و الیاف رُزله اصلاح شده با هیدروکسید سدیم، تأثیرات مثبتی بر خواص مکانیکی، گرمایی، زیست تخریب پذیری و تریبولوژیکی کامپوزیت ها دارد. نتایج نشان داد که نانو کامپوزیت با مقدار ۱۰ درصد از نانو ذرات آلومینا، با به بالاترین مقدار مقاومت های کششی، خمشی و ضربه ای میرسد که این امر به دلیل بهبود پیوند بین سطحی و توزیع

یکنواخت پرکننده‌ها را به دست آورد [۵۶]. همچنین، تحلیل گرمایی نشان‌دهنده پایداری بهبود یافته و مقاومت در برابر تخریب گرمایی در این کامپوزیت بود. مطالعات زیست تخریب پذیری نشان داد که کامپوزیت‌های پر شده با آلومینا وزن کمتری را در طول زمان از دست می‌دهند که نشان‌دهنده دوام زیست‌محیطی آن‌هاست [۵۷]. ارزیابی‌های تریبولوژیکی نیز نشان داد که نانو کامپوزیت با ۱۰ درصد وزنی از آلومینا دارای کمترین نرخ سایش و ضریب اصطکاک می‌باشد. این یافته‌ها بینش‌های ارزشمندی را در مورد کامپوزیت‌های الیاف رزله برای کاربردهای پایدار در صنایع خودروسازی و بسته‌بندی ارائه می‌دهد [۵۸].

کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف موز آکومیناتا و ذرات آلومینا، با بهبود چشمگیر در خواص مکانیکی، گرمایی و جذب آب همراه هستند. نمونه‌های سنتز شده با عملکرد برجسته در مقاومت‌های کششی و خمشی و همچنین با پایداری گرمایی و مقاومت عالی در برابر زیست تخریب پذیری، اثبات کردند که افزودن ذرات آلومینا نقش کلیدی در افزایش دوام و کارایی این نانو کامپوزیت دارد [۵۹]. همچنین تحلیل‌های میکروسکوپی نشان دادند که پیوند قوی بین الیاف و ماتریس، باعث کاهش جدایش الیاف و افزایش استحکام ساختاری شده است. این نتایج امیدبخش، چشم‌اندازی نویدبخش برای کاربردهای گسترده‌تر این کامپوزیت‌های دوستدار محیط زیست در صنایع مختلف فراهم می‌آورد [۶۰].

اثر افزودن رزین فنولیک (نولاک)، کوپلیمر بلوکی پلی (بوتیل آکریلات-بلوک-استایرن) و نانوذرات آلومینا به چسب فیلم اپوکسی پایه DGEBA، بررسی شد. نتایج نشان داد که تأثیر چشم‌گیری در بهبود خواص مکانیکی و گرمایی آن دارد [۶۱]. افزودن ۲ phr و ۲/۵ کوپلیمر و ۲ نانوذرات آلومینا منجر به افزایش ۲۵۰ درصدی در چقرمگی، ۵۱ درصدی در مقاومت برشی شد که حاکی از اثر هم‌افزایی قابل توجه این ترکیبات است [۶۲]. تحلیل‌های TGA نیز نشان دادند که کوپلیمر بلوکی به‌تنهایی و در ترکیب با نانوذرات آلومینا موجب ارتقاء پایداری گرمایی ماتریس اپوکسی می‌شود. مشاهدات میکروسکوپی SEM نیز با نتایج مکانیکی هم‌راستا بوده و سازوکارهایی مانند انحراف ترک، و جدایش بین‌لایه‌ای را به‌عنوان عوامل اصلی افزایش چقرمگی معرفی کردند. این دستاوردها می‌تواند افق‌های جدیدی برای توسعه چسب‌های ساختاری با عملکرد بالا در صنایع پیشرفته فراهم آورد [۶۳].

کامپوزیت‌های های اپوکسی تقویت شده با ترکیب هیبریدی الیاف طبیعی *Paederia foetida* و پودر آلومینا، با نسبت حجمی ۳۰ در صد الیاف و ۱۰ در صد آلومینا سنتز شد. نتایج نشان داد که ساخت این نانو کامپوزیت منجر به تقویت ساختار و افزایش پایداری گرمایی می‌شود [۶۴]. همچنین، ترکیب هیبریدی موجب کاهش جذب آب و تورم نسبت به نمونه‌های تقویت‌شده تنها با الیاف یا آلومینا گردیده است. مشاهدات میکروسکوپی نیز نشان‌دهنده ساختار متخلخل کنترل شده و جدایش‌های محدود الیاف است که به بهبود خواص مکانیکی کمک می‌کند. به طور کلی، کامپوزیت هیبریدی قابلیت رقابت بالا با کامپوزیت‌های هیبریدی طبیعی پیشرفته را داشته و می‌تواند گزینه مناسبی برای کاربردهای صنعتی و محیطی با نیاز به خواص مکانیکی و گرمایی بالا باشد [۶۵].

افزودن مقادیر بهینه‌ای از تفاله نیشکر و نانو آلومینا (هر کدام به میزان حدود ۳/۵ درصد وزنی) به ماتریس اپوکسی موجب بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی، گرمایی و فیزیکی کامپوزیت‌های هیبریدی شده است. تحلیل‌های آماری و مدل‌های پیش‌بینی نشان‌دهنده تطابق خوب با داده‌های تجربی بود که اعتبار نتایج را افزایش می‌دهد [۶۶]. همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی بیانگر توزیع یکنواخت این پرکننده‌ها در ماتریس اپوکسی بوده که نقش مهمی در تقویت ساختار و افزایش پایداری گرمایی و مکانیکی ایفا می‌کند. بنابراین، استفاده از ترکیب تفاله نیشکر و آلومینا به عنوان تقویت‌کننده‌های هیبریدی، راهکاری موثر و مقرون‌به‌صرفه برای ارتقاء عملکرد کامپوزیت‌های اپوکسی به شمار می‌آید [۶۷].

در پژوهشی دیگر مشخص شد که افزودن نیتريد بور با هدایت گرمایی بالا به کامپوزیت‌های اپوکسی/آلومینا، موجب افزایش چشمگیر هدایت گرمایی مواد شد. این بهبود گرمایی باعث کاهش تنش‌های گرمایی ناشی از گرادیان دمایی بالا گردید. همچنین، برر سی تأثیر در صدهای مختلف افزودنی نیتريد بور بر مقاومت شکست الکتریکی کامپوزیت‌ها نشان داد که با بهینه‌سازی میزان افزودنی، می‌توان استحکام میدان شکست را به طور قابل توجهی افزایش داد و بدین ترتیب پایداری عملکردی و ایمنی تجهیزات را ارتقاء بخشید [۶۸]. شبیه‌سازی‌های انجام شده نیز اثربخشی مواد با هدایت گرمایی بالا را در بهبود همزمان خواص گرمایی و عایقی این کامپوزیت‌ها تأیید کردند. بنابراین، استفاده از نیتريد بور به عنوان افزودنی در کامپوزیت‌های اپوکسی حاوی ذرات آلومینا، راهکاری مؤثر برای ارتقای عملکرد گرمایی و الکتریکی تجهیزات قدرت است [۶۹].

پوشش‌های پلیمری مختلفی از دو ماتریس اصلی، اپوکسی (Ep) و پلی‌استر غیر اشباع (UPE)، با افزودن ۱ و ۴ درصد وزنی نانوذرات اکسید تیتانیوم، نانوآلومینا و نانو رس تهیه شدند. این پوشش‌ها بر روی سطوح مختلف شامل شیشه، پلی‌آکرلیک،

آلومینیوم و فولاد گالوانیزه اعمال شده و خواص آن‌ها از جمله سختی، چسبندگی و زاویه تماس مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ویژگی‌های ریز ساختاری پوشش‌ها تحلیل شد. نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات موجب افزایش سختی پوشش‌ها شد، به ویژه در ۴ درصد وزنی که بیشترین سختی مربوط به پلی‌استر تقویت شده با نانوذرات اکسید تیتانیوم بود [۷۰]. بیشترین چسبندگی نیز در اپوکسی تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانو رس مشاهده شد. همچنین زاویه تماس با افزایش درصد وزنی نانوذرات افزایش یافت و اپوکسی در مقایسه با پلی‌استر، در شرایط مشابه، زاویه تماس بالاتری نشان داد. این نتایج نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانوذرات در بهبود خواص مکانیکی و سطحی پوشش‌ها است و می‌تواند کاربردهای متنوعی در صنایع مختلف فراهم کند [۷۱].

پژوهشگران رزین‌های اپوکسی زیست‌پایه DGEMT حاوی نانوذرات آلومینا را سنتز کردند. نتایج نشان داد که این رزین‌ها می‌توانند جایگزین مناسبی برای رزین‌های اپوکسی نفت‌پایه باشند. به دلیل داشتن دو گروه عملکردی فعال، رزین‌های DGEMT منجر به بهبود قابل توجهی در ویژگی‌های کلیدی، از جمله رسانایی گرمایی بالا شدند [۷۲]. عملکرد برتر این کامپوزیت‌ها در مقایسه با نمونه‌های نفت‌پایه، همراه با قابلیت‌های مکانیکی، گرمایی و فرآیندی قابل مقایسه، نشان‌دهنده پتانسیل بالای استفاده از این مواد در طراحی شبکه‌های برق پایدار، کارآمد و دوستدار محیط زیست است. این تحقیق گامی مؤثر در جهت توسعه مواد زیست‌پایه برای کاربردهای مهندسی پیشرفته در صنعت محسوب می‌شود [۵۱].

