

The Effect of Magnetic Field on Physico-Mechanical Properties of Epoxy-Based Fe₃O₄/GNP Hybrid Nanocomposites

Mohsen Ghiasvand¹, Hamid Fazeli^{1*}, Jafar Eskandari Jam¹, Abbas Kebritchi²

1. Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, P.O. Box: 1774- 15875, Tehran, Iran
2. Department of Chemical Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Postal Code: 1698715461, Tehran, Iran

Received: 6 January 2025, accepted: 12 July 2025

ABSTRACT

Hypothesis: In recent years, graphene nanosheet (GNP)-based nanocomposites and their derivatives have gained considerable attention due to their favorable physical and mechanical properties. Magnetic nanoparticles, when influenced by a magnetic field, can prevent sedimentation in polymers by overcoming surface forces and particle agglomeration. Given the magnetic characteristics of iron oxide (Fe₃O₄) and the high strength of GNP, the development of Fe₃O₄/GNP hybrid nanocomposites aims to achieve uniform dispersion and enhanced mechanical performance.

Methods: The present research investigates the effect of GNP (0.3, 0.5, and 0.7% by wt) and Fe₃O₄ (2, 5, and 8% by wt) concentrations on the physical and mechanical properties of epoxy resin. Two novel approaches were employed using a high-shear turbo mixer in the presence and absence of a low-intensity magnetic field (90 Gauss) to evaluate nanoparticle dispersion and distribution. Subsequently, glass fiber-reinforced epoxy nanocomposites were fabricated, and their mechanical properties were assessed.

Findings: XRD, SEM/TEM, and VNA analyses confirmed that the magnetic field enhances nanoparticle dispersion. This is attributed to interactions between the functional groups of graphene and the active surface of Fe₃O₄, leading to the formation of Fe₃O₄/GNP hybrid structures. The magnetic field promotes the initial dispersion of Fe₃O₄ particles, followed by the coupled GNPs. Tensile tests under magnetic field application showed a 26.41% increase in strength, 60.2% in toughness, 26.7% in elongation, and 0.11% decrease in modulus compared to neat epoxy. Moreover, using the reinforced resin, glass/epoxy composites exhibited 12% increase in tensile strength, 1.87% decrease in tensile modulus, 48% increase in flexural strength, and 13.5% increase in flexural modulus compared to unreinforced glass/epoxy. These materials are suitable for lightweight aerospace and aviation structures.

Keywords:

nanocomposite,
high-shear turbo mixer,
Fe₃O₄/GNP,
magnetic field,
mechanical properties

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: fazeli@mut.ac.ir

Please cite this article using:

Ghiasvand M., Fazeli H., Eskandari Jam J., Kebritchi A., The Effect of Magnetic Field on Physico-Mechanical Properties of Epoxy-Based Fe₃O₄/GNP Hybrid Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **37**, 551-566, 2025.

اثر میدان مغناطیسی بر خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی نانوصفحه‌های گرافن- Fe_3O_4 بر پایه اپوکسی

دسترس‌پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هفتم، شماره ۶،

صفحه ۵۶۶-۵۵۱، ۱۴۰۳

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2025.35637.2370

محسن غیاثوند^۱، حمید فاضلی^{۱*}، جعفر اسکندری جم^۱، عباس کبریت‌چی^۲

۱- تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۱۷۷۴

۲- تهران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، گروه مهندسی شیمی، کد پستی ۱۶۹۸۷۱۵۴۶۱

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۱

چکیده

فرضیه: در سال‌های اخیر نانوکامپوزیت‌های بر پایه نانوصفحه‌های گرافن (GNP) و مشتقات آن با ارائه خواص فیزیکی-مکانیکی مناسب توجه زیادی را جلب کرده‌اند. از سوی دیگر، نانوذرات مغناطیسی تحت تأثیر میدان با غلبه بر نیروهای سطحی و تجمع ذرات می‌توانند از ته‌نشینی در پلیمرها جلوگیری کنند. بر این اساس با توجه به مشخصه‌های مغناطیسی آهن اکسید (Fe_3O_4) و خواص استحکامی زیاد نانوصفحه‌های گرافن، ساخت نانوکامپوزیت‌های هیبریدی Fe_3O_4 و نانوصفحه‌های گرافن برای دستیابی به توزیع، پراکنش مناسب و استحکام زیاد از اهداف این مقاله است. روش‌ها: در پژوهش حاضر اثر غلظت نانوصفحه‌های گرافن (۰/۳، ۰/۵ و ۰/۷٪ وزنی) و Fe_3O_4 (۲، ۵ و ۸٪ وزنی) بر خواص فیزیکی-مکانیکی اپوکسی بررسی شد. از این رو، با به‌کارگیری ذرات در دو روش جدید با اعمال میدان مغناطیسی با شدت بسیار کوچک (۹۰ G) و بدون میدان و نیز هم‌زمان با اختلاط برشی سرعت‌زیاد، پراکنش و توزیع نانوذرات بررسی شد. در ادامه، نانوکامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده ساخته و خواص مکانیکی آن‌ها ارزیابی شد. یافته‌ها: نتایج پراش پرتو X (XRD)، میکروسکوپی الکترونی پویشی و عبوری (SEM/TEM) و تحلیلگر شبکه بُرداری (VNA) نشان داد، اعمال میدان مغناطیسی موجب بهبود اختلاط نانوذرات در رزین‌های تقویت‌شده می‌شود. زیرا برهم‌کنش‌های گروه‌های عاملی گرافن و سطح فعال فلزی Fe_3O_4 به تشکیل Fe_3O_4 /GNP جفت‌شده منجر می‌شود. اعمال میدان مغناطیسی سبب پراکنش و توزیع مناسب در ابتدا برای ذرات Fe_3O_4 و سپس نانوصفحه‌های گرافن جفت‌شده با آن می‌شود. به‌طوری که نتایج آزمون کشش با اعمال میدان مغناطیسی، افزایش ۲۶/۴۱٪ استحکام، ۶۰/۲٪ چقرمگی، ۲۶/۷٪ ازدیاد طول و کاهش ۰/۱۱٪ مدول را نسبت به اپوکسی خالص نشان می‌دهد. همچنین، با استفاده از رزین تقویت‌شده، کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه ساخته شد که باعث افزایش ۱۲٪ استحکام کششی، کاهش ۱/۸۷٪ مدول کششی، افزایش ۴۸٪ استحکام خمشی و افزایش ۱۳/۵٪ مدول خمشی در مقایسه با الیاف شیشه-اپوکسی خالص شد. این محصول در طراحی، ساخت و سبک‌سازی انواع سازه‌های هوایی و فضایی کاربرد دارد.

واژه‌های کلیدی

نانوکامپوزیت،
مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد،
 Fe_3O_4 /GNP،
میدان مغناطیسی،
خواص مکانیکی.

