

Polymerization
Quarterly, 2025
Volume 15, Number 2
Pages 12-26
ISSN: 2252-0449

Investigation of Morphology, Mechanical Properties, and Thermal Degradation Behavior of Epoxy Nanocomposites Containing Modified Carbon Nanotubes

Mohammad Hossein Karami*, Omid Moini Jazani*, and Alireza Bagheri

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan,

P.O. Box 81746-73441, Isfahan, Iran

Received: 24 December 2024, Accepted: 23 March 2025

Abstract

Nanocomposites have wide applications in various industries due to their unique properties. Carbon nanotubes (CNTs) have gained significant attention as reinforcements for polymers, particularly epoxy resins. Carbon nanotubes enhance the performance of epoxy resins by improving mechanical, thermal, and flame-retardant properties. Furthermore, surface modification of CNTs can enhance their adhesion and uniform dispersion within the epoxy matrix, which leads to improved mechanical properties and thermal stability of the composite. However, challenges such as the agglomeration of CNTs and its effect on material properties still exist. The results showed that inclusion of silane in the epoxy composite reinforced with basalt fibers significantly improves thermal properties, while the addition of CNTs further increases thermal stability. Thermal degradation analysis also showed that carbon nanotubes elevated the degradation temperature, prevented rapid thermal degradation. The simultaneous incorporation of graphene and CNTs into epoxy resin helps to increase thermal stability and improve interfacial bonding. In this article, the effect of modified carbon nanotubes on the morphology, mechanical properties, and thermal stability and degradation of epoxy nanocomposites is investigated and recent advances in this field are reviewed.

Key Words

epoxy resin,
carbon nanotubes,
morphology,
mechanical properties,
thermal degradation

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mh.karami@eng.ui.ac.ir and o.moini@eng.ui.ac.ir

بررسی شکل‌شناسی، خواص مکانیکی و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده

بسپارش
فصلنامه علمی
سال پانزدهم، شماره ۲،
صفحه ۱۲-۲۶، ۱۴۰۴
ISSN: 2252-0449

محمدحسین کرمی*، امید معینی جزنی* و علیرضا باقری

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

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۴، پذیرش: ۱۴۰۴/۱/۳

نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد در صنایع مختلف کاربردهای گسترده‌ای دارند. نانولوله‌های کربنی (CNTs) به عنوان تقویت‌کننده برای پلیمرها، به ویژه رزین‌های اپوکسی، مورد توجه قرار گرفته‌اند. نانولوله‌های کربنی با بهبود خواص مکانیکی، گرمایی و مقاومت در برابر شعله، عملکرد رزین‌های اپوکسی را ارتقا می‌دهند. همچنین، اصلاح سطح نانولوله‌های کربنی می‌تواند به بهبود چسبندگی و پراکنش یکنواخت آن‌ها در ماتریس اپوکسی کمک می‌کند که به افزایش خواص مکانیکی و پایداری گرمایی کامپوزیت منجر شود. با این حال، چالش‌هایی مانند کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی و آثار آن بر خواص مواد همچنان وجود دارد. نتایج نشان داد، وجود سیلان در کامپوزیت اپوکسی با الیاف بازالت باعث بهبود ویژگی‌های گرمایی می‌شود و افزودن نانولوله‌های کربنی پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد. همچنین تحلیل تخریب گرمایی نشان داد، نانولوله‌های کربنی مقاومت گرمایی را به مقادیر بیشتری منتقل کرده و از تخریب گرمایی سریع جلوگیری می‌کنند. استفاده هم‌زمان از گرافن و نانولوله‌های کربنی در رزین اپوکسی به افزایش پایداری گرمایی و بهبود چسبندگی کمک می‌کند. در این مقاله، اثر نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده بر شکل‌شناسی، خواص مکانیکی و پایداری و تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی بررسی و پیشرفت‌های اخیر در این زمینه مرور شده است.

چکیده



محمدحسین کرمی



امید معینی جزنی



علیرضا باقری

واژگان کلیدی

رزین اپوکسی،
نانولوله‌های کربنی،
شکل‌شناسی،
خواص مکانیکی،
تخریب گرمایی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mh.karami@eng.ui.ac.ir و o.moini@eng.ui.ac.ir

مقدمه

در حال حاضر، نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی منحصربه‌فردی که دارند، اغلب در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. نانولوله‌های کربنی با توجه به خواص فیزیکی و مکانیکی عالی آن‌ها، فاز تقویت‌کننده امیدبخشی برای پلیمرها به‌شمار می‌روند [۱]. رزین‌های اپوکسی به مدت نزدیک به ۷۰ سال توسعه یافته‌اند. کاربردهای آن‌ها شامل زمینه‌های مختلف مانند ماتریس‌های کامپوزیتی، پوشش‌های سطحی، چسب‌ها و اجزای الکترونیکی و سایر صنایع هستند [۲]. ویژگی‌های رزین‌های اپوکسی مانند خواص مکانیکی عالی، مقاومت خوب در برابر مواد شیمیایی و رطوبت، هزینه کم و فرایند آسان، اغلب جذاب هستند. با این حال، قابلیت ضدشعله رزین اپوکسی، محدودیت‌هایی در کاربرد آن‌ها در بسیاری از زمینه‌ها ایجاد می‌کند. از این رو، برای رعایت الزامات آزمون‌های اشتعال‌پذیری، لازم است از مواد مقاوم در برابر شعله استفاده شود [۳].

به‌طور کلی، نانولوله‌های کربنی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌اند، زیرا اغلب در برابر شعله مقاوم‌ترند و خواص مکانیکی و الکترونیکی برتری دارند. وجود نانولوله‌های کربنی در مقایسه با مواد افزودنی رایج که خواص ضدشعله دارند، موجب کاهش دود سمی و بخارات در زمان احتراق می‌شود [۴]. با افزودن ۲٪ wt نانولوله‌های کربنی مقاوم به شعله به پلیمر می‌توان به‌طور چشمگیر ویژگی‌های مقاومتی آن را در برابر شعله بهبود بخشید. افزون‌براین، نانولوله‌های کربنی می‌توانند از طریق استخراج لیگنین از زغال‌چوب بامبو، کاه برنج، الیاف نارگیل و کاه ذرت به‌عنوان منابع کربن نیز تهیه شوند. بنابراین، ویژگی‌های مزبور آن‌ها را دارای ویژگی‌های زیست‌محیطی عالی و بازیافت‌پذیر می‌سازد [۵]. با این حال، کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی به علت نیروهای واندروالس قوی و برهم‌کنش‌های بین نانولوله‌های کربنی، تحقق عملکرد ایده‌آل آن‌ها را در نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقریباً ناممکن می‌سازد [۶]. می‌توان نتیجه‌گیری کرد، پلیمرهای پیوندیافته با نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده می‌توانند به‌طور مطلوب پراکندگی آن‌ها را بهبود بخشند، اما به‌طور هم‌زمان ممکن است خاصیت مقاومت به شعله مواد را به دلیل قابلیت اشتعال ذاتی پلیمر از بین ببرند [۷].

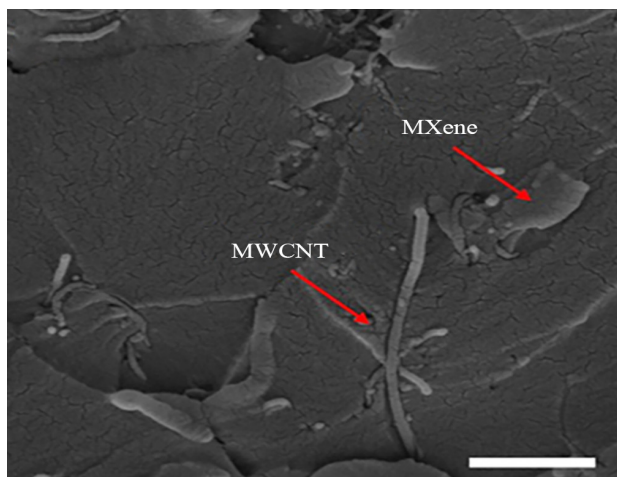
نانولوله‌های کربنی (CNTs) به دلیل خواص منحصربه‌فرد آن‌ها می‌توانند به‌طور درخور توجهی خواص مکانیکی و گرمایی رزین‌های اپوکسی را بهبود بخشند. نانولوله‌های کربنی به دلیل ساختار لوله‌ای و نسبت ابعاد زیاد، استحکام کششی بسیار زیادی دارند. هنگامی که این نانولوله‌ها به رزین اپوکسی افزوده می‌شوند،

می‌توانند استحکام کششی کامپوزیت را بهبود بخشند و مقاومت آن را در برابر شکست افزایش دهند [۸].

افزودن نانولوله‌های کربنی به اپوکسی می‌تواند انعطاف‌پذیری آن را افزایش دهد که به‌ویژه برای کاربردهایی مفید است که نیاز به تغییر شکل زیاد وجود دارد. نانولوله‌های کربنی رسانندگی گرمایی زیادی دارند و افزودن آن‌ها به اپوکسی می‌تواند به بهبود انتقال گرما در کامپوزیت‌ها منجر شود و خواص گرمایی بهتری را ارائه دهد [۹]. همچنین، استفاده از نانولوله‌های کربنی در مقایسه با مواد رایج، باعث افزایش خواص مکانیکی می‌شود که این موضوع در صنایع مختلف از اهمیت زیادی برخوردار است [۱۰].

اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربنی می‌تواند به افزایش چسبندگی بین نانولوله‌ها و ماتریس اپوکسی کمک کند و این کار موجب بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. به‌طور کلی، نانولوله‌های کربنی با بهبود خواص مکانیکی و گرمایی، به افزایش عملکرد و کاربردهای رزین‌های اپوکسی در صنایع مختلف کمک شایانی می‌کنند [۱۱].

اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربن می‌تواند به افزایش چسبندگی و بهبود خواص مکانیکی در کامپوزیت‌های پلیمری کمک کند. این فرایند با چند روش مختلف انجام می‌شود. یکی از روش‌های اصلاح شیمیایی، افزودن گروه‌های عاملی به سطح نانولوله‌هاست. این گروه‌های عاملی معمولاً شامل گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل، آمینی و غیره هستند که باعث می‌شوند، سطح نانولوله‌ها به‌طور شیمیایی با ماتریس پلیمری (مانند رزین‌های اپوکسی) واکنش دهند [۱۲]. این برهم‌کنش‌های شیمیایی به‌طور مستقیم می‌تواند چسبندگی بین نانولوله‌ها و ماتریس را افزایش دهند و بدین ترتیب انتقال بار بین نانولوله‌ها و پلیمر بهبود یابد. از سوی دیگر، افزایش چسبندگی می‌تواند به افزایش توزیع یکنواخت نانولوله‌ها در ماتریس پلیمری کمک کند [۱۳]. این توزیع یکنواخت به کاهش تجمع و انباشتگی نانولوله‌ها می‌انجامد، در نتیجه احتمال ایجاد نقاط ضعف در کامپوزیت کاهش می‌یابد. هرچه توزیع نانولوله‌ها در ماتریس بهتر باشد، خواص مکانیکی کامپوزیت نیز بهتر می‌شود. افزون‌براین، اصلاح شیمیایی می‌تواند به جلوگیری از فرایند کاهشی خواص مکانیکی ناشی از انباشتگی نانولوله‌ها کمک کند [۱۴]. این بدین معنی است، کامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های اصلاح‌شده می‌توانند نسبت به کامپوزیت‌های دارای نانولوله‌های اصلاح‌نشده، خواص مکانیکی بهتری را نشان دهند [۱۵]. در نهایت، این اصلاحات می‌توانند موجب افزایش مقاومت در برابر شکست و بهبود ویژگی‌های کشسانی و تغییر شکل مواد کامپوزیتی شوند.



شکل ۲- نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانومکسین و نانولوله‌های کربنی [۱۷].

بنابراین، سطح تماس بین نانوذرات و ماتریس افزایش پیدا می‌کند و برهم‌کنش بین مواد بهتر می‌شود [۱۷]. Špitalský و همکاران، نانولوله‌های کربنی چنددیواره (MWNCTs) را با گروه آمینی از نوع آمینوسیلان (۳-آمینوپروپیل) تری‌اتوکسی‌سیلان (APTES) اصلاح کردند (شکل ۳). همان‌طور که در تصاویر مشاهده می‌شود، نانولوله‌های کربنی به‌تنهایی دارای مساحت سطح ویژه کمتری نسبت به نمونه اصلاح‌شده دارند. با افزایش فاصله بین نانوذرات، مساحت سطح ویژه نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده افزایش می‌یابد. مساحت سطح ویژه نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده و نشده به‌ترتیب برابر با ۱۰۵ و ۱۸۲ m^2/g است [۱۹]. نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با آمینوسیلان سنتز شد. نتایج شکل‌شناسی نشان می‌دهد، اصلاح سطح نانولوله‌ها به ایجاد شبکه‌های متراکم در رزین اپوکسی منجر



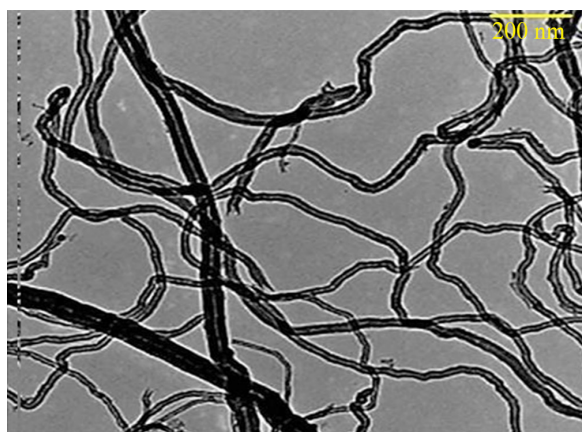
شکل ۱- نکات مهم و کلیدی برای تجزیه و تحلیل نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده.

به‌طورکلی، اصلاح شیمیایی نانولوله‌های کربنی نه‌تنها چسبندگی را افزایش می‌دهد، بلکه عملکرد کلی کامپوزیت‌های پلیمری را نیز بهبود می‌بخشد [۱۶].

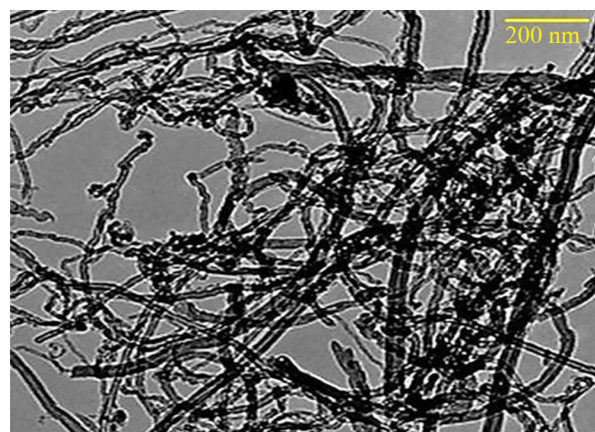
در این مقاله شکل‌شناسی، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و تخریب گرمایی و پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده بررسی می‌شود (شکل ۱).

شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و نانولوله‌های کربنی

Kim و همکاران، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی مکسین ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$) و نانولوله‌های کربنی را بررسی کردند (شکل ۲). نتایج نشان داد، وجود نانوذرات به‌تنهایی موجب کلوخه‌ای شدن می‌شود. زمانی که به‌طور هم‌زمان استفاده می‌شوند، کلوخه‌ای شدن کاهش می‌یابد و در سرتاسر رزین اپوکسی پراکنده می‌شوند.

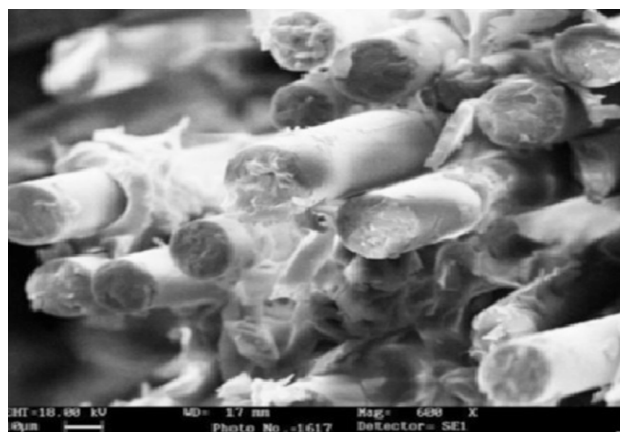


(ب)



(الف)

شکل ۳- (الف) نانولوله کربنی چنددیواره و (ب) نانولوله کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با آمینوسیلان [۱۸].

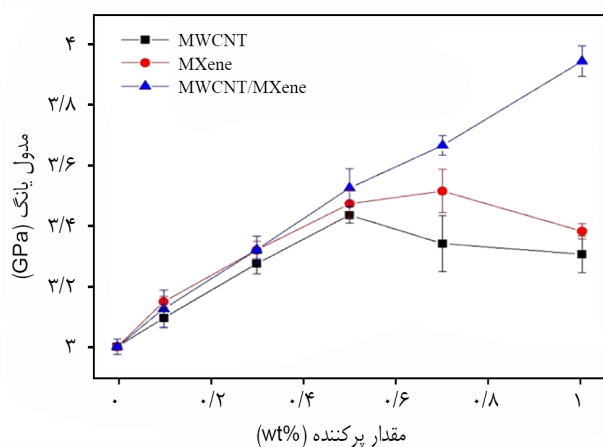


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانولوله‌های کربنی اصلاح شده [۲۴].

روی اکسید و نانوذرات چنددیواره کربنی را بررسی کردند. بار قطبی و منفی گروه‌های کربوکسیل روی نانولوله‌های کربنی احتمالاً موضعی برای هسته‌زایی و رشد نقاط کوانتومی روی اکسید فراهم می‌کند که آثار ممانعت فضایی ایجاد کرده و از تجمع و درهم‌تنیدگی نانولوله‌ها جلوگیری می‌کند. دو اصلاح‌کننده بر یکدیگر از نظر حالت پراکندگی و ابعاد ذرات در شکل‌شناسی اثری نمی‌گذارند [۲۵].

خواص مکانیکی

نمودار مدول نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی مکسین و نانولوله‌های کربنی و نانوذرات بررسی شد (شکل ۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود نانوذرات به‌تنهایی در مقدار ۰/۶ wt % به کاهش خواص مکانیکی منجر می‌شود. همچنین، وجود هم‌زمان



شکل ۵- نمودار مدول یانگ و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی، نانومکسین و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۲۶].

می‌شود. همچنین نانوذرات اصلاح‌شده به مانند یک عامل پخت در رزین اپوکسی عمل می‌کند. بنابراین، پراکنش بهتر شده و سازوکار سینتیک پخت به‌طور درخور توجهی بهتر می‌شود [۲۰].