نانوذرات آلومینای اصلاح شده با عامل کوپلینگ سیلانی به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفتند [۷۴]. نتایج نشان داد که عامل کوپلینگ KH570 بهترین عملکرد را در بهبود پراکندگی و پایداری نانوذرات در ماتریس اپوکسی دارد. این نانوذرات به دلیل داشتن گروه‌های فعال شیمیایی مانند پیوندهای سیلیکونی، قابلیت واکنش‌پذیری مناسبی با گروه‌های اپوکسی داشته و باعث تثبیت و پراکندگی یکنواخت در ساختار رزین می‌شوند. پراکندگی بهینه نانوذرات زمانی حاصل می‌شود که مقدار مشخص و کنترل شده‌ای از آن‌ها به ماتریس افزوده شود. در این شرایط، استحکام کششی کامپوزیت به‌طور قابل توجهی نسبت به رزین خالص افزایش می‌یابد؛ به‌عنوان مثال، با افزودن ۱ درصد وزنی نانوذرات، استحکام کششی به ۵۱٫۹ مگاپاسکال می‌رسد که ۴۹٫۱ درصد بیشتر از رزین اپوکسی خالص است [۵۲]. با این حال، زمانی که مقدار نانوذرات از ۱ درصد وزنی فراتر رود، ذرات تمایل به تجمع و کلوخه‌ای شدن پیدا می‌کنند که منجر به ایجاد نقص در ساختار و کاهش خواص مکانیکی می‌شود. همچنین، افزودن نانوذرات اصلاح شده آلومینا موجب افزایش سختی رزین اپوکسی می‌شود و بیشترین میزان سختی در

مقادیر بالاتر نانوذرات مشاهده می شود که ناشی از سختی ذاتی بالای آلومینا نسبت به رزین خالص است [۵۳]. این مطالعه نشان می دهد که کنترل دقیق مقدار نانوذرات و استفاده از عامل کوپلینگ مناسب، نقش اساسی در بهبود خواص مکانیکی و سختی کامپوزیت های اپوکسی دارد.

اثر هم افزایی و مکانیزم عملکرد انواع پرکننده های معدنی بر مقاومت گرمایی اپوکسی در برابر پیرشدگی گرمایی در فرکانس های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که رزین اپوکسی خالص پس از قرارگیری در دمای بالا دچار کاهش قابل توجهی در خواص گرمایی و دی الکتریک می شود، به ویژه در فرکانس های بالا عملکرد ضعیفی از خود نشان می دهد. در مقابل، کامپوزیت های هیبریدی حاوی پرکننده های میکرومتری شامل نیتريد آلومینیوم، اکسید آلومینیوم، نیتريد بور، و نانوپرکننده های هسته-پوسته ای $\text{TiO}_2 @ \text{SiO}_2$ ، حتی پس از ۳۰ روز پیرشدگی گرمایی در دمای بالا، پایداری گرمایی و الکتریکی مناسبی را حفظ می کنند [۵۴]. این بهبود عملکرد به خواصی مانند هدایت گرمایی بالای پرکننده های میکرومتری، پایداری شیمیایی بهتر، و نقش سد دی الکتریک نانوذرات $\text{TiO}_2 @ \text{SiO}_2$ نسبت داده می شود. همچنین، تأثیر مثبت این ترکیبات بر دینامیک پخت رزین اپوکسی نیز در بهبود خواص نهایی مؤثر بوده است. بنابراین، استفاده ترکیبی از پرکننده های معدنی میکرومتری و نانوذرات هسته-پوسته ای می تواند راهکاری مؤثر برای بهبود مقاومت گرمایی و عملکرد دی الکتریک رزین اپوکسی در شرایط کاری سخت و طولانی مدت باشد [۵۵].

در صنایع گوناگون، نیاز به کامپوزیت های پایدار و با عملکرد بالا روز به روز افزایش می یابد. با این حال، کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با الیاف سنتی با محدودیت هایی همچون آسیب پذیری در برابر عوامل محیطی، فعالیت زیست تخریب پذیری پایین و حساسیت به خستگی مواجه هستند. بنیان (Banyan) نام نوعی درخت است که به عنوان یکی از گونه های جنس فیکوس شناخته می شود [۷۹]. الیاف بنیان یا الیاف درخت بنیان از بخش های مختلف این درخت، مانند ساقه یا برگ ها استخراج می شوند. این الیاف طبیعی دارای ویژگی هایی مانند مقاومت مناسب، انعطاف پذیری و زیست تخریب پذیری هستند و به دلیل سازگاری با محیط زیست و خواص مکانیکی خوب، به عنوان مواد تقویت کننده در کامپوزیت های زیستی و سازگار با محیط کاربرد دارند. به طور خلاصه، الیاف بنیان نوعی الیاف طبیعی با منشأ گیاهی است که در ساخت کامپوزیت ها برای افزایش مقاومت مکانیکی و بهبود خواص زیستی مورد استفاده قرار می گیرد [۵۶].

پژوهشگران، کامپوزیت جدیدی بر پایه رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف بنیان (banyan fibers)، و نانوذرات آلومینا به مقدار سه درصد (۱۲ گرم) سنتز کردند تا استحکام مکانیکی و فعالیت زیستی آن بهبود یابد. تحلیل‌های آزمایشگاهی نشان‌دهنده افزایش چشمگیر در استحکام کششی، استحکام خمشی، انرژی ضربه و سختی نمونه حاوی ۱۲ گرم آلومینا است. آزمون‌های خستگی نیز دوام بالا و تحمل تنش ۴۰ مگاپاسکال به مدت ۱۴۰۰۰ سیکل را به دلیل بهبود چسبندگی بین الیاف و ماتریس و پراکندگی یکنواخت پرکننده تأیید می‌کنند [۵۷]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی ساختار یکپارچه نمونه را نشان می‌دهند و آزمایش‌های ضدباکتریایی نیز فعالیت قابل توجهی در برابر *Streptococcus pyogenes* با ایجاد منطقه بازدارندگی دوازده میلی‌متری و کاهش قابل ملاحظه تشکیل بیوفیلم به وسیله میکروسکوپ لیزری کانونی را اثبات می‌کنند. این نتایج، پتانسیل بالای این کامپوزیت برای کاربردهایی که نیازمند دوام مکانیکی و فعالیت زیستی هستند، از جمله در دستگاه‌های پزشکی و محیط‌های زیست‌فعال را به خوبی نشان می‌دهد [۵۸].

پوشش‌های فوق‌آب‌گریز فوتوترمال مقاوم با استفاده از فرآیند پلیمریزاسیون ساده و به کارگیری ذرات ساختارمند میکرو و نانو ذرات تیتانیوم نیتريد و نانو ذرات آلومینا به روش دو مرحله‌ای اسپری تهیه شد. نانوذرات TiN (تیتانیوم نیتريد) ترکیباتی با ساختار نانومتری از تیتانیوم نیتريد هستند که به دلیل خواص منحصر به فردی مانند رسانایی الکتریکی بالا، مقاومت مکانیکی و گرمایی زیاد، و پایداری شیمیایی بالا کاربردهای گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله پوشش‌های مقاوم، کاتالیزورها، و مواد فوتوترمال دارند [۵۹]. در پوشش‌های فوق‌آب‌گریز، نانوذرات TiN به دلیل خاصیت فوتوترمال خود می‌توانند با جذب نور و تبدیل آن به حرارت، فرآیندهای ضدیخ‌زدگی و یخ‌زدایی را بهبود بخشند و همچنین به افزایش پایداری مکانیکی و دوام پوشش کمک کنند. پوشش بهینه‌شده دارای زاویه تماس آب بسیار بالا و زاویه رولینگ بسیار پایین است که خواص فوق‌آب‌گریزی عالی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، این پوشش در برابر شرایط سختی مانند کندن چسب، سایش با سنباده و غوطه‌وری در محلول، پایداری مناسبی دارد و مقاومت خوبی در برابر فرسایش و خوردگی از خود نشان می‌دهد [۸۴]. خاصیت ضدیخ‌زدگی و یخ‌زدایی این پوشش نیز بسیار برجسته است که عمدتاً به دلیل پایداری مکانیکی بالا و اثر فوتوترمال نانوذرات TiN می‌باشد. مقدار امپدانس بسیار بالا در محلول نمکی نشان‌دهنده عملکرد حفاظتی عالی پوشش است. استراتژی طراحی بدون فلور این مطالعه، راهنمای مهمی برای کاربرد عملی و گسترده پوشش‌های فوق‌آب‌گریز مقاوم و دو ست‌دار محیط زیست فراهم می‌کند. بنابراین، این پوشش‌ها گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده‌های صنعتی در شرایط محیطی سخت و پایدار به‌شمار می‌روند [۶۰].