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

fazeli@mut.ac.ir

مقدمه

دستیابی به خواص منحصر به فرد نانوصفحه‌های گرافن و مشتقات آن و تمایل زیاد به تجمع یافتگی در این نانوذرات، نیاز به طراحی دقیق ساختار و فرایند تولید این گروه از کامپوزیت‌های پلیمری را دوچندان کرده است [۱]. از زمان افشای خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی برتر گرافن، عصر علمی جدیدی آغاز شده است. یکی از عوامل کلیدی که گرافن را متمایز می‌کند، نسبت ابعاد فیزیکی زیاد یعنی نسبت طول به ضخامت آن است که این ماده را دارای مزیتی خاص می‌کند. افزون بر این، گرافن رفتار ناهمسان‌گرد شایان توجهی نشان می‌دهد. این بدان معنی است که خواص گرافن بسته به جهتی که در آن قرار می‌گیرد، به طور شایان توجهی متفاوت است. به طور خاص، کیفیت گرافن در صفحه آن به طور چشمگیری برتر از کیفیت در جهت عمود بر آن است. این ناهمسان‌گردی به خواص منحصر به فرد و استثنایی گرافن کمک می‌کند و آن را به ماده‌ای بسیار پرطرفدار برای کاربردهای مختلف تبدیل می‌کند. کشف گرافن پژوهش‌های علمی را متحول و امکانات جدیدی را برای توسعه مواد پیشرفته با خواص بی‌سابقه ارائه می‌کند و درها را به روی فناوری‌های نوآورانه در رشته‌های مختلف می‌گشاید [۲].

در میان نانوذرات، استفاده گسترده از نانوذره مغناطیسی Fe_3O_4 را می‌توان به زیست‌سازگاری برتر، عرضه فراوان و حداقل سمیت آن‌ها نسبت داد. نانوذرات Fe_3O_4 دارای خاصیت مغناطیسی اشباع و نفوذپذیری مغناطیسی زیاد و ناهمسان‌گردی مغناطیسی بزرگ هستند. نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 با ممانعت از اثر پوستی (جریان الکتریکی به طور عمده در پوست رسانا، بین سطح بیرونی و سطحی با نام عمق پوست جریان دارد)، مواد کربنی و جذب تابش‌های میکروویو از راه تشدید طبیعی، جریان گردابی و تلفات پسماند (hysteresis) به تضعیف الکترومغناطیسی کمک می‌کنند [۳].

با وجود این، نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی مغناطیسی قوی، تمایل به تجمع دارند. برای رفع این مشکلات، هیبرید نانوصفحه‌های گرافن/ Fe_3O_4 (GNP/ Fe_3O_4) سنتز شده با روش‌های متفاوت توسط گروه‌های پژوهشی مختلف گزارش شده‌اند [۴]. به طور کلی، نانوذرات Fe_3O_4 روی سطح صفحه‌های گرافن لنگر انداخته‌اند که می‌تواند از تجمع نانوذرات Fe_3O_4 و انباشته شدن دوباره صفحه‌های گرافن میان‌لایه‌ای شده (intercalation) جلوگیری کند [۵]. نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل خواص ابرپارامغناطیس می‌توانند تحت تأثیر میدان مغناطیسی جهت‌گیری کنند و حرکت داده شوند [۶]. هنگامی که نانوذرات Fe_3O_4 روی مشتقات کربنی قرار می‌گیرند، اعمال میدان مغناطیسی باعث می‌شود، حساسیت مغناطیسی

زیاد نانوذرات Fe_3O_4 صفحه‌های کربنی را در جهت میدان مغناطیسی هم‌راستا کند [۷]. ساختار جهت‌دهی شده Fe_3O_4 /GNP نه تنها به طور مؤثر از تجمع Fe_3O_4 و GO جلوگیری می‌کند، بلکه اجازه می‌دهد تا خواص ذاتی هر دو نانوذره به طور کامل نشان داده شود. همچنین، ترکیب نانوذرات فلزی یا غیرفلزی در نانوسیال‌های هیبریدی GNP/Fe_3O_4 برای بهبود اثر رسوب‌گذاری نانوسیال‌ها مفید است [۸].

مشکل اصلی در استفاده از نانوصفحه‌های گرافن پراکنش آن در ماتریس پلیمری است، زیرا این ماده نه آب‌گریز و نه آب‌دوست است [۹]. گرافن معمولاً به دلیل شبکه کربن و نبود گروه‌های عاملی قطبی روی سطوح گرافن اولیه، رفتار آب‌گریزی نشان می‌دهد. با وجود این، بسته به روش تولید و هرگونه عامل‌دار کردن سطح، گرافن می‌تواند درجه‌های مختلفی از آب‌دوستی را داشته باشد. گرافن‌های اولیه تا حد زیادی آب‌گریزند، که می‌تواند پراکنندگی آن‌ها را در ماتریس‌های قطبی محدود کند، مگر اینکه عامل‌دار شوند. برای غلبه بر این چالش، اصلاح سطحی نانوذره با پیوندزنی گروه‌های عاملی روی سطح آن، یکی از روش‌های کارآمد است. وجود گروه‌های عاملی مانند کربوکسیل، هیدروکسیل و اپوکسی روی سطح نانوذرات سبب برهم‌کنش و چسبندگی بیشتر آن‌ها با ماتریس می‌شود. از این رو، خواص ماتریس دارای نانوذرات را بیش از پیش بهبود می‌بخشند. در انجام واکنش‌های اصلاح غیرکوالانسی، به جذب فیزیکی مولکول اصلاح‌کننده روی سطح صفحه‌های گرافن از راه آب‌دوستی، نیروهای واندروالسی و الکتریسته ساکن نیاز است [۱۰].

به طور کلی، نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل وجود گروه‌های هیدروکسیل سطحی که طی سنتز و قرارگرفتن در معرض شرایط محیطی تشکیل می‌شوند، ویژگی‌های سطحی آب‌دوستی نشان می‌دهند. این گروه‌های هیدروکسیل، انرژی سطحی و میل ترکیبی با حلال‌های قطبی را افزایش می‌دهند و نانوذرات Fe_3O_4 را نسبتاً آب‌دوست می‌کنند. اما، نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل انرژی سطحی زیاد و برهم‌کنش‌های مغناطیسی، تمایل به تجمع دارند که می‌تواند مساحت سطح مؤثر و سازگاری را کاهش دهند، مگر اینکه اصلاح یا تثبیت سطح اعمال شود [۱۱].

تفاوت ذاتی در ترشوندگی سطح Fe_3O_4 آب‌دوست و GNP آب‌گریز می‌تواند چالش‌هایی را برای پراکنندگی یکنواخت و پیوند بین سطحی قوی در نانوکامپوزیت‌ها ایجاد کند. عامل‌دار کردن سطح نانوذرات Fe_3O_4 با مولکول‌های آلی یا پلیمرها می‌تواند آب‌دوستی را کاهش داده و سازگاری با GNP را بهبود بخشد. به طور مشابه، معرفی گروه‌های دارای اکسیژن یا گروه‌های آمین روی سطوح GNP می‌تواند آب‌دوستی و چسبندگی بین سطحی را افزایش دهد. نانوذرات Fe_3O_4 دارای خواص مغناطیسی و ساختار مکعبی هستند

Chen و همکاران [۱۹] با استفاده از نانوذرات $\gamma\text{-FeOOH}@Fe_3O_4$ در ماتریس پلیمری، مقاومت لایه‌لایه‌شدن کامپوزیت‌های چندلایه و چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن (CF/EP) را بررسی کردند. آن‌ها بهبود شایان توجه در میدان مغناطیسی با شدت ۰/۰۹ T (تسلا) را در چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای حدود ۸۱٪ در ورقه‌های CF/EP مشاهده کردند.