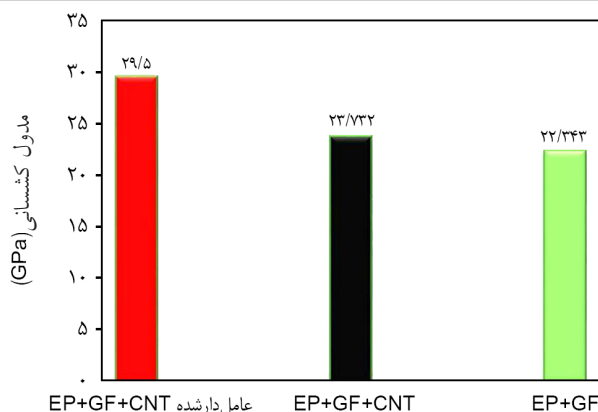
Song و همکاران، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی در مجاورت نانولوله‌های کربنی و صفحات نانوگرافن را بررسی کردند. شکست بین‌سطحی با کلوخه‌ای شدن و پیوند ضعیف ذرات ایجاد می‌شود که سبب عدم پراکنش همگن ذرات در ماتریس اپوکسی می‌شود. زمانی که از نسبت وزنی ۱ به ۳ از نانولوله‌های کربنی و نانوصفات گرافن استفاده می‌شود، بهترین پراکنش در ماتریس اپوکسی ایجاد شده و ذرات در سرتاسر ماتریس اپوکسی پراکنده می‌شوند [۲۱].

Valentini و همکاران، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با سیلان از نوع پلی‌دی‌متیل سیلوکسان (PDMS) را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، نانوذرات اصلاح‌شده به‌طور بسیار مناسبی در رزین اپوکسی پخش شده و مقدار کمی کلوخه‌ای شدن دیده می‌شود. بنابراین، اصلاح سطح نانوذرات با این نوع پلی‌سیلیکون به افزایش سازگاری در سطح نانوذرات و رزین اپوکسی منجر شده است. همچنین، اصلاح سطح نانوذرات با این روش به افزایش قطر و سطح نانولوله‌های کربنی منجر شد [۲۲].

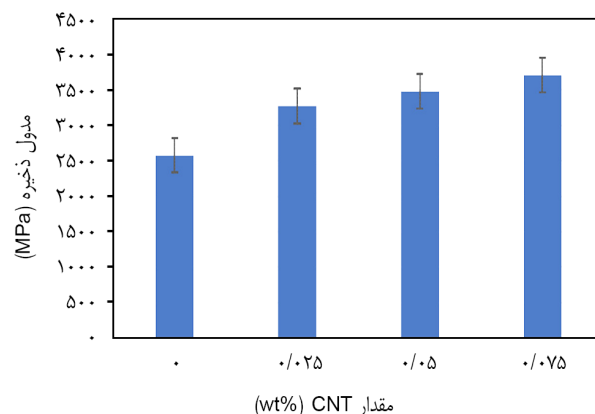
Chen و همکاران، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با پلی‌فسفاژن آمین را بررسی کردند. نتایج نشان داد، قطر نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده در مقایسه با اصلاح‌نشده، افزایش می‌یابد. سطح رزین اپوکسی صاف است و با افزودن نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده، سطح نانوکامپوزیت زیر می‌شود. بنابراین، چسبندگی بین‌سطحی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ۲ wt % از نانولوله‌های کربنی کلوخه‌ای شدن دیده می‌شود [۲۳].

در پژوهش دیگری، Nayak و همکاران نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل را بررسی کردند (شکل ۴). نتایج نشان داد، الیاف شیشه در سطح بیرونی و لبه‌های نانولوله‌های کربنی پیوند ایجاد می‌کند. بنابراین، پیوند به‌برهم‌کنش مناسب با رزین اپوکسی کمک می‌کند و پراکنش ذرات در ماتریس اپوکسی به‌طور همگن است. وجود نانولوله‌های کربنی باعث می‌شود، الیاف به‌طور یکنواخت و همگن از سطح ماتریس بیرون بزنند و این مسئله به تقویت استحکام و افزایش انرژی جذب شکست در نانوکامپوزیت‌ها کمک می‌کند [۲۴].

Bettoni و همکاران، شکل‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی



شکل ۷- نمودار مدول کشسانی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی با وجود نانولوله‌های کربنی و الیاف شیشه [۳۲].



شکل ۶- نمودار مدول ذخیره نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی [۲۷].

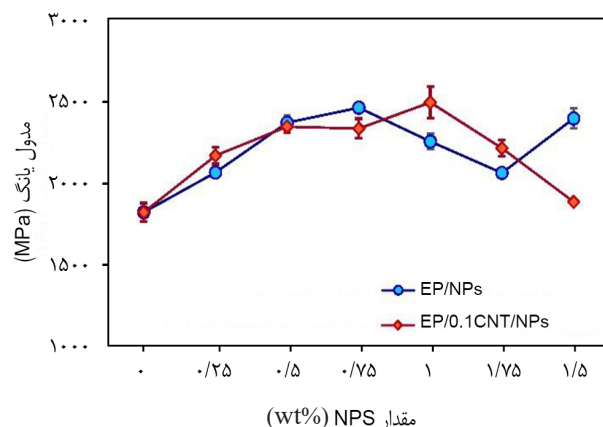
سازوکارهای برهم‌کنش آن‌ها با ماتریس می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی مواد کامپوزیتی کمک کند [۳۰].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف شیشه و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل بررسی شد. نتایج آزمون مدول کششی نشان می‌دهد، افزودن نانولوله‌های کربنی به رزین، خواص مکانیکی آن را به‌طور درخور توجهی بهبود می‌بخشد. نمونه‌ای که با نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل تقویت شده، بیشترین مدول کشسانی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۷) [۳۱]. همچنین، وجود نانوذرات در رزین به جلوگیری از رشد ترک‌ها و افزایش استحکام کششی کمک می‌کند. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت، نمونه حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده، بهترین خواص مکانیکی را در مقایسه با سایر نمونه‌ها دارد. مقدار مدول کششی برای نمونه‌های اپوکسی حاوی الیاف شیشه و اپوکسی‌های حاوی الیاف شیشه و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده به‌ترتیب برابر با ۲۳/۷۳۲، ۲۲/۳۴۳ و ۲۹/۵ GPa است [۳۲].

Wang و همکاران، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره عامل‌دارشده با گروه آمینی و صفحات گرافن چندلایه عامل‌دارشده با گروه آمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، کامپوزیت‌های هیبریدی بهبود درخور توجهی در خواص کششی و خمشی در مقایسه با کامپوزیت‌های اپوکسی خالص دارد، به‌ویژه در نمونه ۰/۵٪ پرکننده، افزایش ۵۲٪ در استحکام کششی و ۱۲/۷۶٪ در استحکام خمشی مشاهده شد [۳۳]. این بهبودها به‌دلیل پراکندگی موفقیت‌آمیز مواد پرکننده در ماتریس اپوکسی و ایجاد برهم‌کنش‌های مؤثر میان پرکننده و اپوکسی است. با این حال، نمونه‌های بیش از ۰/۵٪ wt به کاهش

این دو نانوذره در ماتریس اپوکسی باعث افزایش مدول یانگ شده است. درواقع، وجود هم‌زمان ذرات می‌تواند موجب عدم چسبندگی و گره‌خوردگی در مکسین و نانولوله‌های کربنی شود. بنابراین، پراکنش دو نانوذره در ماتریس افزایش پیدا می‌کند [۲۶]. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی بررسی شد (شکل ۶). نتایج نشان داد، حداکثر مدول ذخیره نمونه اپوکسی تقویت‌شده با ۰/۰۷۵٪ wt از نانولوله‌ها به مقدار ۴۳/۸٪ نسبت به رزین اپوکسی خالص افزایش یافته است. همچنین، مدول ذخیره‌سازی نمونه‌های تقویت‌شده با ۰/۰۲۵ و ۰/۰۵٪ wt از نانولوله‌های کربنی به‌ترتیب ۲۶/۸ و ۳۴/۹٪ افزایش یافت [۲۸-۲۶]. Starink و همکاران، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف پلی‌وینیل‌الکل و نانولوله‌های کربنی چنددیواره را بررسی کردند. نتایج آزمون تنش-کرنش نشان داد، چقرمگی نانوکامپوزیت اپوکسی افزایش می‌یابد و همچنین تغییری در مدول کشسانی ایجاد نمی‌شود. نمونه حاوی ۱٪ wt نانولوله‌های کربنی، در مقایسه با ۳ و ۵٪ wt می‌تواند استحکام کششی را افزایش بدهد [۲۷].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی با نانولوله‌های کربنی و نانوذرات آلومینیم اکسید بررسی شد. نانوذرات آلومینا در مقایسه با نانولوله‌های کربنی اثر بهتری بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی دارند. این به‌دلیل برهم‌کنش‌های بین‌سطحی قوی‌تر و نازک‌تر در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانوذرات آلومیناست که به انتقال مؤثر بار از ماتریس اپوکسی به نانوذرات منجر می‌شود [۲۹]. درحالی‌که نانولوله‌های کربنی به‌دلیل شکل و جهت‌گیری آن‌ها می‌توانند خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار دهند، نانوذرات آلومینا با ایجاد ناحیه بین‌سطحی قوی‌تر و باریک‌تر باعث افزایش استحکام و سختی می‌شوند. بنابراین، انتخاب نوع نانوذرات و درک



شکل ۸- نمودار مدول یانگ و تغییرات درصد وزنی نانوذرات نمونه رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی [۲۵].