افزودن پرکننده آلومینا به کامپوزیت‌های پایه الیاف آریکا و رزین اپوکسی به‌طور مؤثری موجب بهبود خواص مکانیکی، از جمله استحکام کششی، سختی و مقاومت ضربه‌ای می‌شود. الیاف آریکا یا *Areca fiber*، نوعی الیاف طبیعی است که از برگ‌ها یا ساقه‌های گیاه آریکا (*Areca catechu*) استخراج می‌شود. این گیاه که به نام «هلی پالم» یا «نخل هلی» نیز شناخته می‌شود، در مناطق گرم سیری مانند جنوب و جنوب شرق آسیا رشد می‌کند [۵۶]. الیاف آریکا به دلیل ویژگی‌هایی مانند طبیعی و تجدیدپذیر بودن، سبک وزن بودن، مقاومت مناسب و قابلیت جذب رطوبت، در صنایع مختلف کاربرد دارد. از این الیاف معمولاً در تولید کامپوزیت‌های زیست‌محیطی، صنایع نساجی، ساخت طناب و سایر محصولات استفاده می‌شود. در کامپوزیت‌های طبیعی، الیاف آریکا به عنوان ماده تقویت‌کننده برای افزایش مقاومت مکانیکی و کاهش وزن مواد کاربرد دارد. در میان درصد‌های مختلف استفاده شده از آلومینا، ترکیب حاوی ۸ درصد وزنی Al_2O_3 بهترین عملکرد مکانیکی را نشان داد [۵۷]. این بهبود عمدتاً ناشی از پراکندگی یکنواخت ذرات آلومینا و انتقال مؤثر بار بین این ذرات و ماتریس اپوکسی بوده است. همچنین، بررسی طیف سنجی FTIR اثر اصلاح سطح الیاف آریکا را تأیید کرد و میکروگراف‌های SEM نیز شواهدی از شکست و رفتار سطحی کامپوزیت‌ها را ارائه دادند. نتایج این پژوهش می‌تواند زمینه‌ساز استفاده گسترده‌تر از کامپوزیت‌های طبیعی تقویت شده با پرکننده‌های معدنی در صنایع حساس به وزن و استحکام، مانند هوافضا و خودرو سازی باشد [۵۸]. افزایش در صدی قابل توجهی در استحکام کششی (تا ۲۶ درصد)، سختی (تا ۹ درصد) و مقاومت ضربه‌ای (تا ۶۷ درصد) نسبت به نمونه‌های فاقد پرکننده یا با درصد‌های پایین‌تر مشاهده شده است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که توزیع یکنواخت ذرات آلومینا و چسبندگی خوب بین الیاف و ماتریس باعث ارتقای چشمگیر خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها شده و این مواد را به گزینه‌ای مناسب، سبک وزن، مقاوم و اقتصادی برای کاربردهای صنعتی در زمینه‌هایی مانند هوافضا و خودروسازی تبدیل کرده است [۵۹].

کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نیتريد بور (BN)، اکسید آلومینوم (Al_2O_3)، گرافن کاهش‌یافته (r-GO)، اکسید آلومینوم (Al_2O_3)، سیدال-آ سکوربیک (L-AA) و رزین اپوکسی (EP) با طراحی ساختاری سنتز شد. ساخت نانو کامپوزیت BN-OH/ Al_2O_3 /EP و هواژل-r-GO@L-AA، و سپس فشرده‌سازی آن‌ها به روش پرس گرم، منجر به ساخت نانو کامپوزیتی از نوع هواژل شد. این طراحی منحصر به فرد موجب دستیابی به خواص رسانایی گرمایی بالا، استحکام کششی مطلوب و خواص عایق الکتریکی شد [۶۰]. استفاده ترکیبی از پرکننده‌های سرامیکی و ساختارهای گرافنی با چیدمان هدفمند، نشان داد که می‌توان خواص گرمایی و مکانیکی کامپوزیت‌های پلیمری را به شکل چشمگیری بهبود بخشید. بنابراین، این کامپوزیت‌ها گزینه‌ای بسیار مناسب برای کاربردهای نیازمند انتقال گرمایی بالا، استحکام مکانیکی و عایق الکتریکی به شمار می‌روند [۶۱].

تأثیر پارامترهای مهم شامل جهت‌گیری الیاف، توالی لایه‌ها و درصد وزنی نانوذرات اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با الیاف جوت، کنف و شیشه مورد بررسی با رزین اپوکسی قرار گرفت. با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، پارامترهای بهینه برای دستیابی به بالاترین استحکام کششی و ضربه‌ای تعیین شد [۶۲]. نتایج نشان داد که مدل ANN دقت بالاتری نسبت به RSM داشته و پیش‌بینی‌های نزدیک‌تری به مقادیر تجربی ارائه کرد. بهترین عملکرد مکانیکی در شرایط جهت‌گیری الیاف ۹۰ درجه، توالی سه لایه و ۵٪ وزنی Al_2O_3 مشاهده شد. این تحقیق بر اهمیت ویژه چیدمان الیاف و استفاده از پرکننده‌های نانو برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها تأکید داشته و اثربخشی مدل‌های هوشمند مانند ANN را در پیش‌بینی دقیق خواص مواد کامپوزیتی به خوبی نشان می‌دهد [۶۳].

افزایش آگاهی‌های اقتصادی و رشد قیمت‌های الیاف مصنوعی موجب افزایش نیاز به استفاده از الیاف طبیعی شده است. در سال‌های اخیر، تعداد فزاینده‌ای از مطالعات به اهمیت روزافزون کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف طبیعی اشاره دارند. بررسی رفتارهای گرمایی این الیاف برای استفاده مؤثر از آنها امری حیاتی است. نوآوری این تحقیق در بررسی تأثیر الیاف زیستی کمتر مورد استفاده مانند آکاسیا لوفلوئا (AL)، پروسوس جولیفلورا (PJ) و آکاسیا نیلوتیکا (AN) با مقادیر مختلف الیاف و افزودنی‌های سرامیکی همچون بور نیتريد شش‌ضلعی (h-BN)، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) و کاربید سیلیکون (SiC) بر رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی است [۶۴]. نمونه‌ها با روش دست‌چینی (Hand layup) ساخته شده و مقادیر الیاف و افزودنی‌ها به صورت کنترل شده تغییر داده شدند. نتایج نشان دادند که نمونه حاوی ۶ درصد وزنی الیاف پروسوس جولیفلورا همراه با ۱ درصد وزنی بور نیتريد دارای بالاترین رسانایی گرمایی به مقدار $1/52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ است. تصاویر SEM ساختار سطحی کامپوزیت و اتصال مناسب بین الیاف و ماتریس را نشان داد که نقش مهمی در بهبود رسانایی گرمایی دارد. این پژوهش گامی مهم در جهت توسعه مواد پایدار و کاربردی برای قطعات الکتریکی مانند پین‌های سوکت و تابلوهای توزیع برق محسوب می‌شود [۶۵].

کامپوزیت‌های اپوکسی کریستال مایع با پرکننده هیبریدی نانوالماس و آلومینای اصلاح‌شده ($AO^* @ND$) با استفاده از پلیمریازسیون سنتز شد. نتایج نشان داد که افزودن ۱۰ درصد وزنی از هیبرید نانو ذرات در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۶ ساعت، منجر به افزایش چشمگیر رسانایی گرمایی به مقدار $0/99 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ و استحکام شکست دی‌الکتریک به مقدار $75/2 \text{ kV/mm}$ نسبت به اپوکسی خالص شد [۶۶]. این بهبود همزمان با استفاده از شبیه‌سازی و داده‌های تجربی مورد تحلیل

قرار گرفت. این تحقیق افق جدیدی برای توسعه مواد کامپوزیتی اپوکسی با عملکرد بالا به منظور استفاده در بسته‌بندی و کپسوله‌سازی نسل جدیدی از تجهیزات برای تبدیل انرژی الکتریکی با توان بالا فراهم می‌کند [۶۷].

پژوهشگران، اثر کاربرد چسب‌های اپوکسی اصلاح شده با نانوذرات در ترمیم ترک‌های بتن ساختمانی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که چسب اپوکسی اصلاح شده با ۲ درصد نانو ذرات آلومینا، عملکرد بهتری نسبت به سایر نانو مواد داشت. پس از ترمیم نمونه‌های ترک‌دار بتن و انجام آزمایش‌ها، مشخص شد که مقاومت فشاری نمونه‌های ترمیم‌شده به مقدار ۱۹۳/۴۷ نیوتن بر میلی‌متر مربع حفظ می‌شود [۶۸]. همچنین، پس از چندین چرخه یخ‌زدگی و ذوب، مقاومت خمشی نمونه‌ها همچنان نزدیک به مقدار ۸۰ مگاپاسکال باقی ماند که نشان‌دهنده اثر مطلوب و پایدار چسب اپوکسی اصلاح شده با نانوذرات در ترمیم ترک‌ها است. این نتایج اهمیت استفاده از مواد نانو اصلاح‌شده را در بهبود خواص مکانیکی و دوام سازه‌های بتنی ترمیم‌شده تأیید می‌کند. همچنین در این پژوهش از نانو ذرات کربنات کلسیم و نانو ذرات سیلیکا هم استفاده شد، ولی نتایج چسبندگی نانو ذرات آلومینا برای بهبود ترک‌های بتنی بهتر بود [۶۹].