Tiwari و همکاران [۲۰]، پراکنش و جهت‌گیری تصادفی نانوصفحه‌های گرافن (GNP) را در اپوکسی بررسی کردند. ابتدا نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را سنتز کرده و به‌صورت حلال‌گرمایی به سطوح GNP متصل کردند تا از پارامترهای هم‌راستایی بهینه‌شده استفاده کنند. محلول با نانوذرات پراکنده مناسب، یعنی Fe_3O_4 -GNP در داخل اپوکسی، در معرض میدان مغناطیسی (۰/۰۵ T) قرار گرفت. شکل‌شناسی و خواص فیزیکی نانوصفحه‌های GNP، نانوذرات Fe_3O_4 و کامپوزیت Fe_3O_4 -GNP بررسی شد که هم‌راستایی را تأیید کرد. نتایج مشخص کرد، از نانوکامپوزیت هم‌راستاشده Fe_3O_4 -GNP ساخته‌شده می‌توان به‌عنوان ماده کاربردی استفاده کرد.

هدف از این پژوهش که در ادامه کار پیشین [۲۱] است، توسعه نانوکامپوزیت‌های Fe_3O_4 /GNP بر پایه رزین اپوکسی LY556 با اعمال میدان مغناطیس با شدت بسیار کوچک (۹۰ G یا ۰/۰۰۹ T) به‌منظور افزایش خواص مکانیکی است. شدت میدان استفاده‌شده در این پژوهش بین ۱۰-۵ برابر کوچک‌تر از پژوهش‌های سایر پژوهشگران و میدان یکنواخت حاصل از سیم‌پیچ Helmholtz است. در این کار، اثر هم‌زمان شدت بسیار کم میدان مغناطیسی و مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد به‌عنوان شیوه اختلاط جدید به‌منظور بررسی پراکنش و کیفیت توزیع ارزیابی شد. نانوکامپوزیت‌ها از ترکیب با نسبت‌های وزنی متفاوت Fe_3O_4 (۲، ۵، و ۸٪ درصد وزنی) و GNP (۳/۰، ۵/۰ و ۷/۰٪ وزنی) در رزین اپوکسی تهیه شدند. در ادامه، رزین‌های تقویت‌شده با درصد‌های مختلف وزنی با اعمال میدان مغناطیسی و بدون میدان تولید و در آزمون مکانیکی کشش قرار گرفتند. سپس، رزین‌ها برای ساخت الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده با دو سطح کمترین و بیشترین مقدار نانوذرات برای نمونه‌های در میدان مغناطیسی استفاده شدند. در این پژوهش، مطالعات شکل‌شناسی و ساختاری رزین تقویت‌شده EP/Fe_3O_4 /GNP به‌دلیل افزایش خواص مکانیکی نمونه‌ها با اعمال میدان مغناطیسی در دو سطح کمترین و بیشترین مقدار نانوذرات انجام شد. رزین تقویت‌شده برای ارزیابی جامع شامل بررسی ساختاری با پراش‌سنجی پرتو X (XRD)، بررسی شکل‌شناسی با میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) و عبوری (TEM) و گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی با تحلیلگر

که می‌توانند به‌صورت فیزیکی با ساختار مسطح GNP برهم‌کنش داشته باشند و باعث افزایش درهم‌گیری مکانیکی و بهبود خواص کامپوزیت شوند. اعمال میدان‌های خارجی (میدان مغناطیسی) در طول ساخت کامپوزیت می‌تواند هم‌راستایی و توزیع نانوذرات Fe_3O_4 روی سطوح GNP را افزایش دهد و برهم‌کنش بین‌سطحی و عملکرد کلی نانوکامپوزیت را بهبود بخشد [۱۲].

Wang و همکاران [۱۳] گزارش دادند، استفاده از نانوذرات هیبریدی TiO_2 /GNP می‌تواند با غلبه بر نیروهای سطحی و با خوشه‌بندی مناسب بدون اصلاح سطحی از رسوب گرافن در رزین جلوگیری کند. Liu و همکاران [۱۴] روش جدید و آسان، پلیمرشدن امولسیون معلق پرکننده اپوکسی-آب-غیرآلی، برای ساخت $GNP/Fe_3O_4/EP$ متخلخل شبکه سه‌بعدی را با چگالی کم $0.73-0.74 \text{ g/cm}^3$ پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد، نانوکامپوزیت‌های متخلخل اثر حفاظتی تداخل الکترومغناطیسی خاص رضایت‌بخشی دارد و نیز دارای ثبات گرمایی و خواص مکانیکی بسیار مطلوبی هستند.

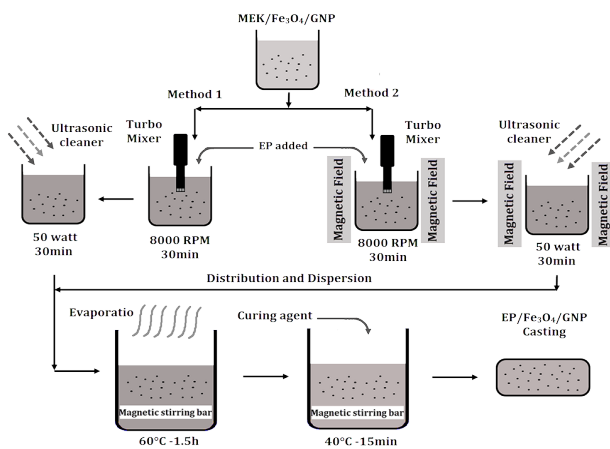
Huang و همکاران [۱۵] نانوذرات هم‌راستاشده آهن اکسید و نانولوله‌های کربن چنددیواره (Fe_3O_4 /MWCNTs) را با اعمال میدان مغناطیسی با شدت کم در اپوکسی جهت‌دار کرده و خواص مکانیکی را مطالعه کردند. سپس، با استفاده از میدان مغناطیسی (۱۰۰ mT)، نانوذرات Fe_3O_4 را با روش جدید آب در روغن بدون گرمادادن در دمای زیاد یا محافظت با گاز بی‌اثر به سطح MWCNTها متصل کردند. نتایج تجربی نشان داد، این روش در هم‌راستاکردن m-MWCNTs در ماتریس پلیمری بسیار مؤثر بود و در نتیجه کامپوزیت بسیار منظم با خواص مکانیکی افزایش‌یافته ایجاد شد.

Hao و همکاران [۱۶] گرافن اکسید کاهش‌یافته با نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 را سنتز کردند و دریافتند، وجود Fe_3O_4 به کاهش تجمع نانوصفحه‌های GO کمک می‌کند. Shen و همکاران [۱۷] مشاهده کردند، گرافن اکسید مغناطیسی (MGO) می‌تواند به‌طور ترجیحی تحت میدان مغناطیسی جهت‌گیری شود که به افزایش شایان توجهی در استحکام برشی بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های پارچه کربنی-اپوکسی منجر می‌شود. Zhang و همکاران [۱۸] سنتز نانوذرات Fe_3O_4 /GO را با روش اکسایش هم‌رسوبی و پوشش‌دهی گرافن اکسید با نانوذرات مغناطیسی مطالعه کردند. این نانوذرات درون رزین اپوکسی گنجانده شده و با استفاده از میدان مغناطیسی از سیم‌پیچ الکترومغناطیسی یا آهن‌رباهای دائمی، هم‌جهت شده که موجب بهبود پخت اپوکسی شدند. میکروسکوپ الکترونی عبوری پوشش‌دهی یکنواخت Fe_3O_4 را در GO تأیید کرد. بیشترین مقاومت ضربه‌ای در کامپوزیت با غلظت ۰/۲٪ وزنی Fe_3O_4 به‌دست آمد.



شکل ۱- تصویری از (a) شدت میدان اندازه‌گیری شده (b) کاوند اندازه‌گیری میدان در دستگاه (c) آزمون میدان با براده‌های آهن.
Fig. 1. An image of: (a) the measured magnetic field intensity, (b) the magnetic field measurement probe inside the device, (c) field testing using iron filings.