گنجانیدن نانولوله‌های کربنی در سطح تماس، به‌ویژه هنگام پیوندزنی به الیاف کربن می‌تواند به‌طور درخور توجهی چسبندگی بین الیاف و ماتریس اپوکسی را بهبود بخشد. این بهبود موجب خواص مکانیکی بهتر از جمله افزایش استحکام کششی، چقرمگی شکست و مقاومت در برابر لایه‌لایه‌شدگی می‌شود. این مسئله کامپوزیت‌های حاصل را برای کاربردهای چالش‌برانگیز مانند صنایع هوافضا و خودروسازی مناسب می‌سازد [۲۷]. افزون‌براین، قابلیت اپوکسی در تحمل شرایط محیطی سخت و گران‌روی نسبتاً کم آن را انتخاب ایده‌آلی برای کاربردهای کامپوزیتی می‌کند که در آن توزیع یکنواخت و خیس شدن الیاف را بهبود می‌بخشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، بهینه‌سازی برهم‌کنش اپوکسی و الیاف کربن، به‌ویژه از روش اضافه کردن نانولوله‌های کربنی، می‌تواند قابلیت‌های پیشرفته و بهبود عملکرد در کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف کربنی را بهبود بخشد [۲۸].

کامپوزیت‌های برپایه اپوکسی که با نانولوله‌های کربنی تقویت‌شده‌اند، به‌عنوان مواد استثنائی در حوزه فناوری کامپوزیت‌های پیشرفته شناخته می‌شوند، زیرا خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی فوق‌العاده‌ای دارند. وجود نانولوله‌های کربنی در ماتریس رزین‌های اپوکسی به بهبود درخور توجهی در معیارهای عملکرد منجر می‌شود که این کامپوزیت‌ها را برای طیف وسیعی از کاربردها مناسب می‌سازد، به‌ویژه در صنایعی مانند صنایع هوافضا، خودروسازی و الکترونیک که کاهش وزن، استحکام و دوام را در اولویت دارند. باوجود این پیشرفت‌ها، چالش‌هایی نیز وجود دارد، به‌ویژه درباره پراکندگی یکنواخت نانولوله‌های کربنی در ماتریس اپوکسی که برای حداکثر کردن مزایای مکانیکی و الکتریکی بسیار حیاتی است [۲۹].

خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی در جدول ۱، جمع‌آوری شده است. مدول کشسان و استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی که به‌صورت ساختار صفحه‌ای بودند، بیش از سایر نمونه‌ها بود. همچنین بررسی‌ها نشان داد که، نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه آمینی در ماتریس اپوکسی، استحکام کششی به مقدار ۴۶ MPa را دارد که بعد از نمونه‌های یادشده، در جایگاه دوم از لحاظ بهبود خواص مکانیکی قرار دارد [۳۰].

طراحی کامپوزیت‌های کارآمد برای کاربردهای ساختاری با الزامات ایمنی بیشتر به استفاده از اپوکسی‌های تقویت‌شده با نانوذرات منجر شده است. افزودن مقدار بسیار کمی از نانوالیاف کربنی به ماتریس اپوکسی، قابلیت بالقوه درخور توجهی برای

خواص مکانیکی منجر می‌شود که به‌دلیل تجمع پرکننده‌ها و کاهش سطح تماس مؤثر برای انتقال بار است. بنابراین به‌طور کلی، نمونه wt ۰/۵٪ بهترین نتایج را در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبریدی به ارمغان می‌آورد [۳۴].

Xue و همکاران، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات زیرکونیم دی‌اکسید، اتریم اکسید و نانولوله‌های کربنی چنددیواره را بررسی کردند. نمودار مدول یانگ برحسب اندازه ذرات در شکل ۸، نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، مدول یانگ رزین اپوکسی خالص در مقدار wt ۱٪ به مقدار ۱۸۱۹/۸۷ MPa می‌رسد. وجود نانوذرات به بهبود مدول یانگ کمک می‌کند و به افزایش آن در نمونه نانوکامپوزیت به مقدار ۲۴۹۲/۹۶ MPa منجر می‌شود. دلیل این پراکنش مناسب نانوذرات در ماتریس اپوکسی و برهم‌کنش مناسب بین سطحی گروه‌های عاملی و نانوپرکننده‌هاست [۲۵].

وجود نانولوله‌های کربنی و الیاف در کامپوزیت‌ها، قابلیت بالقوه درخور توجهی در بهبود خواص کشسان، گرمایی و الکتریکی نشان داده است. نانولوله‌های کربنی به مقاومت در برابر سختی و شکست کامپوزیت‌ها کمک می‌کنند. این بهبودها عمدتاً به الگوی رشد شعاعی آن‌ها نسبت داده می‌شود که عملکرد برتر در جهت غیرمحوری را فراهم می‌کند و پیوند بین الیاف و ماتریس را با بهبود قابلیت تر شدن و سطح تماس افزایش می‌دهد. علاقه روزافزون به استفاده از نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت‌های حاوی الیاف به ایجاد چالش منجر می‌شود. بنابراین، نیاز به بررسی بیشتر دارند [۲۶]. در زمینه کامپوزیت‌های حاوی الیاف کربن، اپوکسی نقش مهمی در اتصال الیاف کربن به یکدیگر ایفا می‌کند، یکپارچگی ساختاری فراهم می‌آورد و عملکرد مکانیکی را بهبود می‌بخشد.

جدول ۱- خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده [۳۰].

نمونه	درصد نانوذرات	مدول کشسانی (MPa)	استحکام کششی (MPa)
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با وینیل الکل	۲	۱/۳۵	۵۵
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده پلی‌اکسی اتیلن و آلکیل اتر	۲	۱/۳۴	۵۸
اپوکسی-نانولوله کربنی چنددیواره	۲	۱/۱۸	۴۶
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی دودیواره	۰/۳	-	۶۷/۷۷
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی دودیواره اصلاح‌شده آمینی	۰/۵	-	۶۹/۱۳
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده کربوکسیل	۱/۵	-	۴۶
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده آمینی	۱/۵	-	۵۹/۲
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی ساختار صفحه‌ای	۲۷	۲۲/۳	۴۰۲
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی ساختار صفحه‌ای	۱۰/۶	۲۰/۴	۲۳۱

خواص تخریب گرمایی

تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی سیلان، الیاف بازالت و نانولوله‌های کربنی بررسی شد (جدول ۲). همان‌طور که در جدول مشخص است، وجود سیلان در کامپوزیت اپوکسی و الیاف بازالت خواص گرمایی را افزایش داده که به بهبود در فصل مشترک کامپوزیت اپوکسی و الیاف بازالت منجر شده است [۳۵]. همچنین، خواص گرمایی با وجود نانولوله‌های کربنی بهبود بهتری پیدا می‌کند. با وجود نانولوله‌های کربنی در کامپوزیت اپوکسی حاوی سیلان و الیاف بازالت، چسبندگی در فصل مشترک بهبود می‌یابد، زیرا وجود نانولوله‌های کربنی باعث تأخیر در حرکت زنجیرهای اپوکسی می‌شود و فصل مشترک مواد با رزین اپوکسی گسترش می‌یابد. زغال باقی‌مانده نمونه اپوکسی دارای الیاف بازالت، سیلان و نانولوله‌های کربنی در مقایسه با سایر نمونه‌ها افزایش پیدا می‌کند که موجب افزایش پایداری این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها می‌شود [۲۵].

Wang و همکاران، تجزیه گرمایزن سنجی نمونه نانوکامپوزیت اپوکسی را با وجود نانولوله‌های کربنی (۰/۰۲۵، ۰/۰۵۰، و ۰/۰۷۵ wt) بررسی کردند (شکل ۹). نتایج نشان داد، تخریب نمونه‌های

بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها نشان داده است. افزودن ۰/۲۵ و ۱ wt٪ از نانوالیاف کربنی می‌تواند شروع ترک را به تأخیر اندازد و گسترش ترک را کاهش دهد، در نتیجه استحکام و مدول یانگ کامپوزیت را بهبود بخشد [۳۱]. این بهبود رفتار مکانیکی به نانوالیاف کربنی نسبت داده می‌شود که می‌تواند بخش درخور توجهی از بار را از ماتریس اپوکسی به الیاف تقویت‌کننده منتقل کند. بنابراین، پراکندگی یکنواخت نانوالیاف کربنی نوعی شبکه پیوسته درون ماتریس اپوکسی تشکیل می‌دهد و چسبندگی خوب بین نانوذرات و رزین اپوکسی می‌تواند بارها را به‌طور مؤثرتری منتقل کند [۳۲].

پژوهشگران نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربنی و نانولوله‌های کربنی چنددیواره و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانوالیاف کربن و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با گروه کربوکسیل را سنتز کردند. نتایج نشان داد، مقادیر استحکام کششی، مدول کششی، استحکام خمشی و مدول خمشی نمونه دارای ذرات اصلاح سطحی شده بهبود یافته است. این افزایش خواص مکانیکی به دلیل افزایش خواص بین‌سطحی ایجاد شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند به تولید کامپوزیت‌های پیشرفته استفاده شود [۳۳].

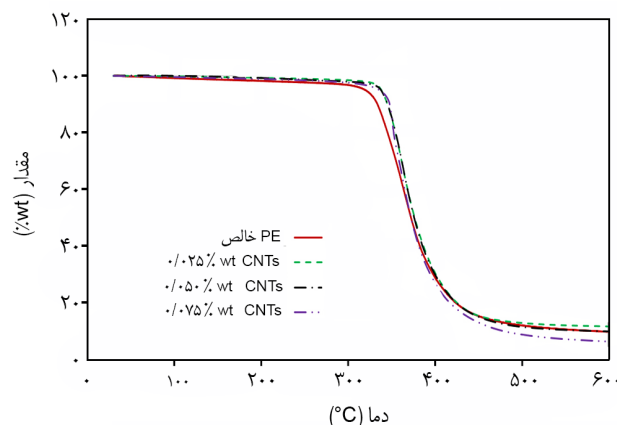
جدول ۲- داده‌های حاصل از تجزیه گرمایزن سنجی [۳۵].