کامپوزیت‌های نانو هیبریدی حاوی نانوذرات گرافن و نانو آلومینا با درصدهای وزنی مختلف در ماتریس رزین اپوکسی تهیه و خواص مکانیکی، گرمایی و ساختاری آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت [۷۰]. نتایج نشان داد که نانو کامپوزیت حاوی ۱/۵ درصد وزنی از نانو صفحات گرافن و ۸/۵ درصد وزنی از نانو آلومینا بهترین عملکرد را از نظر خواص مکانیکی و گرمایی ارائه می‌دهد. در این ترکیب بهینه، مقاومت کششی به ۱۲۱/۴ مگاپاسکال رسید که نسبت به نمونه فاقد گرافن، افزایش ۱۰۱/۷۶ درصدی داشت و مدول کششی آن نیز با رسیدن به به مقدار ۶/۷۸ گیگاپاسکال، بهبود چشمگیری به مقدار ۲۰۹/۵۸ درصدی را از خود نشان داد [۷۱]. همچنین مقاومت خمشی و مدول خمشی به ترتیب ۹۱/۴۱ و ۱۲۲/۲۲ درصد افزایش یافتند. مقاومت ضربه‌ای این نانو کامپوزیت به ۱۳/۳ کیلوژول بر متر مربع رسید که نسبت به نمونه مرجع، رشد ۱۷۱/۴۲ درصدی داشت و سختی آن نیز به مقدار ۹۴/۲۱ در بالاترین سطح قرار گرفت. آزمون‌های گرمایی نشان دادند که افزودن نانوذرات گرافن، پایداری گرمایی کامپوزیت را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در مجموع، نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده با گرافن و آلومینا خواص مکانیکی، گرمایی و ساختاری قابل توجهی از خود نشان داده‌اند و پتانسیل بالایی برای کاربرد در صنایع گوناگون دارند [۶۰].

با ارائه روشی ساده برای اصلاح نانولوله‌های نیتريد بور (BNNT) از طريق گروه‌های آمين حاوی پيرن (pyrene)، روی سطح آن‌ها، موفق به بهبود چشمگیر پراکندگی و سازگاری بين نیتريد بور و ماتريس پليمر اپوکسی شد. حضور گروه‌های آميني در پيرن باعث کاهش کشش سطحی ذرات اصلاح شده و افزایش قابلیت پخش پذیری آن در حلال‌ها حتی در غلظت‌های بالا گردید. افزودن تنها ۱ درصد وزنی از ذرات اصلاح شده، به همراه نانو ذرات آلومینا به کامپوزیت‌های اپوکسی، باعث افزایش قابل توجهی در خواص مکانیکی و گرمایی نمونه‌ها شد [۶۱]. اصلاح سطح نانو ذرات منجر به بهبود کرنش کششی تا ۳۳/۱ درصد، تنش کششی به مقدار ۱۷۵/۸ درصد و رسانایی گرمایی در به مقدار ۶۲/۳ درصد بهبود یافت. این افزایش عملکرد گرمایی به دلیل ایجاد کانال‌های هدایتی گرمایی توسط نانولوله‌های نیتريد بور در میان ذرات آلومینا می‌باشد. بنابراین، روش اصلاح و استفاده از ذرات اصلاح شده در کامپوزیت‌های اپوکسی، رویکردی مؤثر برای ارتقاء خواص مکانیکی و گرمایی این مواد در کاربردهای پیشرفته مهندسی محسوب می‌شود [۶۲].

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات آلومینا اصلاح شده با گروه‌های سیلانی، به کامپوزیت اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن به طور مؤثری موجب بهبود خواص مکانیکی و گرمایی این مواد شده است. بررسی‌های انجام شده با استفاده از آزمون‌های کشش، سختی سنجی، ضربه و آنالیز گرمایی نشان داد که نمونه حاوی ۲ درصد وزنی آلومینای اصلاح شده بهترین عملکرد را داشته و به ترتیب با افزایش حدود ۷۴ درصدی استحکام کششی، ۳۶ درصدی چقرمگی شکست و ۲۸ درصدی سختی نسبت به نمونه کامپوزیت اصلاح نشده، عملکرد قابل توجهی از خود نشان داده است [۶۳]. همچنین، تحلیل‌های آماری با استفاده از روش ANOVA و رگرسیون خطی، اعتبار و دقت نتایج به دست آمده را تأیید می‌کنند. در مجموع، استفاده از نانوذرات آلومینای اصلاح شده به عنوان ماده تقویت کننده در کامپوزیت‌های الیاف کربن-اپوکسی، رویکردی مؤثر برای بهبود خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و عملکرد محیطی این کامپوزیت‌ها در کاربردهای مهندسی محسوب می‌شود [۶۴].

رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. اثر نانو ذرات آلومینا و زیر کونیوم اکساید (اصلاح شده با اولئیک اسید)، بر ویژگی‌های ساختاری، مورفولوژیکی و شیمیایی این نانو ذرات قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش‌های نانوکامپوزیتی هیبریدی با افزودن مقادیر مختلفی از نانو پرکننده‌ها به رزین اپوکسی و عامل دار کردن آن با اسید اولئیک، بر روی نمونه‌های فولاد نرم اعمال شد [۶۵]. افزایش غلظت هیبرید نانوذرات منجر به کاهش چشمگیر تخلخل سطحی پوشش‌ها از ۱/۱۰۶ به ۰/۳۱۹ میکرومتر گردید. همچنین، این پوشش‌ها دارای سختی ۲۹۲ مگاپاسکال، مدول یانگ ۲/۳۴ مگاپاسکال، زبری سطحی ۱/۲۳۷ نانومتر و زاویه تماس حداکثر ۸۲/۹۲ درجه را از خود نشان دادند که بیانگر افزایش استحکام مکانیکی و خاصیت آب‌گریزی است [۶۶]. آزمون‌های الکتروشیمیایی نشان دادند که پوشش‌های نانوکامپوزیتی مقاومت به خوردگی قابل توجهی در محیط‌های شور و آب دریا از خود نشان می‌دهند و

به بازدهی خوردگی به ترتیب ۸۸/۹۵ در صد و ۸۲/۳۶ در صد دست یافتند. این نتایج، پتانسیل بالای پوشش‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی تقویت‌شده با را به عنوان یک گزینه پیشرفته برای کاربردهای ضد خوردگی نشان می‌دهد [۶۷].

مقاومت گرمایی بین سطحی نقش مهمی در تعیین رسانایی گرمایی کامپوزیت‌ها دارد. پژوهش‌های پیشین به بررسی سیستم‌های پرکننده هیبریدی و اصلاح سطح نانوذرات آلومینا برای افزایش رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های پلیمری پرداخته‌اند. در این مطالعه، پرکننده‌های آلومینا با خاصیت اسیدی بسیار بالا از طریق اصلاح سطح آلومینای خام با استفاده از اسید سیتریک و گلوکز تهیه شدند [۳۴]. این آلومیناهای اصلاح شده در چسب اپوکسی پخت نشده (uncured) به میزان ۸۰ در صد وزنی نفوذ داده شدند. نتایج نشان داد که رسانایی گرمایی کامپوزیت‌های حاوی آلومینای اصلاح شده با گلوکز و اسید سیتریک به ترتیب تا ۱۹/۴ در صد و ۳۵/۹ درصد بیشتر از نمونه‌های حاوی آلومینای خام در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بود [۳۵]. تحلیل‌های تجربی و محاسبات نظری نشان داد که وجود گروه‌های قطبی روی سطح پرکننده موجب تشکیل پیوند هیدروژنی بین فیلر و رزین اپوکسی شده و مقاومت گرمایی بین‌سطحی را کاهش می‌دهد؛ این اثر برای گروه کربوکسیل (COOH) بیشترین مقدار را داشت. جهت اثبات کاربرد عملی این روش اصلاح، آزمون عملکرد گرمایی انجام شد که نشان داد کامپوزیت مبتنی بر آلومینای اصلاح شده با اسید سیتریک در لامپ LED عملکرد مدیریت گرمایی بسیار بهتری نسبت به کامپوزیت حاوی آلومینای خام ارائه می‌دهد [۶۸].

با توجه به نیاز فزاینده به مواد سبک و دوست‌دار محیط زیست در صنعت خودروسازی، استفاده از الیاف طبیعی مانند کنف (kenaf) به عنوان جایگزینی مناسب برای قطعات خودرو مورد توجه قرار گرفته است [۶۵]. خاکستر بادی یک ماده‌ی پودری و ریزدانه است که به عنوان محصول جانبی از احتراق سوخت‌های فسیلی (به‌ویژه زغال سنگ) در نیروگاه‌های گرمایی تولید می‌شود. این ماده از طریق گازهای خروجی دودکش‌ها به بیرون منتقل شده و سپس توسط فیلترها یا سیستم‌های جمع‌آوری، بازیابی می‌شود [۶۶]. نتایج این پژوهش نشان داد که تقویت کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی با الیاف کنف، خاکستر بادی (fly ash) و نانوفیلر آلومینا (Al₂O₃) موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و ترمومکانیکی این مواد می‌گردد. این بهبود عملکرد عمدتاً ناشی از پیوند بین‌سطحی قوی‌تر و توزیع یکنواخت نانوفیلرها در ماتریس پلیمری است [۶۷]. در این میان، نانوفیلرهای آلومینا اثرگذاری بیشتری نسبت به خاکستر بادی بر خواص نهایی کامپوزیت‌ها داشتند. در مجموع، نتایج این تحقیق اثبات می‌کند که

استفاده ترکیبی از الیاف کنف با خاکستر بادی و نانو پرکننده آلومینا، روشی مؤثر برای تولید کامپوزیت‌های پیشرفته با عملکرد بالا در کاربردهای خودروبی می‌باشد [۶۸].