انجام شد. پس از آن، به مدت ۳۰ min پراکنش به کمک حمام فراصوت با توان ۵۰ W انجام شد. سپس، حلال در دمای ۶۰ °C به مدت ۱/۵ با هم‌زدن مکرر تبخیر شد. پس از آن، سخت‌کننده و شتاب‌دهنده



شکل ۲- طرحی از فرایند توزیع نانوذرات و ساخت رزین تقویت‌شده با و بدون وجود میدان مغناطیسی.

Fig. 2. A schematic of the nanoparticle dispersion process and the fabrication of reinforced resin in the presence and absence of a magnetic field

شبکه بُرداری (Vector Network Analyzer, VNA) مطالعه شد و آزمون مکانیکی تحت بار کششی و خمشی نیز برای اپوکسی-الیاف شیشه تقویت‌شده انجام شد.

تجربی

مواد

نانوصفحه‌های گرافن به حالت پودر با ضخامت ۵-۱ nm، ابعاد جانبی ۱۰-۵ μm، تعداد لایه ۸-۴ لایه، سطح ویژه ۱۹۰ m²/g و خلوص تولید بیش از ۹۸٪ همراه با نانوذرات آهن اکسید (Fe₃O₄) به حالت پودر با اندازه ۲۰-۳۰ nm، شکل شناسی کروی و خلوص ۹۸٪ از شرکت هندی United Nanotech Innovations PVT. LTD تهیه شده و به‌عنوان تقویت‌کننده در این مطالعه استفاده شدند. همچنین، رزین اپوکسی (EP) LY556، عامل پخت HY917 و شتاب‌دهنده DY070 از شرکت هندی Herenba Instruments & Engineers تهیه شد.

آماده‌سازی کامپوزیت

روش ساخت رزین‌های تقویت‌شده براساس روش غیاثوند و همکاران [۲۱] شامل استفاده از مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد و حمام فراصوت است که در ساخت نانوکامپوزیت EP/Fe₃O₄/GNP به‌کار گرفته شد. در این مقاله، از میدان مغناطیسی با شدت میدان ۹۰ G (گوس) یا T ۰/۰۰۹ (تسلا) استفاده شد. میدان مغناطیسی در مقیاس کوچک به کمک سیم پیچ و مغناطیس سنج کالیبره با اختلاف پتانسیل الکتریکی ۳۲ V و جریان الکتریکی ۳/۷، شدت میدان ۹۰ G را ایجاد کرد (شکل ۱).

سامانه رزین اپوکسی با نسبت وزنی ۱:۹۰:۱ برای رزین اپوکسی، عامل پخت و شتاب‌دهنده فرمول‌بندی شد. افزون بر این، نانوذرات با نسبت وزنی به کل سامانه رزین اپوکسی اضافه شدند. به‌عنوان مثال، برای پنج نمونه‌های آزمایشی ۰/۳wt% GNP، ۲wt% Fe₃O₄ و ۲۴/۸ g اپوکسی، ۲۲/۳ g عامل پخت، ۰/۲۵ g شتاب‌دهنده و در مجموع ۴۷/۳۷ g سامانه رزین اپوکسی استفاده شد. برای این نمونه، نانوذرات با نسبت ۲ و ۰/۳٪ وزنی شامل ۰/۹۵ g از Fe₃O₄ و ۰/۱۴ g از GNP به سامانه رزین اپوکسی اضافه شد. در روش اول همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، نانوذرات Fe₃O₄/GNP در حلال متیل اتیل کتون (MEK) پخش و به حالت معلق قرار گرفتند (وزن حلال ۳۰٪ وزن رزین در نظر گرفته شد). در ادامه، رزین اپوکسی به محلول اضافه و فرایند توزیع شامل ۳۰ min اختلاط در ۸۰۰۰ rpm با استفاده از مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد بدون اعمال میدان مغناطیسی



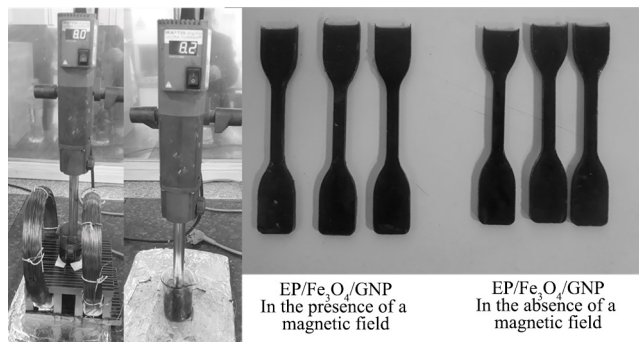
شکل ۴- نمایی از نمونه‌سازی کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده در آزمون کشش و خمش.

Fig. 4. A view of the fabrication of reinforced glass/epoxy composite samples for tensile and flexural testing.

مکانیکی (SANTAM SAF-50) با سرعت 1 mm/min انجام شد. مدول کششی از بخش خطی اولیه منحنی تنش-کرنش تعیین شد و حداقل شش نمونه برای هر فرمول‌بندی آزمایش تهیه شد. پیش از انجام آزمایش، نمونه‌ها به مدت 2 h در دمای 23 °C و رطوبت نسبی 50٪ قرار گرفتند.

آزمون کشش کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده براساس استاندارد ASTM D3039-17 با سه نمونه با طول 175 mm، 8 محدود عرض 25 mm و ضخامت 2 mm به کمک دستگاه آزمون مکانیکی SANTAM STM-150 با سرعت 2 mm/min انجام شد. همچنین، آزمون خمش سه‌نقطه‌ای کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده براساس استاندارد ASTM D790-17 با سه نمونه با طول 60 mm، محدود عرض 6 mm و ضخامت 2 mm روی دستگاه آزمون مکانیکی با سرعت 1 mm/min انجام شد.

شکل‌شناسی رزین‌های تقویت‌شده با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) MIRA3 TESCAN و میکروسکوپ الکترونی عبوری TEM مدل H9500 ساخت شرکت Hitachi ژاپن مطالعه شد. الگوهای پراش پرتو X (XRD) به کمک پراش سنخ شرکت Rigaku مدل D/Max 2500 محصول ژاپن با تابش Cu Ka 0.154 nm در ولتاژ مولد 40 kV پوشش شد. بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی رزین تقویت‌شده با دستگاه Keysight E5063A ENA Vector Network Analyzer (VNA) در محدوده بسامد 8-12 GHz اندازه‌گیری شد.



شکل ۳- نمایی از (a) میدان مغناطیسی و مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد، (b) مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد در کاربرد روش پراکنش نانوذرات و (c) نمونه‌های رزین تقویت‌شده.

Fig. 3. View of (a) the magnetic field and high-speed shear mixer, (b) the high-shear turbo mixer used in the nanoparticle dispersion method, and (c) the reinforced resin samples.