نام نمونه	دمای تخریب اولیه (°C)	دمای تخریب بیشینه (°C)	درصد زغال باقی‌مانده در ۸۰۰ °C	انرژی فعال‌سازی تخریب (kJ/mol)
اپوکسی - الیاف بازالت	۳۸۷	۴۰۰	۷۰/۴	۲۶۹
اپوکسی - الیاف بازالت - ۵٪ سیلان	۳۸۹	۴۰۲	۷۱/۹	۲۷۱/۷
اپوکسی - الیاف بازالت - ۵٪ سیلان - نانولوله‌های کربنی	۳۹۶	۴۰۸	۷۶/۲	۲۹۳/۶

عمر و همکاران به بررسی شکل‌شناسی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با سیلان PDMS پرداختند. نتایج نشان داد، درصد زغال باقی‌مانده رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اصلاح‌شده به‌ترتیب برابر ۸/۲۷ و ۱۰/۸۶ بود. بنابراین، وجود نانوذرات با گروه‌های سیلانی به افزایش پایداری گرمایی این نانوکامپوزیت منجر شده است. همچنین با افزایش سرعت‌های گرمادهی، تخریب گرمایی به دماهای بیشتر انتقال پیدا می‌کند. دلیل این است که سرعت‌های گرمادهی به مرکز واکنش‌گرها نمی‌تواند نفوذ کند و بنابراین، تخریب گرمایی این نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد (شکل ۱۰) [۲۸].

Jeelani و همکاران، تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی اصلاح‌شده با پلی‌فسفاژن آمینی را بررسی کردند. نتایج نشان داد، دمای اولیه تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی در مقایسه با رزین اپوکسی خالص مقدار کمتری است. همچنین، درصد زغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی ۱/۵، ۱، ۰/۵ و ۲٪ wt در دمای ۸۰۰ °C بررسی شد. نتایج نشان داد، همه نمونه‌ها در مقایسه با رزین اپوکسی خالص، زغال باقی‌مانده بیشتری دارند. این بدان معناست که وجود نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده می‌تواند پایداری گرمایی را افزایش دهد. درواقع، زغال تشکیل‌شده موجب کاهش درصد افت وزن و انتقال گرما در طول فرایند تخریب گرمایی می‌شود [۳۰].

Agata و همکاران، تجزیه گرماوزن‌سنجی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی الیاف پلی‌وینیل الکل و نانولوله‌های کربنی چنددیواره را بررسی کردند. نتایج نشان داد، رفتار گرمایی با وجود پلی‌وینیل الکل تغییر زیادی نداشته است. وجود پلی‌وینیل الکل که گرماژم بوده به عدم رفتار گرمایی مناسب منجر شده است. باوجوداین، با وجود نانولوله‌های کربنی زغال باقی‌مانده نانوکامپوزیت افزایش یافته است [۳۱].



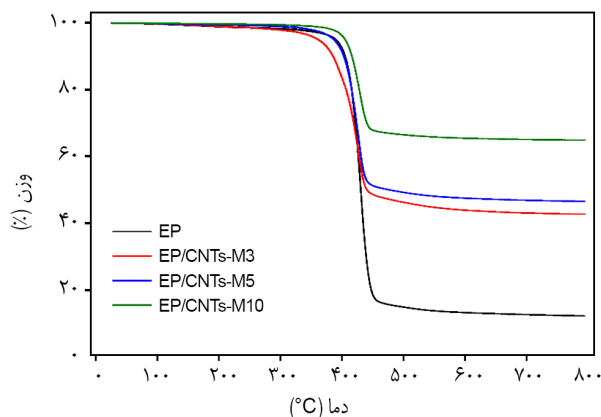
شکل ۹- نمودار گرماوزن‌سنجی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی [۳۰].

نانوکامپوزیت در دمای بیشتری اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر با افزودن نانولوله‌های کربنی می‌توان نتیجه گرفت، پایداری گرمایی نمونه‌های نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد. دلیل آن را می‌توان به پایداری گرمایی بسیار خوب نانولوله‌های کربنی‌ها نسبت داد. نانولوله‌های کربنی رسانای گرمایی عالی هستند که اجازه می‌دهند گرمای اعمال‌شده منتقل شود، به‌طوری‌که گرما در یک مکان متمرکز نشده و تخریب را به تأخیر می‌اندازد [۳۰].

در پژوهش دیگری نواز و همکاران، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوصفحات گرافن و نانولوله‌های کربنی را سنتز و نتایج تخریب گرمایی را بررسی کردند (جدول ۳). نتایج نشان داد، نمونه حاوی ۰/۱٪ wt از نانوذرات مزبور، زغال باقی‌مانده بیشتری در مقایسه با نمونه رزین اپوکسی خالص و سایر نمونه‌ها دارد. تشکیل زغال باقی‌مانده به دلیل قابلیت گرافن در کربنی‌شدن در سطح مشترک پلیمر و پرکننده است. بنابراین به دلیل مقاومت ذاتی گرمایی زیاد نانوپرکننده کربنی، زغال باقی‌مانده افزایش می‌یابد [۲۷].

جدول ۳- داده‌های آزمون تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوصفحات گرافن و نانولوله‌های کربنی [۲۷].

مقدار گرافن و نانولوله‌های کربنی (wt%)	درصد زغال باقی‌مانده	دمای تخریب گرمایی بیشینه (°C)	دمای ۵٪ کاهش وزن (°C)
۰	۹/۸	۴۱۶	۳۶۸
۰/۰۱	۱۶/۹	۴۱۶	۳۷۲
۰/۰۳	۱۴/۳	۴۱۶	۳۷۵
۰/۰۵	۱۴/۷	۴۱۶	۳۷۷
۰/۱	۱۲/۹	۴۱۶	۳۷۴
۰/۵	۱۶/۳	۴۱۶	۳۶۸
۱	۱۳/۸	۴۱۵	۳۷۲

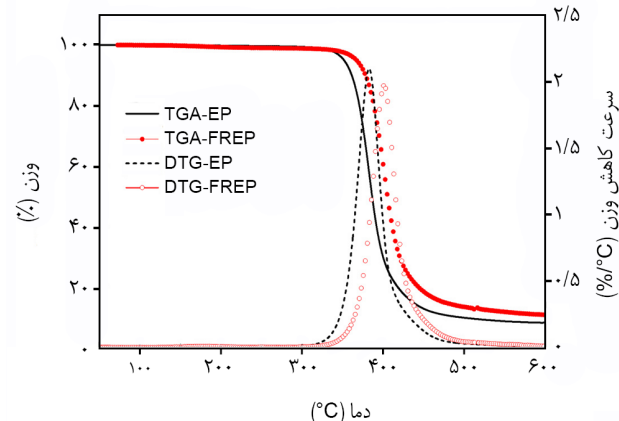


شکل ۱۱- نمودار درصد کاهش وزن با دمای نمونه‌های رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده ملامین پلی فسفات [۳۵].

نمونه wt % ۲۵/۰ بهبود بهتری داشت. دما در نقطه ۳۰٪ کاهش وزن در کامپوزیت خالص اپوکسی °C ۴۰۶ بود و با افزودن wt % ۱ پرکننده به °C ۴۸۳/۸۹ افزایش یافت. این مسئله نشانگر بهبود ۱۹٪ نمونه نسبت به کامپوزیت اپوکسی خالص است. همچنین زغال باقی‌مانده نمونه‌های نانوکامپوزیت در مقایسه با رزین اپوکسی خالص افزایش داشت که نشان از بهبود رفتارپایداری گرمایی نانوکامپوزیت‌ها دارد [۲۶].

پژوهشگران به‌منظور افزایش پایداری گرمایی، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده ملامین پلی فسفات را سنتز کردند. نتایج نمودار درصد کاهش وزن (شکل ۱۱) را نشان داد که با افزایش محتوای نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با ملامین پلی فسفات (تأخیرانداز شعله) در کامپوزیت‌های اپوکسی، مقدار زغال باقی‌مانده این کامپوزیت‌ها افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، مقدار باقی‌مانده کامپوزیت با wt % ۵ به wt % ۵۰ و با wt % ۱۰ به wt % ۷۰ می‌رسد. این بهبود مقاومت گرمایی کامپوزیت‌ها به‌دلیل افزایش مقدار ملامین پلی فسفات و ساختار شبکه‌ای بین نانولوله‌های کربنی است که می‌تواند از تجزیه گرمایی ماتریس اپوکسی جلوگیری کند. همچنین، ملامین پلی فسفات به جلوگیری از تخریب کامپوزیت‌ها کمک می‌کند و در نتیجه باعث بهبود مقاومت گرمایی آن‌ها می‌شود. به‌عبارت دیگر، پلی فسفات از طریق واکنش حلقه‌گشا می‌تواند روی سطح نانولوله‌های کربنی پیوند ایجاد و نقش بازدارندگی شعله را ایفا کند [۳۳].

تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانوذرات زیرکونیم دی‌اکسید، اتریم اکسید و نانولوله‌های کربنی چنددیواره بررسی شد. پایداری گرمایی یکی از ویژگی‌های مهم مواد پلیمری برای تعیین



شکل ۱۰- نمودار درصد کاهش وزن رزین اپوکسی و نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله کربنی اصلاح‌شده با سیلان [۲۹].