کامپوزیت‌های پلیمری به دلیل خواص رسانایی گرمایی بالا و عایق الکتریکی، به‌طور گسترده‌ای در مدیریت گرمایی کاربرد دارند. با ایجاد یک شبکه سه‌بعدی پیوسته از آلومینا از طریق پوشش‌دهی فوم پلی‌یورتان و حذف گرمایی آن، ساختار مستحکم و مداومی از آلومینا شکل گرفت که سپس با نفوذ رزین اپوکسی پر شد [۶۹]. کامپوزیت حاصل در میزان پرکننده ۲۶/۸ درصد حجمی، رسانایی گرمایی چشمگیر ۲/۴۴ وات بر متر کلین را نشان داد که نسبت به کامپوزیت‌های دارای پرکننده‌های پراکنده به صورت تصادفی ۴۰۰ درصد و نسبت به رزین اپوکسی خالص ۱۱۸۰ درصد بهبود داشت [۷]. تصویربرداری گرمایی مادون قرمز نیز کارایی بالای این کامپوزیت‌ها در پراکندگی سریع و یکنواخت گرما را تأیید کرد. در مجموع، روش ارائه شده در این مطالعه راهکاری مؤثر برای تولید کامپوزیت‌های پلیمری با رسانایی گرمایی بسیار بالا و عایق الکتریکی مطلوب به منظور کاربردهای پیشرفته در مدیریت گرمایی دستگاه‌های الکترونیکی است [۷۱].

تضمین پایداری سازه‌های کامپوزیتی در محیط دریایی بسیار حیاتی است. شرایط سخت و خورنده‌ی محیط دریایی چالش‌های منحصر به فردی را ایجاد می‌کند که نگهداری را به اولویتی مهم تبدیل می‌کند. در این پژوهش، تأثیر نانو کامپوزیت ساخته شده در آب دریا بر خواص مکانیکی، ساختاری و گرمایی نانو کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بررسی شد [۶۴]. کامپوزیت‌ها با استفاده از روش VARTM و با ۲ درصد نانو ذرات آلومینا و ۲ درصد نانو ذرات تیتانیوم دی اکساید تولید شدند. فرآیند پیر شدن در محیط آب دریا در دمای اتاق به مدت ۱۲۰، ۲۴۰ و ۳۶۰ روز انجام شد. VARTM یک روش قالب‌گیری برای تولید قطعات کامپوزیتی است. در این روش، رزین با کمک خلا (وکیوم) به داخل لایه‌های الیاف تزریق می‌شود و پس از سخت شدن، قطعه نهایی شکل می‌گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که، نانو ذرات تیتانیوم دی اکساید می‌تواند مقاومت کششی را به میزان ۱۰/۳۳ درصد، انرژی ضربه را ۶/۸ درصد نسبت به کامپوزیت خالص حفظ کند [۶۵]. همچنین در حضور نانو ذرات آلومینا جذب آب را به ۰/۵۹۴ درصد کاهش داده و مقاومت کششی را ۶/۶۷ درصد حفظ کند. نتایج آزمون رسانایی گرمایی که کامپوزیت حاوی نانو ذرات تیتانیوم دی اکساید کمترین افزایش ۱۴/۶۶ درصد را نشان داد [۶۶].

نمونه‌های نانو کامپوزیتی از رزین اپوکسی با مقادیر مختلف نانوالیاف آلومینا سنتز شد. ذرات نانو الیاف آلومینا با گروه‌های عاملی اپوکسی پروپیل اصلاح سطح شدند. با افزودن تنها ۰/۲ درصد وزنی نانو آلومینا، مقاومت خمشی نهایی از ۴۱ به ۷۱ مگاپاسکال و مدول الاستیک از ۰/۶۴۳ به ۰/۸۶۲ گیگاپاسکال افزایش یافت [۶۶]. همچنین رابطه‌ی وابستگی خواص مکانیکی نمونه‌ها به میزان

افزودنی بررسی گردید و مشخص شد که با افزایش مقدار نانوالیاف، دمای انتقال شیشه‌ای کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی تأثیر متقابل بین گروه‌های عملکردی نانوالیاف و رزین است. توزیع یکنواخت و پیوسته نانوالیاف، منجر به بیشینه تقویت مکانیکی شده و فراتر رفتن از این مقدار باعث کلوخه‌ای شدن نانوالیاف و کاهش مقاومت آن می‌گردد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند راهنمای موثری برای بهبود خواص مکانیکی رزین‌های اپوکسی در مواد کامپوزیتی و ترکیبات قالب‌گیری پلیمر باشد [۶۷].

پوشش اپوکسی تقویت شده با نانو آلومینا اصلاح شده با پلی اتیلن ایمین سنتز شد. پوشش‌های اپوکسی به عنوان روشی ساده و اقتصادی برای محافظت از آلیاژهای آلومینیوم در محیط‌های دریایی کاربرد دارند. اما پوشش اپوکسی خالص حفاظت طولانی مدت را فراهم نمی‌کند. نانو ذرات آلومینا با پلی اتیلن ایمین اصلاح شدند و به پوشش اپوکسی افزوده شدند [۶۸]. طیف سنجی مادون قرمز نشان داد که زنجیره مولکولی پلی اتیلن ایمین به سطح نانو آلومینا متصل شده است نانو ذرات به طور یکنواخت در پوشش پخش شدند. نتایج این تحقیق نشان داد که، مقاومت پوشش نانوکامپوزیت اصلاح شده ده برابر پوشش اپوکسی خالص پس از سه روز غوطه‌وری در محلول نمک ۳/۵ درصد افزایش یافته است. بررسی مورفولوژی سطح، کاهش قابل توجه محصولات خوردگی را در نمونه‌های پوشش داده شده با نانوکامپوزیت اصلاح شده نشان داد. این پوشش نانوکامپوزیتی اصلاح شده عملکرد ضد خوردگی بسیار خوبی دارد [۶۹-۷۱]. در جدول ۱، مهمترین نکات در پیشرفت‌های اخیر در نانو کامپوزیت‌های اپوکسی اصلاح شده با نانو ذرات آلومینا جمع‌آوری شده است.

جدول ۱. مهمترین نکات در پیشرفت های اخیر در نانو کامپوزیت های اپوکسی اصلاح شده با نانو ذرات آلومینا

Table 1. Key Highlights of Recent Advances in Epoxy Nanocomposites Containing Modified Alumina Nanoparticles

Sample Name	Year	Modified Materials	Synthesis Method	Surface Modifier	Application	Main Properties	Limitations	References
NaOH-Alumina-Pineapple Leaf Fibers-Epoxy	2025	NaOH, Alumina, Pineapple Leaf Fibers	Mechanical mixing & curing	NaOH	Aerospace	Modulus +12%, Tensile +15%	Uneven dispersion at high doses	[33]
Epoxy-NaOH-Resole Fibers	2025	NaOH, Resole	Mixing & curing	NaOH	Automotive	Increased hardness, Thermal stability up to 120°C	Moisture sensitivity initially	[53]
Epoxy-Alumina-Acuminata Banana Fibers	2024	Alumina, Banana Fibers	Mixing & curing	Silane	Lightweight structures	Modulus +10%, Tensile strength +12%	Limited thermal stability	[55]
Epoxy-Alumina-Paederia foetida Fibers	2024	Alumina, Natural Fibers	Mixing & curing	Silane	Structural materials	Modulus +11%, Tensile strength +13%	Insufficient dispersion	[59]
Epoxy-Novolac-Alumina-Block Copolymer	2024	Novolac, Alumina, Block Polymer	Thermal mixing	Titanate coupling agent	Coatings & Adhesion	Adhesion +20%, Surface hardness +15%	Temperature control required	[61]
Epoxy-Alumina-Sugarcane Bagasse	2024	Alumina, Bagasse	Mixing & curing	Silane	Automotive materials	Modulus +9%, Thermal stability +10%	Limited dispersion	[64]
Epoxy-Alumina-Boron Nitride	2024	Alumina, BN	Mixing	Amino-silane	Electronics, Thermal management	Thermal conductivity 2.5 W/mK	High material cost	[66]
Epoxy-Polyester-Nano Alumina	2025	Nano Alumina, Nano Clay, TiO ₂	Mixing & curing	Silane	Adhesion & Structural	Adhesion +15%, Modulus +10%	Requires full dispersion	[68]
Bio-based Epoxy DGEMF-Nano Alumina	2025	Nano Alumina	Mixing & curing	Silane	Bio-based materials	Thermal conductivity +20%	Curing temperature limited	[70]
Epoxy-Silane Modified Nano Alumina	2025	Nano Alumina, Silane	Mixing & curing	Silane	Structural	Modulus +12%, Tensile +15%	Moisture control essential	[72]
Epoxy-Alumina (vs Nano SiO ₂ & TiO ₂)	2025	Alumina, Nano SiO ₂ , TiO ₂	Mixing & curing	Silane	Electronics	Thermal resistance +18%, Dielectric improved	Higher cost	[74]
Epoxy-Alumina-Banyan Fibers	2025	Alumina, Banyan Fibers	Mixing	Amino-silane	Antibacterial materials	Antibacterial, Modulus +10%	Dispersion must be controlled	[54]
Epoxy-Alumina-Titanium Nitride	2025	Alumina, TiN	Mixing & curing	Phosphate coupling agent	Superhydrophobic coatings	Superhydrophobic surface	High TiN cost	[79]
Epoxy-Alumina-Arka Fibers	2025	Alumina, Arka Fibers	Mixing	Silane	Structural	Increased modulus & good dispersion	Full dispersion required	[57]
Epoxy-Alumina-Boron Nitride-Reduced Graphene Oxide-Ascorbic Acid	2025	Alumina, BN, rGO	Mixing & curing	Ascorbic Acid	Electronics & Thermal	High thermal conductivity, Modulus +15%, Electrical insulation	rGO dispersion needs control	[59]
Epoxy-Alumina-Jute, Hemp & Glass Fibers	2025	Alumina, Natural & Glass Fibers	Mixing & curing	Silane	Structural	Modulus +12%, Improved fiber arrangement	Uniform dispersion challenging	[56]
Biofibers + Ceramic Fillers (BN, Al ₂ O ₃ , SiC)	2025	Nano Alumina, BN, Al ₂ O ₃ , SiC	Mixing	Silane	Thermal conductivity	Thermal conductivity +25%	Uniform dispersion essential	[60]
Epoxy-Alumina-Concrete	2025	Alumina	Mixing & curing	Silane	Construction	Crack reduction 15%	High particle loading increases viscosity	[62]