در دمای 40 °C اضافه و به مدت 15 min مخلوط شدند. در پایان نمونه‌ها به صورت ریخته‌گری برای پخت نهایی، در دمای 80 °C، 4 h پخت شده و پس از آن در دمای 120 °C، به مدت 4 h دیگر برای دستیابی به خواص مکانیکی نهایی عمل‌آوری شدند. سرعت گرمایش برای رسیدن به دماهای مشخص شده 1/3 °C/min بود. در روش دوم (شکل 2)، فرایند بیان‌شده در بالا در مجاورت میدان مغناطیسی با شدت بسیار کوچک 90 G انجام شد که نمای اختلاط نمونه با مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد تحت میدان مغناطیسی و نیز نمونه‌های تولیدشده در شکل 3 نشان داده شده است. پس از آماده‌سازی رزین تقویت‌شده با نانوذرات، کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده به کمک روش لایه‌چینی دستی آماده و تحت خلأ قرار گرفت و در دمای 80 °C به مدت 4 h پخت و پس از آن در دمای 120 °C به مدت 4 h دیگر برای دستیابی به خواص مکانیکی نهایی فرایند پساپخت انجام شده و نانوکامپوزیت هیبریدی (شکل 4) عمل‌آوری شد. گفتنی است، در ساخت رزین تقویت‌شده برای کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده به دلیل حجم بیشتر مواد، اختلاط با سرعت 5000 rpm به کمک مخلوط‌کن برشی انجام شد.

مشخصه یابی

نمونه‌های آزمون کشش رزین‌های تقویت‌شده مطابق استاندارد ASTM D638 نوع IV با پنج نمونه ساخته شد. بررسی خواص کششی همه نمونه‌ها در شرایط محیطی برای نمونه‌های با طول 16/5 cm، عرض 6 mm و ضخامت 3/3 mm به کمک دستگاه آزمون

جدول ۱- نتایج استحکام کششی نمونه‌های آزمایشی رزین‌های تقویت‌شده.

Table 1. The tensile strength results of the reinforced resin test specimens

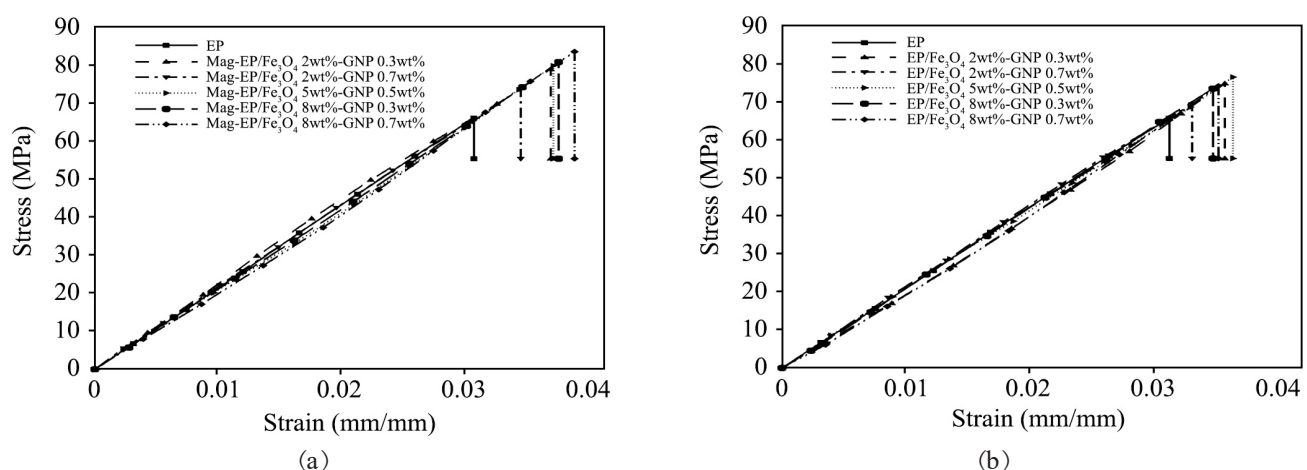
Model	Sample	Tensile Stress (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Elongation (%)	Toughness (J/m ³)
Pure	EP	65.69	2105.4	3.12	1.02
Absence of a Magnetic Field	EP-Fe ₃ O ₄ 2wt%-GNP 0.3 wt%	74.81	2095.5	3.57	1.33
	EP-Fe ₃ O ₄ 2wt%-GNP 0.7 wt%	69.37	2095.8	3.31	1.15
	EP-Fe ₃ O ₄ 5wt%-GNP 0.5 wt%	76.42	2105.2	3.63	1.39
	EP-Fe ₃ O ₄ 8wt%-GNP 0.3 wt%	73.38	2114.7	3.47	1.27
	EP-Fe ₃ O ₄ 8wt%-GNP 0.7 wt%	74.12	2105.7	3.52	1.30
Presence of a Magnetic Field	EP-Fe ₃ O ₄ 2wt%-GNP 0.3 wt%	78.42	2091.2	3.75	1.47
	EP-Fe ₃ O ₄ 2wt%-GNP 0.7 wt%	73.32	2094.8	3.50	1.28
	EP-Fe ₃ O ₄ 5wt%-GNP 0.5 wt%	79.24	2106.1	3.77	1.49
	EP-Fe ₃ O ₄ 8wt%-GNP 0.3 wt%	80.31	2102.3	3.82	1.53
	EP-Fe ₃ O ₄ 8wt%-GNP 0.7 wt%	83.04	2102.3	3.95	1.64

نتایج و بحث

نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی

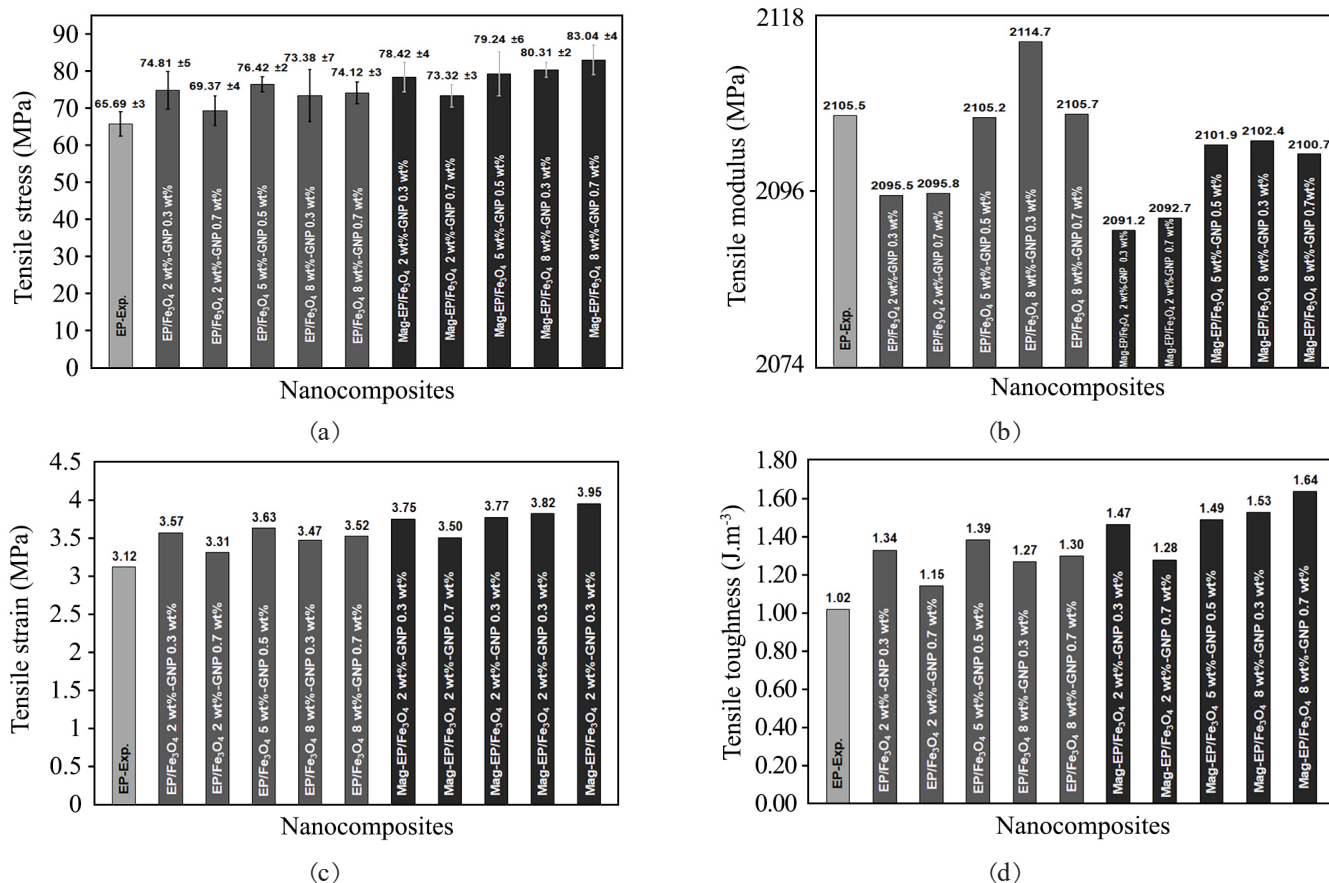
درصد Fe₃O₄ و GNP با اعمال میدان مغناطیسی مشاهده شد، در حالی که بیشترین مدول کششی در بیشترین درصد Fe₃O₄ و کمترین درصد GNP و با اعمال میدان مغناطیسی به دست آمد. افزایش مداوم مدول کشسانی با افزایش درصد وزنی نانوذرات به دلیل پراکنش مؤثر ذرات در ماتریس پلیمری است. با افزایش تعداد نانوذرات و پراکنش خوب ذرات، پیوند و چسبندگی بین سطوح نانوذرات و ماتریس پلیمری افزایش می‌یابد. این موضوع حرکت زنجیرهای پلیمری را تحت بار محدود می‌کند و به افزایش مدول کشسانی نانوکامپوزیت منجر می‌شود [۲۲]. سطح تماس واقعی بین فاز تقویت‌کننده و ماتریس