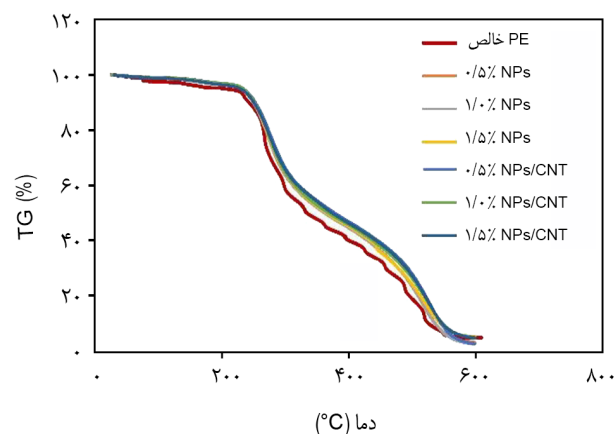
خواص تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی با نانولوله‌های کربنی و نانوذرات آلومینیم اکسید بررسی شد. نتایج نشان داد، افزودن نانوذرات به اپوکسی خالص به‌طور درخور توجهی دمای شروع تخریب را به تأخیر می‌اندازد و پایداری گرمایی را افزایش می‌دهد. نانوذرات به‌عنوان نوعی مانع فیزیکی عمل می‌کنند و واکنش‌های تخریب شبکه اپوکسی را کاهش می‌دهند. به‌ویژه، نانولوله‌های کربنی به‌دلیل شکل یک‌بعدی و داشتن سطح گسترده، پایداری گرمایی بیشتری نسبت به نانوذرات آلومینیم اکسید فراهم می‌کنند. با این حال، افزایش مقدار نانوذرات ممکن است باعث تجمع یا توزیع غیریکنواخت آن‌ها در ماتریس شود که می‌تواند اثر منفی بر پایداری گرمایی داشته باشد. در نهایت نتایج نشان داد، نانوذرات آلومینیم اکسید به‌دلیل سطح واکنشی بیشتر باعث کاهش وزن و افزایش تشکیل لایه‌های رابط متراکم و مقاوم می‌شوند. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود خواص گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی کمک کنند و زمینه‌ساز پژوهش‌های بیشتر در این حوزه باشند [۳۲].

Wang و همکاران، تخریب گرمایی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره و صفحات گرافن چندلایه عامل‌دارشده با گروه آمینی را بررسی کردند. به‌طورکلی، افزودن این پرکننده‌ها به رزین اپوکسی باعث بهبود پایداری گرمایی کامپوزیت می‌شود. تخریب کامپوزیت در سه مرحله انجام می‌شود: مرحله اول °C ۳۰۰ تا °C ۴۰۰، مرحله دوم °C ۴۰۰ تا °C ۶۰۰ و مرحله سوم °C ۶۰۰ تا °C ۷۰۰. افزودن wt % ۲۵/۰ از پرکننده‌ها پایداری گرمایی را حفظ کرد، اما با افزایش به wt % ۵۰/۰ و wt % ۱، بهبود درخور توجهی در پایداری گرمایی مشاهده شد. به‌ویژه، کامپوزیت با wt % ۵/۰ حاوی نانولوله‌های کربنی چنددیواره و صفحه‌های گرافن چندلایه عامل‌دارشده با گروه آمینی نسبت به کامپوزیت خالص اپوکسی و

بهبود یابد و از تجمع نانولوله‌ها جلوگیری شود. نتایج نشان داد، افزودن ۰/۵٪ wt از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده به رزین اپوکسی باعث افزایش درخور توجهی در استحکام‌های کششی، خمشی و فشاری و نیز مدول‌های مربوط شد. همچنین، اصلاح سیلان باعث افزایش زاویه تماس آب در فیلم‌های اپوکسی به میزان ۳۲٪ شد [۳۳]. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی و نانوذرات سیلیکون دی‌اکسید بررسی شد. نتایج نشان داد، ترکیب رزین اپوکسی دارای ۱٪ نانولوله‌های کربنی و ۳٪ wt نانوسیلیکا، بیشترین افزایش به میزان ۴۶٪ در استحکام برشی را به همراه دارد. همچنین نتایج آزمون‌های تنش نشان داد، کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات، استحکام و کشش بیشتری نسبت به اپوکسی خالص دارد [۳۴].

در پژوهش دیگری، دی‌فنیل سولفون هیدروکسی بیس‌پارااستر فسفریک تری‌گلیسیدیل اتر و نانولوله‌های کربنی سنتز شد. نتایج نشان داد، افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس اپوکسی، خواص گرمایی و رئولوژیکی آن را به‌طور درخور توجهی بهبود می‌بخشد [۲۹]. برهم‌کنش ضعیف نانولوله‌های کربنی چنددیواره و ماتریس اپوکسی باعث تجمع نانولوله‌ها و کاهش عملکرد نانوکامپوزیت‌ها می‌شود. بنابراین پژوهشگران نانولوله‌های کربنی را با آمینوسیلان دوعاملی اصلاح کردند. نتایج نشان داد، افزودن ۰/۵٪ wt نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده به رزین اپوکسی باعث بهبود درخور توجهی در خواص مکانیکی نسبت به نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌نشده می‌شود. همچنین اصلاح نانولوله‌های کربنی، باعث افزایش ۲۵٪ در پخت رزین اپوکسی شد [۳۰].

پژوهش‌ها نشان می‌دهد، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت به‌طور گسترده در زمینه‌های مهندسی مختلف استفاده می‌شوند، اما نیاز به بهبود مقاومت در برابر خوردگی در محیط‌های سخت دارند. تأثیر خوردگی آب دریا بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف بازالت بررسی شد که با عامل سیلانی KH 560 و نانولوله‌های کربنی کربوکسیل‌دار شده اصلاح شده‌اند. نتایج نشان داد، با افزایش زمان و دمای خوردگی، عملکرد خمشی و مقاومت برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت به‌طور درخور توجهی کاهش می‌یابد. کامپوزیت‌های اصلاح‌شده نسبت به انواع اصلاح‌نشده، مقاومت به خوردگی بهتری در برابر آب دریا نشان دادند. همچنین، اصلاح هم‌زمان می‌تواند به‌طور مؤثر مقاومت در برابر خوردگی را بهبود بخشد. این پژوهش برای توسعه نانوکامپوزیت‌های اپوکسی و کاربرد آن در محیط‌های دریایی اهمیت زیادی دارد [۳۱]. پژوهش‌ها نشان می‌دهد، استفاده از نانومواد در چسب‌های



شکل ۱۲- نمودار درصد کاهش وزن رزین اپوکسی خالص و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی [۳۵].

فرایند و کاربرد آن‌هاست، زیرا بر خواص نهایی محصولات اثر می‌گذارد (شکل ۱۲). نتایج نشان داد، تمام نمونه‌ها رفتار تخریب گرمایی مشابهی داشتند، بدین معنی که پرکننده‌های موجود به‌طور درخور ملاحظه‌ای فرایند تخریب گرمایی رزین اپوکسی خالص را تغییر نداده‌اند که به‌دلیل عدم استفاده از مقدارهای کم درصد وزنی نانوذرات است [۳۰]. نتایج نمودار، درصد کاهش وزن را نشان می‌دهد. تخریب گرمایی دومارحله‌ای است. مرحله اول تخریب از ۲۰۰ °C به ۳۰۰ °C و مرحله دوم از ۴۵۰ °C به ۵۵۰ °C انجام می‌شود. اولین مرحله تخریب گرمایی نانوکامپوزیت‌ها، عمدتاً به‌دلیل تخریب مواد با وزن مولکولی کم، عوامل سخت‌کننده یا عدم واکنش سخت‌کننده با زنجیرهای اپوکسی است، درحالی‌که مرحله دوم تجزیه به‌دلیل وجود زنجیر بلند در رزین اپوکسی است [۳۱].

پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده

پژوهشگران، نانوکامپوزیت اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی و گرافن اکسید را سنتز کردند. نتایج نشان داد، نوعی ساختار هیبرید ناهمگن با نانولوله‌های کربنی چنددیواره و گرافن اکسید تولید شد که به بهبود خواص مکانیکی و گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی کمک کرد. این هیبرید با جلوگیری از کلوخه‌ای شدن و بهبود پراکنش نانوذرات، شبکه رسانای چندبعدی را در ماتریس اپوکسی ایجاد کرد. با افزودن تنها ۰/۵٪ wt از این هیبرید، خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و رسانندگی گرمایی کامپوزیت‌های پر شده به‌طور درخور توجهی بهبود یافت [۳۲].

در پژوهش دیگری، نانولوله‌های کربنی چنددیواره با استفاده از آمینوسیلان دوکاره اصلاح شدند تا برهم‌کنش‌های بین‌سطحی

اپوکسی می‌تواند به‌طور درخور ملاحظه خواص مکانیکی و گرمایی آن‌ها را بهبود بخشد. مدل‌های مختلف چسب اپوکسی نشان دادند، درجه شبکه‌ای شدن اثر زیادی بر عملکرد مکانیکی دارد و افزایش آن، حرکت زنجیرهای مولکولی را محدود می‌کند و استحکام چسب را افزایش می‌دهد. همچنین، چسب‌های اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکا و نانولوله‌های کربنی نسبت به چسب‌های حاوی یک نانوماده، خواص بهتری را نشان می‌دهند. این نتایج اهمیت زیادی در بهبود عملکرد نانوکامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف در کاربردهای چسب‌های اپوکسی دارد [۳۲].