Epoxy-Nano Alumina-Diamond	2025	Nano Alumina, Nano Diamond	Mechanical mixing	Silane	Electronics	High-power energy conversion	High diamond cost	[64]
Epoxy-Nano Alumina-Graphene Sheets	2024	Nano Alumina, Graphene	Mixing	Silane	Mechanical & Thermal	Modulus +20%, Thermal conductivity +18%	Uniform graphene dispersion	[66]
Epoxy-Alumina-Silane-Carbon Fibers	2024	Alumina, Silane, Carbon Fibers	Mixing & curing	Silane	Structural & Thermal	Modulus +15%, Thermal stability +12%	Moisture control required	[68]
Epoxy-Alumina-Boron Nitride	2024	Alumina, BN	Mixing	Amino-silane	Thermal management	Thermal conductivity +22%	BN cost high	[70]
Epoxy-Alumina-Boron Nitride Nanotubes Modified with Amino Groups	2024	Alumina, BNNT	Mixing & curing	Amino-functional groups	Structural & Thermal	Modulus +18%, Thermal conductivity +20%	Dispersion challenging	[61]
Epoxy-Nano Alumina-Zirconia-Oleic Acid	2025	Nano Alumina, ZrO ₂	Mixing & curing	Oleic Acid	Anti-corrosion coatings	Corrosion rate reduced 40%	Drying before curing essential	[63]
Epoxy-Nano Alumina-Citric Acid-Glucose	2024	Nano Alumina, Citric Acid, Glucose	Mixing	Citric Acid	Thermal materials	Thermal conductivity +15%	Dispersion needs control	[65]
Epoxy-Nano Alumina-Fly Ash	2023	Nano Alumina, Fly Ash	Mixing & curing	Silane	Automotive	Modulus +10%	Uneven dispersion at high load	[34]
Epoxy-Nano Alumina-Epoxy-Polyurethane	2024	Nano Alumina, Epoxy, Polyurethane	Mixing & curing	Silane	Electronic thermal management	Heat capacity +12%	Higher viscosity	[35]
Epoxy-Nano Alumina-TiO ₂ -Glass Fibers	2024	Nano Alumina, TiO ₂ , Glass Fibers	Mixing & curing	Silane	Anti-corrosion coatings	Water penetration reduced 30%	TiO ₂ dispersion must be controlled	[65]
Epoxy-Nano Alumina-Epoxy Propyl Functionalized Fibers	2023	Nano Alumina Fibers	Mixing & curing	Epoxy Propyl	Polymer molding	Modulus +14%	Uniform dispersion required	[69]
Epoxy-Nano Alumina-Polyethyleneimine	2023	Nano Alumina, PEI	Mixing & curing	Polyethyleneimine	Anti-corrosion coatings	Corrosion rate reduced 35%	Moisture sensitive initially	[71]

بررسی مجموعه مطالعات انجام شده بر روی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی آلومینا و ترکیبات مختلف آن نشان می‌دهد که افزودن این پرکننده‌ها به‌طور قابل توجهی خواص مکانیکی، گرمایی، چسبندگی و مقاومت خوردگی رزین‌های اپوکسی را بهبود می‌بخشد. ترکیب آلومینا با نانوذراتی نظیر بورون نیتريد، تیتانیوم دی‌اکساید، گرافن اکساید کاهش یافته و نانوالماس موجب دستیابی به ویژگی‌های چندمنظوره مانند رسانایی گرمایی بالا، عایق الکتریکی، خواص ضد خوردگی و حتی آب‌گریزی سطحی شده است. از سوی دیگر، استفاده از الیاف طبیعی نظیر برگ آناناس، موز، جوت و کنف ضمن بهبود استحکام مکانیکی، رویکردی پایدار و زیست‌سازگار برای تولید مواد کامپوزیتی ارائه می‌دهد. در مجموع، نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که این نانوکامپوزیت‌ها می‌توانند در حوزه‌های مختلفی همچون صنایع خودروسازی، مدیریت حرارتی تجهیزات الکترونیکی، پوشش‌های ضد خوردگی و حتی ساخت بتن‌های پیشرفته کاربردهای گسترده‌ای پیدا کنند. نقطه قوت اصلی این مطالعات در تنوع بالای ترکیبات، ارتقاء هم‌زمان چند خاصیت کلیدی، ارائه مسیرهای بالقوه برای کاربرد صنعتی و استفاده از منابع طبیعی و زیست‌پایه نهفته است. با این

حال، برخی نقاط ضعف نیز قابل توجه‌اند. در بسیاری از مطالعات، داده‌های عددی و تحلیل‌های کمی دقیق محدود بوده و دوام و پایداری طولانی مدت این مواد در شرایط واقعی محیطی کمتر بررسی شده است. همچنین اغلب پژوهش‌ها در مقیاس آزمایشگاهی انجام گرفته و ارزیابی صنعتی شدن این ترکیبات در سطح وسیع کمتر مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، مقایسه نظام‌مند بین ترکیبات و روش‌های مختلف در قالب یک چارچوب یکپارچه هنوز نیازمند کار پژوهشی بیشتری است. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که با انتخاب بهینه ترکیب پرکننده‌ها، اصلاح سطحی مناسب و بررسی جامع شرایط عملیاتی می‌توان نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-آلومینا را به‌عنوان موادی چندکاربردی و با عملکرد بالا برای طیف وسیعی از صنایع معرفی کرد.

۸- چالش‌های فعلی و نقاط قوت و ضعف تحقیقات قبلی

پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که افزودن نانوگرافن و نانوذرات آلومینا به کامپوزیت‌های اپوکسی می‌تواند خواص مکانیکی، حرارتی، رسانایی و مقاومت خوردگی این مواد را بهبود دهد. افزودن نانوذرات آلومینا اصلاح شده به ویژه باعث افزایش چسبندگی بین ماتریس رزینی و الیاف طبیعی مانند موز و آناناس، کاهش حفره‌ها، افزایش انتقال بار و بهبود خواص مکانیکی می‌شود. اصلاح سطح نانوذرات با عوامل شیمیایی مانند سیلان یا ایندول و اصلاح سطح الیاف با هیدروکسید سدیم باعث افزایش سطح تماس، حذف ناخالصی‌ها و بهبود ترشوندگی ماتریس شده و به ارتقای مورفولوژی و عملکرد نهایی کامپوزیت کمک می‌کند. پراکندگی یکنواخت نانوذرات نقش مهمی در بهبود خواص حرارتی، دی‌الکتریک و پایداری ساختار در شرایط محیطی سخت ایفا می‌کند، در حالی که نمونه‌های بدون اصلاح یا با نانولوله‌های کربنی ممکن است دچار خوشه‌سازی شوند که عملکرد کامپوزیت را کاهش می‌دهد. نقاط قوت مطالعات گذشته شامل توانایی نانوگرافن و نانوالومینا در افزایش استحکام کششی، مدول الاستیک، مقاومت ضربه‌ای، سختی سطحی، رسانایی حرارتی و مقاومت به سایش و خوردگی، افزایش پایداری ساختاری و توسعه کاربردهای صنعتی بالقوه است. علاوه بر این، استفاده از مواد زیست‌پایه و طراحی هیبریدی ترکیبات موجب توسعه کامپوزیت‌های پایدار و دوستانه محیط زیست شده است. با این حال، چالش‌ها و محدودیت‌ها نیز مشهود است. از جمله این چالش‌ها می‌توان به پراکندگی ناکافی نانوگرافن در ماتریس رزینی، تجمع و خوشه‌سازی ذرات، تداخل با خواص الکتریکی و حرارتی در غلظت‌های بالا، کمبود داده‌های بلندمدت درباره پایداری در شرایط محیطی واقعی، عدم مقایسه جامع میان ترکیبات مختلف و تمرکز غالباً آزمایشگاهی بر نمونه‌های کوچک اشاره کرد. شناسایی این نقاط ضعف، مسیرهای پژوهشی آینده را روشن می‌کند و فرصت‌هایی برای بهینه‌سازی ترکیب نانوذرات، اصلاح سطح و طراحی ساختار کامپوزیت‌ها فراهم می‌آورد. مسیرهای تحقیقاتی آینده شامل توسعه روش‌های نوین اصلاح سطح نانوذرات برای افزایش پراکندگی و چسبندگی، طراحی ساختارهای هیبریدی با ترکیب نانوگرافن و نانوالومینا، بررسی عملکرد بلندمدت در محیط‌های خورنده و دماهای بالا، استفاده از مدل‌سازی چندمقیاسی و هوش مصنوعی برای پیش‌بینی

دقیق خواص، و بهینه‌سازی غلظت و نوع نانوذرات برای دستیابی به خواص چندمنظوره است. این رویکردها می‌توانند به بهبود عملکرد مکانیکی، حرارتی و زیستی کامپوزیت‌ها، افزایش دوام و توسعه کاربردهای صنعتی و پایدار منجر شوند و ارزش علمی و کاربردی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی را به‌طور قابل توجهی افزایش دهند.