استحکام کششی نمونه‌های آزمایشی رزین‌های تقویت‌شده در درصدهای وزنی مختلف Fe₃O₄/GNP بررسی شد. نتایج تجربی آزمون استحکام کششی نمونه‌ها برای مقایسه در جدول ۱ آمده است. منحنی تنش-کرنش با اعمال میدان مغناطیسی یا بدون آن در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، بیشترین بهبود در خواص کششی، کرنش و چقرمگی در بیشترین



شکل ۵- منحنی‌های تنش-کرنش محوری برای درصدهای وزنی مختلف نانوذرات در ماتریس اپوکسی: (a) بدون وجود میدان مغناطیسی و (b) با وجود میدان مغناطیسی.

Fig. 5. Axial stress-strain curves for different weight percent of nanoparticles in the epoxy matrix (a) in the absence of a magnetic field, (b) with the presence of a magnetic field.



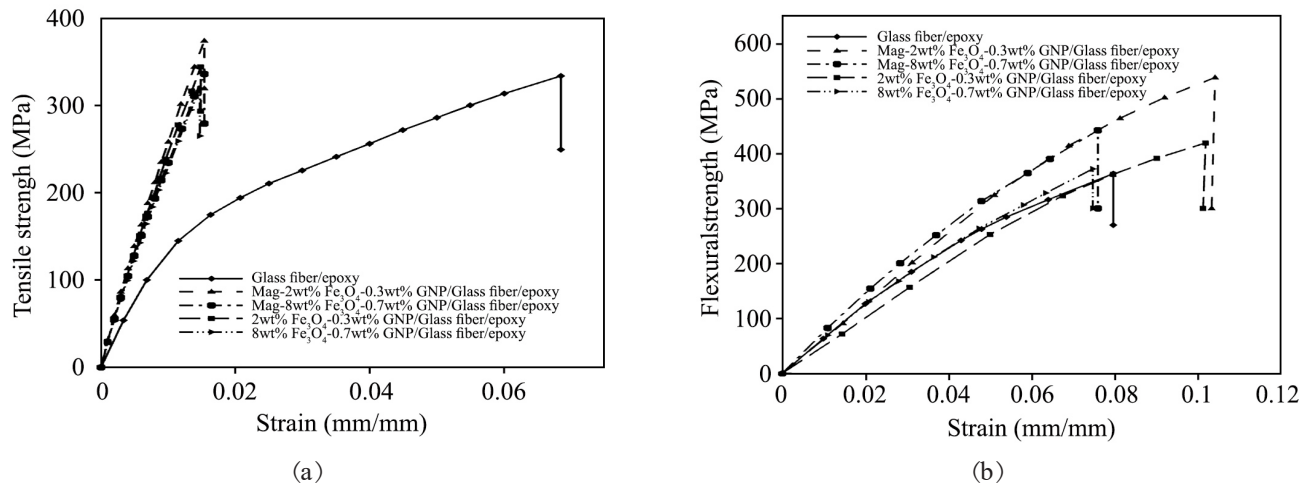
شکل ۶- نمودار مقایسه خواص مکانیکی کششی: (a) استحکام، (b) مدول، (c) کرنش و (d) چقرمگی با رزین‌های تقویت‌شده مختلف. Fig. 6. Comparative chart of tensile mechanical properties: (a) strength, (b) modulus, (c) strain, and (d) toughness, for various reinforced resins.

استحکام کششی، مدول کششی و ازدیاد طول می‌شود. همچنین نتایج نمونه‌های رزین تقویت‌شده در حضور میدان در مقایسه با اپوکسی خالص نشان می‌دهد، میدان مغناطیسی و نسبت وزنی بیشتر نانوذرات مغناطیسی باعث بهبود بهتر در استحکام کششی و ازدیاد طول و کاهش چقرمگی و در نتیجه مدول کششی می‌شود.

اثر رزین تقویت‌شده بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده با انجام آزمون کشش و خمش در کمترین و بیشترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال میدان مغناطیسی مطالعه شد. شکل ۷ (a) و (b) اثر نانوذرات را بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده نشان می‌دهد. از شکل ۷ (a) مشخص است، حداکثر استحکام کششی در کمترین مقدار نانوذرات (۰.۳٪ وزنی GNP و ۲٪ وزنی Fe₃O₄) و با اعمال میدان مغناطیسی انجام می‌شود. همچنین با توجه به شکل ۷ (b)، بیشترین استحکام خمشی نیز در کمترین مقدار نانوذرات با اعمال میدان مغناطیسی اتفاق می‌افتد. در آزمون‌های کشش، بار به‌طور

ممکن است، به دلیل افزایش بیش از حد نانوذرات یا نبود اصلاح سطحی کاهش یافته باشد که این موضوع موجب ثابت باقی ماندن مدول کششی می‌شود [۲۳]. نبود تناسب میان سرعت مخلوط‌کن برشی با مقدار درصد وزنی موجب تجمع نانوذرات می‌شود که از سایر عوامل ثابت‌ماندن مدول کششی است.