به‌منظور بهبود استحکام، خواص مکانیکی، چسبندگی و پایداری گرمایی یک رزین اپوکسی دوفازی اپوکسی و رزین فنولی با استفاده از نانولوله‌های کربنی چنددیواره اصلاح‌شده با کربوکسیل و پودر لاستیک انجام شد. اثر تقویت‌کننده ترکیبی در مخلوط بر خواص مکانیکی، پایداری گرمایی و میکروساختار چسب اپوکسی و رزین فنولی ارزیابی شد. براساس نتایج آزمایش کشش با افزودن ۰/۵ wt٪ از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده و ۱۵ phr پودر لاستیک به ماتریس اپوکسی و فنولی، استحکام کششی ۳۲٪، مدول ۲۷٪ و استحکام ضربه‌ای ۶۴٪ افزایش یافت. همچنین، افزودن یک wt٪ نانوذرات و پودر لاستیک موجب افزایش ۱۵٪ در استحکام برشی لایه‌ای شد. مشاهده شد، پایداری گرمایی نمونه‌های فرمول‌دارشده نسبت به کامپوزیت اپوکسی خالص نیز روند افزایشی داشته است [۳۳].

اصلاح سطحی نانولوله‌های کربنی چنددیواره با استفاده از آمینوسیلان دوعاملی به بهبود درخور توجهی در خواص مکانیکی رزین اپوکسی منجر شد. با افزودن ۰/۵ wt٪ از نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده، استحکام کششی، خمشی و فشاری به‌ترتیب ۳۳، ۵۳ و ۴۰٪ افزایش یافت و مدول‌های مربوط نیز به‌ترتیب ۵۶، ۸۵ و ۱۱۰٪ بهبود یافتند. همچنین، افزایش زاویه تماس آب به میزان ۳۲٪ نشانگر بهبود خواص سطحی فیلم‌های اپوکسی بود. این نتایج نشان می‌دهد که اصلاح نانولوله‌ها نه تنها به بهبود خواص مکانیکی کمک کرده، بلکه در فرایند پخت رزین اپوکسی نیز نقش مؤثری را ایفا کرده است [۳۴].

ماتریس اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه با ترکیبی هیبریدی از پرکننده‌های اصلاح‌شده و کامپوزیت‌ها با استفاده از فن پیشرفته پولاتروژن ساخته شدند. این پژوهش به بررسی هم‌افزایی بین نانوپرکننده‌های کربنی و نقش هیدرات آلومینیم در ویژگی‌های گرمایی پرداخته است. نسبت بهینه ۲ wt٪ نانولوله‌های کربنی چنددیواره و ۳ wt٪ گرافن برای بهبود خواص گرمایی تعیین شد. با استفاده از تحلیل پرتو ایکس، وجود این دو پرکننده کربنی تأیید شد.

هیدرات آلومینیم به ماتریس اپوکسی اضافه شد تا خواص گرمایی را بهبود بخشد. ارزیابی خواص گرمایی کامپوزیت‌ها با استفاده از تجزیه گرماوزن‌سنجی انجام شد. استفاده از دو پرکننده کربنی سبب بهبود خواص گرمایی شد. برخلاف انتظار، کامپوزیت‌های با پرکننده‌های هیبریدی دچار حداقل تخریب گرمایی شدند. توزیع یکنواخت نانوذرات و پیوند بین پرکننده‌ها و اپوکسی برای بهبود خواص گرمایی حیاتی به‌نظر می‌رسد. نسبت پرکننده‌های کربنی به‌کاررفته به هم‌راستایی ترجیحی آن‌ها کمک کرده است و بهبودهای درخور توجهی در خواص گرمایی مشاهده شد. دمای انتقال شیشه‌ای به‌دلیل افزودن نانوپرکننده‌های کربنی و هیدرات آلومینیم، ۱۳ °C افزایش یافته است [۳۵].

برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی تقویت‌شده با الیاف آرامید، نانولوله‌های کربنی آمین‌دارشده و پلی‌اتیلن ایمین به‌طور موفقیت‌آمیز به‌صورت لایه‌ای روی سطح الیاف آرامید با استفاده از پلی‌دوپامین به‌عنوان لایه اولیه رسوب داده شدند. نتایج نشان داد، با رسوب‌دهی موفقیت‌آمیز خواص بین‌سطحی و مکانیکی کامپوزیت‌ها به‌تدریج بهبود یافت. کامپوزیت ساخته‌شده، بهترین اثر تقویت‌کنندگی را نشان داد و استحکام کششی تک‌لیفی آن نسبت به الیاف آرامید اصلاح‌نشده به میزان ۸/۱٪ افزایش یافت. همچنین، زاویه تماس با رزین اپوکسی ۲۱/۹٪ کاهش یافت و انرژی‌های بین‌سطحی و چسبندگی به‌ترتیب ۱۱۵ و ۲۱/۴٪ افزایش یافت. افزون‌براین، خواص بین‌سطحی و مکانیکی به‌طور درخور توجهی بهبود یافت که به‌دلیل تعداد زیاد گروه‌های آمینی فعال در لایه پوشش پلی‌دوپامین، پلی‌اتیلن ایمین و نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده روی سطح الیاف بود که برهم‌کنش شیمیایی الیاف و ماتریس اپوکسی را تقویت کرد. این نتایج نشانگر قابلیت بالقوه زیاد اصلاح سطحی الیاف آرامید برای بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های اپوکسی است [۳۵-۳۰]. در جدول ۴، پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده جمع‌آوری شده است.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد، اصلاحات سطحی و استفاده هم‌زمان از نانوذرات مختلف در ماتریس اپوکسی به بهبود پراکندگی و برهم‌کنش‌های بین‌سطحی مواد منجر می‌شود و خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها را به‌طور درخور توجهی بهبود می‌بخشد. افزودن نانولوله‌های کربنی

جدول ۴- پیشرفت‌های اخیر در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده [۳۵-۲۰].

نمونه	سال	ملاحظات
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-گرافن اکسید	۲۰۲۴	ترکیب ساختار ناهمگنی از نانولوله‌های کربنی چنددیواره و گرافن اکسید با بهبود خواص مکانیکی و گرمایی کامپوزیت‌های اپوکسی، به واسطه اثر هم‌افزایی این دو ماده، به‌عنوان روش نویدبخشی برای طراحی کامپوزیت‌های پلیمری در کاربردهای مدیریت گرمایی معرفی شد.
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-نانوذرات سیلیکون دی‌اکسید	۲۰۲۴	افزودن نانوذرات به چسب‌های اپوکسی، به‌طور درخور توجهی استحکام برشی و کششی را بهبود بخشید.
دی‌فنیل سولفون هیدروکسی بیس‌پارااستر فسفریک تری‌گلیسیدیل اتر-نانولوله‌های کربنی	۲۰۲۴	افزودن نانولوله‌های کربنی به ماتریس اپوکسی، باعث بهبود خواص گرمایی و مکانیکی آن شد.
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-الیاف شیشه	۲۰۲۴	استفاده از نانوپرکننده‌های هیبریدی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه، بهبود خواص گرمایی و مکانیکی را در دماهای زیاد نشان داد، اما سرعت کاهش استحکام در این کامپوزیت‌ها بیش از کامپوزیت‌های دارای یک نانوپرکننده بود.
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-آمینوسیلان دوعاملی	۲۰۲۳	اصلاح نانولوله‌های کربنی با آمینوسیلان دوعاملی باعث بهبود خواص مکانیکی و افزایش پخت رزین اپوکسی شد.
اپوکسی-الیاف بازالت-سیلان-نانولوله‌های کربنی کربوکسیل‌دارشده	۲۰۲۴	کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف بازالت اصلاح‌شده با سیلان و نانولوله‌های کربنی، مقاومت بهتری در برابر خوردگی در محیط‌های دریایی نشان دادند و به‌طور مؤثر خواص مکانیکی آن‌ها را بهبود بخشیدند.
اپوکسی-الیاف کربن-سیلیکای اصلاح‌شده با هیدروکسیل-نانولوله‌های کربنی	۲۰۲۴	چسبندگی و خواص مکانیکی و گرمایی بهبود یافت.
اپوکسی-رزین فنولی-نانولوله‌های کربنی کربوکسیل‌دارشده-پودر لاستیک	۲۰۲۳	استفاده از نانولوله‌های کربنی و پودر لاستیک در رزین اپوکسی حاوی رزین فنولی موجب بهبود درخور توجهی در استحکام، خواص مکانیکی و پایداری گرمایی آن شد.
اپوکسی-نانولوله‌های کربنی-آمینوسیلان دوعاملی	۲۰۲۳	اصلاح سطحی نانولوله‌های کربنی چنددیواره با آمینوسیلان دوعاملی بهبود درخور توجهی در خواص مکانیکی و سطحی رزین اپوکسی ایجاد کرد.
اپوکسی-الیاف شیشه-نانولوله‌های کربنی-نانوصفحات گرافن-آلومینیم تری‌هیدرات	۲۰۲۱	اصلاح ماتریس اپوکسی با ترکیب هیبریدی پرکننده‌های کربنی و آلومینیم هیدرات به بهبود درخور توجه خواص گرمایی و افزایش دمای انتقال شیشه‌ای به میزان 13°C منجر شد.
اپوکسی-الیاف آرامید-نانولوله‌های کربنی اصلاح‌شده با آمین-پلی‌اتیلن ایمین	۲۰۲۱	اصلاح سطحی الیاف آرامید با نانولوله‌های کربنی آمین‌دارشده و پلی‌اتیلن ایمین موجب بهبود درخور توجه خواص مکانیکی و بین‌سطحی کامپوزیت‌های رزین اپوکسی شد.