۹- نتیجه گیری

افزودن نانوذرات آلومینای اصلاح شده به کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف طبیعی باعث بهبود چشمگیر خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی این مواد می‌شود. اصلاح سطح نانوذرات و الیاف با استفاده از عوامل شیمیایی مانند سیلان، ایندول یا هیدروکسید سدیم موجب افزایش چسبندگی بین ماتریس و الیاف، بهبود پراکندگی ذرات و کاهش تخلخل در ساختار کامپوزیت می‌گردد. این اثرات به نوبه خود منجر به افزایش استحکام کششی، مقاومت ضربه‌ای، سختی سطحی، استحکام برشی و مدول ارتجاعی کامپوزیت‌ها می‌شود. غلظت بهینه نانوذرات نقش مهمی در دستیابی به خواص مطلوب دارد؛ افزودن مقادیر مناسب موجب تقویت انتقال تنش و محدودسازی حرکت زنجیره‌های پلیمری شده و مدول ذخیره و ظرفیت ذخیره انرژی را افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش بیش از حد نانوذرات باعث تجمع ذرات و کاهش عملکرد مکانیکی و حرارتی می‌شود. نانوذرات آلومینا همچنین نقش مانع حرارتی را ایفا کرده و باعث کاهش نرخ تخریب حرارتی و افزایش دمای تخریب کامپوزیت می‌شوند. این اثر به افزایش پایداری حرارتی و تأخیر در تجزیه ساختار در دماهای بالا منجر می‌شود و همچنین درصد ذغال باقی‌مانده را افزایش می‌دهد که ایمنی حرارتی مواد را ارتقا می‌دهد. ترکیب نانوذرات آلومینا با الیاف طبیعی اصلاح شده، علاوه بر تقویت خواص مکانیکی و حرارتی، باعث افزایش پایداری ساختاری در شرایط محیطی سخت، کاهش نفوذپذیری آب و مقاومت بهتر در برابر خوردگی و سایش می‌شود. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که طراحی هوشمند ساختار کامپوزیت، نحوه توزیع نانوذرات و نوع عامل اصلاح‌کننده، از عوامل کلیدی در عملکرد نهایی این مواد هستند. استفاده از ترکیب‌های هیبریدی نانوذرات و الیاف طبیعی، به ویژه در کنار اصلاح شیمیایی سطح، راهکار مؤثری برای توسعه مواد سبک، مقاوم و چندکاره با عملکرد بالا ارائه می‌دهد. این مواد قابلیت کاربرد در صنایع گوناگون و پوشش‌های پیشرفته را دارند و می‌توانند جایگزین مواد سنتی و پایه نفتی در مسیر توسعه فناوری‌های پایدار و دوستدار محیط زیست شوند. در نهایت، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که به‌کارگیری نانوذرات آلومینا و اصلاح سطح آن‌ها در کامپوزیت‌های اپوکسی، ضمن ارتقاء خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی، امکان دستیابی به مواد پایدار و مقاوم در برابر شرایط محیطی مختلف را فراهم می‌کند و می‌تواند نقش مهمی در پیشرفت فناوری مواد و بهبود عملکرد قطعات و سازه‌های مهندسی ایفا نماید.

References

[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.

- [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
- [3] Abbasi, H., Hashemizadeh, A., Navaie, F. (2023). Evaluation of the efficiency of polymers, polymeric nanoparticles, and surfactant additives in improving the rheology and loss control of drilling fluids: A review. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(129), 7-25.
- [4] Mousavi, S. A., Khademzadeh Yeganeh, J. (2023). Effect of nanoclay and its hybrid with carbon black on physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(126), 66-81.
- [5] Masoudi, M., Salem, S. (2025). Simultaneous removal of chromium (VI) and methylene blue by nano titanium dioxide/graphene oxide/carbon nanotube photocatalyst and P25. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(137), 75-87.
- [6] Karami, M. H., Moeini Jazni, O., & Bagheri, A. (2025). Epoxy nanocomposites reinforced with metal-organic framework nanoparticles: Study and analysis of morphology, mechanical properties, and thermal degradation. *Iran Polymer Technology, Research and Development*, 9(4),51-64.
- [7] Saputri, D. D., Saraswati, T. E., Raharjo, W. W., & Anggoro, P. A. (2024). 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.
- [8] Bai, G., Niu, C., Lang, L., Liang, X., Gu, W., Wei, Z., Chen, K., Bohinc, K., & Guo, X. (2024). 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.
- [9] Klinthoophamrong, N., Thanawan, S., Schrodj, G., Mougine, 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.
- [10] Gharieh, A., Sharifian, A., & Dadkhah, S. (2025). Enhanced long-term corrosion resistance and self-healing of epoxy coating with HQ-Zn-PA nanocomposite. *Scientific Reports*, 15, 8154.
- [11] Zhang, L., Yang, D., Li, Z., Zhai, Z., Li, X., de La Vega, J., & Wang, D.-Y. (2024). 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.
- [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.

- [13] Sengottaiyan, S., Subbarayan, S., Natarajan, R., & Gurunathan, V. (2025). Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Advance online publication.
- [14] Shariatmadar, M., Gholamhosseini, P., Abdorrezaee, Z., Ghorbanzadeh, S., Feizollahi, S., Hosseini, F. S., Azad Shahraki, F., & Mahdavian, M. (2024). Leveraging polyaniline-grafted micaceous iron oxide as a dual active-barrier pigment for anti-corrosion polymer coatings. *Surface and Coatings Technology*, 479, 130501.
- [15] Zhong, F., Yang, X., Chen, C., Wang, M., Wang, B., Xia, H., & Song, J. (2025). 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.
- [16] Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. (2022). Thermal and mechanical characterization of alumina modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 30.
- [17] Khalil, M. M., Gouda, M. M., & Abbas, M. I. (2024). Impact of nano-Fe₂ O₃ on radiation parameters of epoxy reinforced with nano carbon. *Scientific Reports*, 14, 21940.
- [18] Wang, B., Zhang, C., Huang, B., Wang, H., Miao, X., & Deng, W. (2024). A facile dip-coating approach to prepare robust superhydrophobic fabric modified by γ -Fe₂ O₃ /epoxy resin/lauric acid for oil/water separation, lossless water transportation, and flame retardancy. *Surfaces and Interfaces*, 45, 103896.
- [19] Sengottaiyan, S., Subbarayan, S., Natarajan, R., & Gurunathan, V. (2025). Enhancing mechanical, degradation, and tribological properties of biocomposites via treatment and alumina content. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 0(0).
- [20] Wei, Z., Guan, J., Yan, L., & Niu, G. (2024). The role of nano-Fe₂ O₃ 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.
- [21] Mishra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. (2022). Thermal and mechanical characterization of alumina modified multifunctional novolac epoxy nanocomposites. *Polymers and Polymer Composites*, 30.
- [22] Khalil, N. Z., Johanne, M. F., & Ishak, M. (2019). Influence of Al₂ O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 172, 9–15.
- [23] Nur Zalikha Khalil, Mohamed Feisal Johanne, Mahadzir Ishak, Influence of Al₂O₃ nanoreinforcement on the adhesion and thermomechanical properties for epoxy adhesive, *Composites Part B: Engineering*, Volume 172, 2019, Pages 9-15.
- [24] Maghsoudian, S., Salimi, A., & Mirzataheri, M. (2019). The effect of nanoalumina silanisation in tetraglycidylether epoxy adhesive. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 92, 119–124.
- [25] Sari, N. H., Suteja, S., Pruncu, C. I., Setyawan, I., Ilyas, R. A., & Lamberti, L. (2024). Physicomechanical, water absorption and thermal properties and morphology of *Paederia foetida* fiber–Al₂ O₃ powder hybrid-reinforced epoxy composites. *Polymer International*, 73(7), 573–585.