وجود میدان مغناطیسی در نانوذرات مغناطیسی (Fe₃O₄) ممکن است، جهت‌گیری منظمی پیدا کنند و بر هم‌راستایی نهایی ساختار اثر بگذارد. این موضوع ممکن است، بهبود خواص مکانیکی خاصی مانند تنش کششی را موجب شود، اما مدول را چندان تغییر ندهد [۲۴-۲۶]. آزمون خواص مکانیکی مطابق جدول ۱ برای نمونه‌های مختلف از جمله رزین اپوکسی خالص و رزین‌های تقویت‌شده انجام شد. نتایج استحکام و مدول کششی به ترتیب ۶۵/۶۹ و ۲۱۰۵/۴ MPa و ازدیاد طول ۳/۱۲٪ در اپوکسی خالص حاصل شد که درصد بهبود براساس آن گزارش می‌شود. نتایج نمونه‌های رزین تقویت‌شده در نبود میدان نشان می‌دهد، نسبت وزنی نانوذرات یکسان باعث بهبود بهتر در



شکل ۷- نمایی از استخراج خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت شده با و بدون وجود میدان مغناطیسی: (a) استحکام کششی و (b) استحکام خمشی.

Fig. 7. A view of the extraction of mechanical properties of reinforced glass/epoxy nanocomposites in the presence and absence of a magnetic field: (a) tensile strength and (b) flexural strength

نانوذرات در داخل ترکیب می‌تواند خواص مکانیکی را زیر بارهای کششی و خمشی متفاوت تحت تأثیر قرار دهد. مواد ناهمسان ممکن است، در جهت‌های مختلف استحکام و انعطاف‌پذیری متفاوتی داشته باشند. نانوذرات می‌توانند در ماده تمرکز تنش ایجاد کنند که تحت بار کششی بیشتر آسیب‌زاست تا تحت بار خمشی که توزیع تنش پیچیده‌تر است [۲۸].

با توجه به جدول ۲ نتایج تجربی آزمون استحکام کششی و خمشی نمونه‌ها قابل مقایسه هستند. مقدار قابلیت کامپوزیت‌های

یکنواخت در طول نمونه اعمال می‌شود که می‌تواند مقاومت ماده در برابر تغییر شکل طولی و ضعف‌های احتمالی در ماتریس را نشان دهد. نانوذرات ممکن است، نتوانند تنش را به‌طور یکنواخت توزیع کنند که به تمرکز تنش موضعی و کاهش مقاومت کششی منجر می‌شود [۲۷]. نانوذرات می‌توانند بر چگونگی انتشار ترک‌ها در ماده اثر بگذارند. در آزمون‌های خمش، ماده تحت تنش و فشار قرار می‌گیرد و نانوذرات می‌توانند به انحراف یا پل زدن ترک‌ها کمک کنند و استحکام خمشی و انعطاف‌پذیری را افزایش دهند. جهت‌گیری الیاف و

جدول ۲- نتایج استحکام کششی و خمشی نمونه‌های آزمون کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت شده.

Table 2. The results of the tensile and flexural strength tests of the reinforced glass/epoxy composite specimens.

Model	Sample	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Tensile Toughness (J/m ³)	Elongation (%)	Flextural Strength (MPa)	Flextural Modulus (MPa)	Flextural Toughness (J/m ³)	Elongation (%)
Pure	GF/EP	334.54	24753.68	11.47	6.857	363.32	4564.32	11.47	7.96
Presence of a Magnetic Field	GF/EP-Fe ₃ O ₄ 2wt% -GNP 0.3wt%	375.05	24290.81	2.90	1.544	538.37	5181.61	27.97	10.39
	GF/EP-Fe ₃ O ₄ 8wt% -GNP 0.7wt%	336.45	21890.04	2.59	1.537	442.38	5836.14	16.77	7.58
Absence of a Magnetic Field	GF/EP-Fe ₃ O ₄ 2wt% -GNP 0.3wt%	345.05	23173.27	2.57	1.489	419.93	4121.00	21.40	10.19
	GF/EP-Fe ₃ O ₄ 8wt% -GNP 0.7wt%	319.63	21640.48	2.36	1.477	371.60	4981.23	13.86	7.46

شکل ۸ (c)، (a) و (e) و تصاویر در بیشترین غلظت نانوذرات، با ۸٪ وزنی Fe_3O_4 و ۰/۷٪ وزنی GNP (شکل ۸ (d)، (b) و (f)) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۸ (a) و (b) مشاهده می‌شود، هم‌راستایی نانوذرات در کمترین غلظت شکل ۸ (a) به‌طور مؤثرتری حاصل شده است. شکل ۸ (c) و (d)، تجمع نانوذرات Fe_3O_4 را روی صفحه‌های GNP نشان می‌دهد که تجمع در غلظت‌های بیشتر است. توده نانوذرات Fe_3O_4 به‌وضوح در شکل ۸ (e) نشان داده شده که نشان‌دهنده کمترین غلظت نانوذرات است، در مقابل شکل ۸ (f)، که نشان‌دهنده بیشترین غلظت است. نانوذرات هیبریدی Fe_3O_4 /GNP در کمترین غلظت، سطح شکست همگن و یکنواختی را بدون خوشه‌ها به‌هم پیوسته نشان می‌دهند.

تجمع نانوذرات با یکدیگر مانع از پراکنش یکنواخت در ماتریس می‌شود. دستیابی به پراکنش یکنواخت نانوذرات در ماتریس پلیمری می‌تواند به‌دلیل تمایل آن‌ها به تجمع، به چالش کشیده شود. در حالت ایده‌آل، نانوذرات باید به‌طور یکنواخت توزیع شوند تا اثر تقویت‌کنندگی آن‌ها به حداکثر برسد. توزیع نامناسب نانوذرات باعث ایجاد تنش در رزین تقویت‌شده می‌شود که این موضوع به ترک در اطراف توده‌ها و شکست زودرس منجر می‌شود. نانوصفحه گرافن و مشتقات آن دارای گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل روی سطح خود است که می‌تواند بار سطحی تا حدی منفی ایجاد کند [۳۱]. این گروه‌های عاملی ممکن است، نیروهای ثانویه (مانند نیروهای واندروالسی، هیدروژنی و الکتروستاتیک) را بین نانوذرات (Fe_3O_4) و گروه‌های عاملی اصلاح‌شده را روی گرافن فعال کنند. نانوذرات Fe_3O_4 به‌دلیل سطح فلزی خود، به ایجاد برهم‌کنش‌های قوی با گروه‌های عاملی گرافن تمایل زیادی دارند. مطالعات نشان داد، این نوع برهم‌کنش سطحی می‌تواند باعث شود، نانوذرات Fe_3O_4 روی سطح گرافن قرار گیرند [۳۲]. این جفت‌شدن Fe_3O_4 /GNP ممکن است، پراکنش و توزیع بهتر GNP را درون ماتریس رزین اپوکسی با استفاده از خاصیت مغناطیسی Fe_3O_4 فراهم کند. در واقع، ابتدا اعمال میدان مغناطیسی خارجی نانوذرات Fe_3O_4 را جهت‌دهی می‌کند، سپس، نانوذرات Fe_3O_4 به هم‌راستایی و پراکنش نانوذرات GNP کمک می‌کنند. هم‌راستایی مغناطیسی با به حداکثر رساندن نیروهای دافعه الکتروستاتیکی بین صفحه‌های GNP می‌تواند به پراکنش بهتر هنگام هم‌راستایی مغناطیسی Fe_3O_4 کمک کند. بنابراین، Fe_3O_4 نیز به‌عنوان فاصله‌دهنده فیزیکی و نیز پراکنده‌ساز واسطه بار عمل می‌کند.