رسانندگی گرمایی و سطحی مناسب، باعث تأخیر در تخریب گرمایی و افزایش پایداری گرمایی شده‌اند. اصلاحات سطحی نظیر استفاده از سیلان و پلی‌فسفات‌ها نیز چسبندگی میان اجزای مواد را بهبود داده و مقاومت در برابر تخریب گرمایی را افزایش داده‌اند. به‌طورکلی، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی قابلیت بالقوه زیادی برای ایجاد مواد کارآمد در کاربردهای صنعتی، به‌ویژه در شرایط محیطی سخت، دارند. پژوهش‌های آینده می‌تواند بر بهینه‌سازی ترکیبات نانوپرکننده‌ها و بررسی دقیق‌تر برهم‌کنش‌های بین‌سطحی متمرکز شود تا خواص این مواد در دماهای بیشتر و شرایط متنوع محیطی بهبود یابد.

اصلاح‌شده همراه با سایر نانوذرات مانند صفحه‌های گرافن، نانومکسین و نانوذرات اکسید فلزی به افزایش استحکام، سختی و مدول یانگ کمک کرده است. نانوکامپوزیت‌های هیبریدی که از ترکیب نانولوله‌های کربنی و سایر نانوذرات اصلاح‌شده بهره می‌برند، بهترین عملکرد را از نظر خواص مکانیکی نشان داده‌اند. این یافته‌ها اهمیت انتخاب مناسب نوع نانوذرات و فنون اصلاح سطح آن‌ها را در بهینه‌سازی خواص نانوکامپوزیت‌های اپوکسی برای کاربردهای صنعتی مختلف برجسته می‌کند. همچنین، افزودن نانوپرکننده‌هایی مانند سیلان، الیاف بازالت و نانولوله‌های کربنی خواص گرمایی و مکانیکی این کامپوزیت‌ها را به‌طور درخور توجهی بهبود بخشیده است. نانولوله‌های کربنی با ویژگی‌های

مراجع

1. Ahmadi Z., Epoxy in Nanotechnology: A Short Review, *Prog. Org. Coat.*, **132**, 445-448, 2019.
2. Zabihi O., Khayyam H., Fox B.L., and Naebe M., Enhanced Thermal Stability and Lifetime of Epoxy Nanocomposites Using Covalently Functionalized Clay: Experimental and Modelling, *New J. Chem.*, **39**, 2269-2278, 2015.
3. Dzuhri S., Uhana N.Y., and Khairulazfar M., Thermal Stability and Decomposition Study of Epoxy/Clay Nanocomposites, *Sains Malays*, **44**, 441-448, 2015.
4. Singh S., Srivastava V.K., and Prakash R.R., Characterisation of Multi-walled Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Mater. Sci. Technol.*, **29**, 1130-1134, 2013.
5. Chen H.O., Jacobs B., Wua W.G., Rudiger B., and Schadel B., Effect of Dispersion Method on Tribological Properties of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites, *Polym. Test.*, **26**, 351-360, 2007.
6. Ton-That M.-T., Ngo T.-D., Ding P., Fang G., Cole K.C., and Hoa S.V., Epoxy Nanocomposites: Analysis and Kinetics of Cure, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1132-1141, 2004.
7. Tezel G.B., Sarmah A., Desai S.A., Vashisth M., and Green J., Kinetics of Carbon Nanotube-Loaded Epoxy Curing: Rheometry, Differential Scanning Calorimetry, and Radio Frequency Heating, *Carbon*, **175**, 1-10, 2021.
8. Ngo T.D., That T., Hoa M.T., and Cole K.C., Curing Kinetics and Mechanical Properties of Epoxy Nanocomposites Based on Different Organoclays, *Polym. Eng. Sci.*, **47**, 649-661, 2007.
9. Jin F.L., Li X., and Park S.J., Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review, *J. Ind. Eng. Chem.*, **29**, 1-11, 2015.
10. Schlagenhau F.L., Kuo Y.Y., Bahk Y.K., Nüesch F., and Wang J., Decomposition and Particle Release of a Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposite at Elevated Temperatures, *J. Nanoparticle Res.*, **17**, 440, 2015.
11. Zhou Y.X., Wu P.X., Cheng Z.Y., Ingram J., and Jeelani, S., Improvement in Electrical, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy by Filling Carbon Nanotube, *Express Polym. Lett.*, **2**, 40-48, 2008.
12. Kim J.A., Seong D.G., Kang T.J., and Youn J.R., Effects of Surface Modification on Rheological and Mechanical Properties of CNT/Epoxy Composites, *Carbon N. Y.*, **44**, 1898-1905, 2006.
13. Málek J., A Computer Program for Kinetic Analysis of Non-isothermal Thermo-analytical Data, *Thermochim. Acta*, **138**, 337-346, 1989.
14. Málek J., The Kinetic Analysis of Non-isothermal Data, *Thermochim. Acta*, **200**, 257-269, 1992.
15. Reso D., Cascaval C.N., Mustata F., and Ciobanu C., Cure Kinetics, Epoxy Resins Studied by Nonisothermal DSC Data, *Thermochim. Acta*, **383**, 119-127, 2002.
16. Vyazovkin S., Burnham A.K., Favregeon L. et al., ICTAC Kinetics Committee Recommendations for Analysis of Multi-step Kinetics, *Thermochim. Acta*, **689**, 178597, 2020.
17. MaP C., Kim J.K., and Tang B.Z., Effects of Silane Functionalization on the Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites, *Compos. Sci. Technol.*, **67**, 2965-2972, 2007.
18. Ventura I.A., Rahaman A., and Lubineau G., The Thermal Properties of a Carbon Nanotube-Enriched Epoxy: Thermal Conductivity, Curing, and Degradation Kinetics, *J. Appl. Polym. Sci.*, **130**, 2722-2733, 2013.
19. Špitalský Z., Matějka L., Šlouf M. et al., Modification of Carbon Nanotubes and Its Effect on Properties of Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposites, *Polym. Compos.*, **30**, 1378-1387, 2009.
20. Li C., Kang N.J., Labrandero S.D., Wan J., González C., and Wang D.Y., Synergistic Effect of Carbon Nanotube and Polyethersulfone on Flame Retardancy of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**, 1040-1047, 2014.
21. Xue Y., Shen M., Zeng S. et al., A Novel Strategy for Enhancing the Flame Resistance, Dynamic Mechanical and the Thermal Degradation Properties of Epoxy Nanocomposites, *Mater. Res. Express*, **6**, 125003, 2019.
22. Puglia D., Valentini L., and Kenny J.M., Analysis of the Cure Reaction of Carbon Nanotubes/Epoxy Resin Composites through Thermal Analysis and Raman Spectroscopy, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 452-458, 2003.
23. Zheng X., Li D., Feng C., and Chen X., Thermal Properties and Non-isothermal Curing Kinetics Of Carbon Nanotubes/ionic Liquid/epoxy Resin Systems, *Thermochim. Acta*, **618**, 18-25, 2015.
24. Aradhana R., Mohanty S., and Nayak S.K., High Performance Epoxy Nanocomposite Adhesive: Effect of Nanofillers on Adhesive Strength, Curing and Degradation Kinetics, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **84**, 238-249, 2018.
25. Cividanés L.S., Simonetti E.A., Campos T.M., Bettoni T.S., Brunelli D.D., and Thim G.P., Anomalous Behavior of Thermal Stability of Amino-carbon Nanotube-Epoxy Nanocomposite, *J. Compos. Mater.*, **49**, 3067-3073, 2015.
26. Wang Y.T., Wang C.S., Yin H.Y., Wang L.L., Xie H.F., and Cheng R.S., Carboxyl-Terminated Butadiene-Acrylonitrile-Toughened Epoxy/Carboxyl-Modified Carbon Nanotube Nanocomposites: Thermal and Mechanical Properties,

- Express Polym. Lett.*, **6**, 719-728, 2012.
27. Starink M.J., The Determination of Activation Energy from Linear Heating Rate Experiments: A Comparison of the Accuracy of Isoconversion Methods, *Thermochim. Acta.*, **404**, 163-176, 2003.
 28. Karami M.H., Kalaei M.R., Mazinani S. et al., Isoconversional Model Approach and Cure Kinetics of Epoxy/ NBR Nanocomposites, *Proceeding of the 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020)*, Tarbiat Modares University, 9-10, 9-12 November, 2020.
 29. Karami M.H. and Kalaei M.R., Curing of Epoxy/UFNBRP Nano Composites Using Calorimetric Method, *Proceeding of the 11th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2020)*, Tehran University, 15-17, 15-17 April, 2020.
 30. Karami M.H., Kalaei M.R., and Mazinani S., Chemorheology of Nano Acrylonitrile Butadiene Rubber (n-NBR)/Epoxy Nanocomposites, *Proceeding of the 1st International Conference on Rheology (ICOR 2019)*, Iran Polymer and Petrochemical Institute, 104-105, 17-18 December, 2019.
 31. Karami M.H. and Kalaei M.R., Modeling of Curing Kinetics of Epoxy Nanocomposites by Time Sweep Method, *Proceeding of the National Conference on Advanced Technologies in Energy, Water and Environment*, Sharif Energy Research Institute, 234-241, 3 March, 2019.
 32. Ibid 209-216.
 33. Karami M.H. and Kalaei M.R., A Review of the Applications of Cross-linked Elastomeric Nanoparticles, *Iran. Rubber Mag. (Persian)*, **25**, 37-56, 2020.
 34. Karami M.H. and Kalaei M.R., A Review of the Curing Kinetics of Epoxy Nanocomposites/Nanoclay, *Iran Polym. Technol. Res. Dev. (Persian)*, **6**, 29-38, 2021.
 35. Karami M.H. and Kalaei M.R., Review of Degradation Kinetics of Epoxy Nanocomposites in the Presence of Clay Nanoparticles, *Polymerization (Persian)*, **11**, 66-76, 2021.