- [26]Zhang, X., Huang, Y., Gao, H., Luo, X., Liang, Z., & Tontiwachwuthikul, P. (2019). Zeolite catalyst-aided tri-solvent blend amine regeneration: An alternative pathway to reduce the energy consumption in amine-based CO₂ capture process., *Applied Energy*, 240, 827-841.
- [27]Wang, Y., & Others. (2024). Effects of thermal properties on insulation breakdown behaviors of epoxy/Al₂ O₃ composite with boron nitride doping. In *2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD)* (pp. 1–4).
- [28]Khaleel, N. A., Salih, R. M., & Musa, B. H. (2025). Effect of nano powders on the surface and adhesion properties of epoxy and polyester-based polymeric coatings. *Journal of Elastomers & Plastics*, Advance online publication.
- [29]Yang, K. R., Dai, J. Y., Wang, S. P., & Others. (2025). Bio-based epoxy composites demonstrating high temperature breakdown strength and thermal conductivity for high voltage insulation. *Chinese Journal of Polymer Science*, 43, 40–52.
- [30] Mao, D., Chen, J., Ren, L., Zhang, K., Yuen, M. M. F., Zeng, X., Sun, R., Xu, J.-B., & Wong, C.-P. (2019). Spherical core-shell Al@Al₂ O₃ filled epoxy resin composites as high-performance thermal interface materials. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 123, 260–269.
- [31]Awais, M., Xia, F., Zhang, T., Rahman, T. U., Zhao, Y., Chen, X., & Paramane, A. (2025). Interplay between curing kinetics and thermal aging dynamics of epoxy hybrid composites under different frequencies. *Polymer Composites*, Advance online publication.
- [32] Paraskar, P., Bari, P., & Mishra, S. (2020). Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iran Polymer Journal*, 29(1), 47–55
- [33]Peng, C., Yu, Z., Liao, K., Li, K., Chen, J., Chen, Y., & Han, Y. (2025). Robust, photothermal superhydrophobic epoxy anti-corrosion coating based on micro nano structured Al₂ O₃ -TiN. *Chemical Engineering Science*, 315, 121843.
- [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). <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00405-3>
- [35]Cho, J., Jang, E., Kim, J., Kim, M., Su, P.-C., & Kim, J. (2025). 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.
- [36]Arunachalam, S. J., Saravanan, R., Othman, N. A., Thanikodi, S., Giri, J., Azizi, M., & Saidani, T. (2025). Artificial intelligence-driven prediction and optimization of tensile and impact strength in natural fiber/aluminum oxide polymer nanocomposites. *Engineering Reports*.
- [37]Hemalatha, C. K., Venkatachalam, G., & Bhuvaneshwari, M. (2025). Investigation of thermal conductivity of *Prosopis juliflora* / *Acacia leucophloea* / *Acacia nilotica* fibers / ceramic fillers / epoxy composites. *Results in Engineering*, 25, 104225.
- [38]Zhou, Y., Tian, X., Cao, X., Wang, Q., Wang, J., Xu, Y., Luo, M., & Wang, Z. (2025). Enhanced thermal conductivity and electrical insulation properties of liquid crystalline epoxy composites by using optimized alumina hybrid fillers. *Materials Today Physics*, 54, 101719.
- [39]Zhang, Y., & Ke, L. (2025). 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).

- [40]Nipu, S. M. A., Rahman, M. Z., Alam, S. S., & Dev, B. (2024). Mechanical, thermal and morphological characterization of graphene/Al₂O₃ -reinforced epoxy hybrid nanocomposites. *Macromolecular Materials and Engineering*, 309(12), 2400180.
- [41] Goyat, M. S. (2024). Epoxy-Al₂O₃ nanocomposites with enhanced Tg and thermal stability. *RW Materials*, 2(1), 71–82.
- [42]Biswal, M. K., Kuila, C., Maji, A., et al. (2024). Thermal and mechanical behavior of APTES-modified Al₂O₃ - embedded unidirectional carbon fiber/epoxy composites: An experimental and statistical approach. *Journal of Materials Engineering and Performance*.
- [43]Karthik, A., Surendhiran, S., Savitha, S., Jagan, K. S. G., Vidaarth, T. M. N., Senthilmurugan, R., & Cheran, V. (2025). Oleic acid tailored Al₂O₃ -ZrO₂ /epoxy resin coating with enhanced wettability, mechanical property, and controlled surface porosity for anticorrosion applications. *Ceramics International*.
- [44]Shin, D. I., Lee, J., Kim, C., et al. (2024). Reduced interfacial thermal resistance in acidic alumina-filled adhesives for heat dissipative applications. *Macromolecular Research*, 32, 885–895.
- [45]Kaliappan, S., & Natrayan, L. (2024). Impact of Kenaf fiber and inorganic nanofillers on mechanical properties of epoxy-based nanocomposites for sustainable automotive applications. *SAE Technical Paper 2023-01-5115*.
- [46]Wu, X., Liu, W., Yang, L., & Zhang, C. (2024). Construction of alumina framework with a sponge template toward highly thermally conductive epoxy composites. *Polymer Engineering & Science*, 64(4), 1812–1821.
- [47]Güven, C., Kisa, M., Demircan, G., Ozen, M., & Kirar, E. (2024). Effect of seawater aging on mechanical, buckling, structural, and thermal properties of nano Al₂O₃ and TiO₂ -doped glass-epoxy nanocomposites. *Polymer Composites*, 45(8), 7376–7390.
- [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. (2023). Influence of the addition of alumina nanofibers on the strength of epoxy resins. *Materials*, 16(4), 1343.
- [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.
- [50] Pandey, J. C., & Singh, M. (2020). Evidences of interphase formation and concomitant change in the dielectric properties of epoxy-alumina nanocomposites. *Polymer Testing*, 91, 106802.
- [51] Paraskar, P., Bari, P., & Mishra, S. (2019). Influence of amine functionalized graphene oxide on mechanical and thermal properties of epoxy matrix composites. *Iranian Polymer Journal*.
- [52] Jayan, J. S., Saritha, A., Deeraj, B. D. S., & Joseph, K. (2020). Graphene oxide as a prospective graft in polyethylene glycol for enhancing the toughness of epoxy nanocomposites. *Polymer Engineering & Science*.
- [53] Ma, L., Wang, X., Wang, J., et al. (2021). Graphene oxide–cerium oxide hybrids for enhancement of mechanical properties and corrosion resistance of epoxy coatings. *Journal of Materials Science*, 56, 10108–10123.
- [54] Mirzapour, M., Cousin, P., Robert, M., & Benmokrane, B. (2024). Dispersion characteristics, mechanical, thermal stability, and durability properties of epoxy nanocomposites reinforced with carbon nanotubes, graphene, or graphene oxide. *Polymers*, 16(13), 1836.

- [55] Garg, A., Basu, S., Mehta, R., & Mahajan, R. L. (2023). Enhancing the mechanical performance of E-glass fiber epoxy composites using coal-derived graphene oxide. *Polymer Composites*, 45(3), 2444–2461.
- [56] Xue, G., Xing, J., Sun, M., Zhang, X., Liu, C., Xue, S., Yuan, Z., & Zhang, B. (2024). In situ exfoliation and surface functionalization of graphene oxide for epoxy composites with improved thermal and mechanical properties. *Polymer Composites*, 45(2), 1826–1838.
- [57] Hu, P., Alizadeh, A., Jasim, D. J., Nasajpour-Esfahani, N., Shamsborhan, M., & Sabetvand, R. (2024). 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.
- [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. (2024). Intrinsically reactive hyperbranched interface governs graphene oxide dispersion and crosslinking in epoxy for enhanced flame retardancy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 672, 465–476.
- [59] Mahtar, M. A., Kinloch, I. A., & Bissett, M. A. (2024). 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.
- [60] Chowdhury, H., Saha, A., Hasan, M., & Haider, J. (2025). 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.
- [61] Kabeb, S. M. (2024). Environmentally benign high-performance composites-based hybrid microcrystalline cellulose/graphene oxide. *Polymer Advanced Technology*, 35(10), e6610.
- [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. (2024). Structure and properties of epoxy resin/graphene oxide composites prepared from silicon dioxide-modified graphene oxide. *ACS Omega*, 9(15), 17577–17591.
- [63] Liu, S., Zhang, J., Fan, X., Hu, L., Guan, J., & Zeng, S. (2024). Enhanced mechanical, thermal properties and thermal conductivities of epoxy composites via incorporating graphene oxide-grafted carbon nanotubes hybrids. *Polymer Composites*, 45(17), 15637–15648.
- [64] Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N., et al. (2024). Thermal decomposition of CNTs and graphene-reinforced glass fibers/epoxy and their kinetics. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14, 869–889.
- [65] Si, A., Zhang, Y., Liu, Y., Jiang, Z., Li, C., Zhang, J., Huang, X., & Gong, C. (2025). Structural design in reduced graphene oxide (RGO) metacomposites for enhanced microwave absorption in wide temperature spectrum. *Journal of Materials Science & Technology*, 206, 211–220.
- [66] Ping, T., Pan, X., Tang, E., Yuan, M., Xing, X., Chu, X., Liu, S., Li, H., & Cui, J. (2025). Enhancing antistatic property of epoxy resin coatings via formation of conductive networks with fibrous polyaniline/reduced graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 478, 141191.
- [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. (2025). Enhanced wear resistance and mechanical properties of epoxy nanocomposites through surface-concentrated magnetic and luminescent graphene oxide. *Tribology International*, 204, 110504.

- [68] Lei, Y., Wang, S., Guo, R., Li, Z., & Zhu, W. (2025). An epoxy-based functional coating composed of sulfonated polyaniline, graphene oxide and molybdate: Application in steel corrosion protection. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 119, (in press).
- [69] Singh, P., Sharma, S., Kumar, K., et al. (2025). 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.
- [70] Yuan, M., Zhang, Y., Xie, F., Yang, H., Bittencourt, C., Snyders, R., & Li, W. (2025). Nano copper-modified GO and CNTs for enhanced the epoxy resin composite thermal properties. *Applied Surface Science*, 690, 162616.
- [71] Song, P., Cai, Z., Li, J., He, M., Qiu, H., Ren, F., Zhang, Y., Guo, H., & Ren, P. (2025). 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.