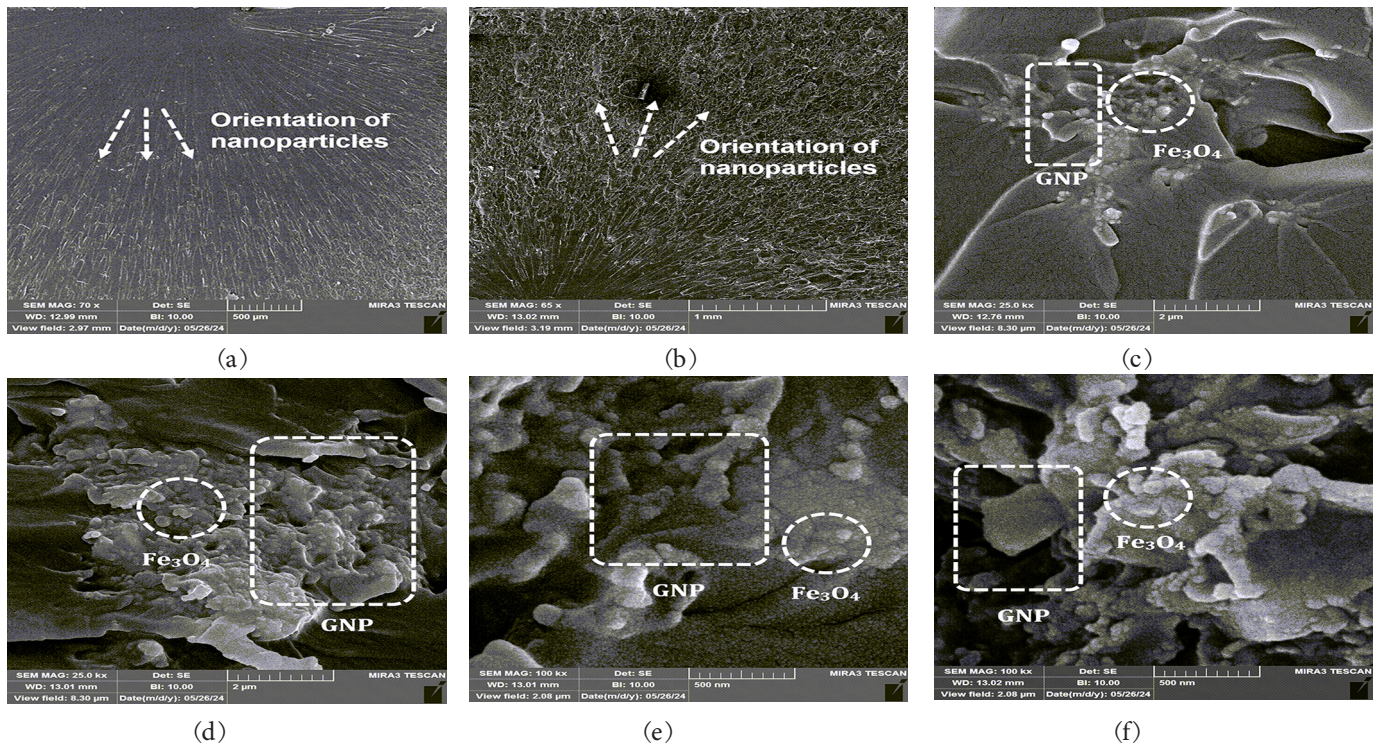
از طرفی در کمترین غلظت، نانوذرات Fe_3O_4 به‌طور همگن پراکنده و

الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده در جذب انرژی به‌دلیل عدم پراکنش و توزیع مناسب در بیشترین مقدار نانوذرات کاهش یافته و در نتیجه چقرمگی ماده کامپوزیت در حالت کششی کاهش اما به‌دلیل مقاومت در برابر تغییر شکل در حالت خمشی و توزیع تنش پیچیده‌تر، چقرمگی در خمش افزایش می‌یابد، این افزایش با اعمال میدان مغناطیسی دارای کیفیت بیشتر و بهبود در عملکرد می‌شود. کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی تقویت‌شده باعث افزایش ۱۲٪ استحکام کششی، کاهش ۱/۸۷٪ مدول کششی، افزایش ۴۸٪ استحکام خمشی و افزایش ۱۳/۵٪ مدول خمشی در مقایسه با کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی خالص شده است. مقدار مدول کششی با اعمال میدان مغناطیسی در کمترین مقدار نانوذرات باعث افزایش مقدار مقاومت در برابر تغییر شکل شده و بهبود شایان توجهی در این نمونه را حاصل کرده است. همچنین، مقدار مدول خمشی با اعمال میدان مغناطیسی در بیشترین مقدار نانوذرات باعث افزایش و بهبود چشمگیری در این نمونه نیز شده است.

کیفیت پراکنش نانوذرات در ماتریس پلیمری عاملی حیاتی است که بر مدول کششی اثر می‌گذارد. پراکنندگی مناسب تضمین می‌کند که نانوذرات به‌طور یکنواخت توزیع شوند و خواص مکانیکی کامپوزیت را افزایش می‌دهد [۲۹]. غلظت نانوذرات بر خواص کششی و خمشی نانوکامپوزیت‌های بر پایه رزین اپوکسی اثر می‌گذارد. غلظت‌های بهینه به بهبود شایان توجهی در مدول کششی و مدول خمشی منجر می‌شود. محتوای کم نانوذرات می‌تواند موجب عملکرد مکانیکی مطلوب شود و غلظت‌های خاص بهترین نتایج را برای کامپوزیت‌های مختلف به‌همراه دارد [۳۰].

مطالعات شکل‌شناسی و ساختاری

نانوصفحه‌های گرافن و مشتقات آن دارای گروه‌های عاملی مانند هیدروکسیل، اپوکسی و کربوکسیل در سطح خود است که بار سطحی منفی ایجاد می‌کند [۳۱]. این گروه‌های عاملی پیوند الکتروستاتیک و واندروالسی را با نانوذرات Fe_3O_4 امکان‌پذیر می‌کنند. نانوذرات مغناطیسی به‌دلیل سطح فلزی، تمایل زیادی به ایجاد برهم‌کنش قوی با گروه‌های عاملی گرافن دارند. مطالعات نشان داده است، این نوع پیوند سطحی می‌تواند باعث نشست نانوذرات Fe_3O_4 روی سطح GNP و بهبود پایداری پراکنش در رزین اپوکسی شود. وضعیت پراکنش نانوذرات Fe_3O_4 /GNP با اعمال میدان مغناطیسی و با مقادیر مختلف نانوذرات در ماتریس پلیمری، با استفاده از SEM بررسی شد (شکل ۸). تصاویر SEM از سطوح شکست EP/ Fe_3O_4 /GNP در کمترین غلظت نانوذرات، شامل ۲٪ وزنی Fe_3O_4 و ۰/۳٪ وزنی GNP



شکل ۸- تصاویر SEM نمونه‌های رزین تقویت شده Fe_3O_4 ۲wt% -GNP/EP ۰/۳wt% و Fe_3O_4 ۸wt% -GNP/EP ۰/۷wt% با و بدون وجود میدان مغناطیسی (a) هم‌راستایی رزین‌های تقویت شده در کمترین مقدار نانوذرات، (b) هم‌راستایی رزین‌های تقویت شده در بیشترین مقدار نانوذرات، (c) تجمع نانوذرات در کمترین درصد وزنی، (d) تجمع نانوذرات در بیشترین درصد وزنی، (e) توده‌های کمتر نانوذرات Fe_3O_4 و (f) توده‌های بیشتر نانوذرات Fe_3O_4 .

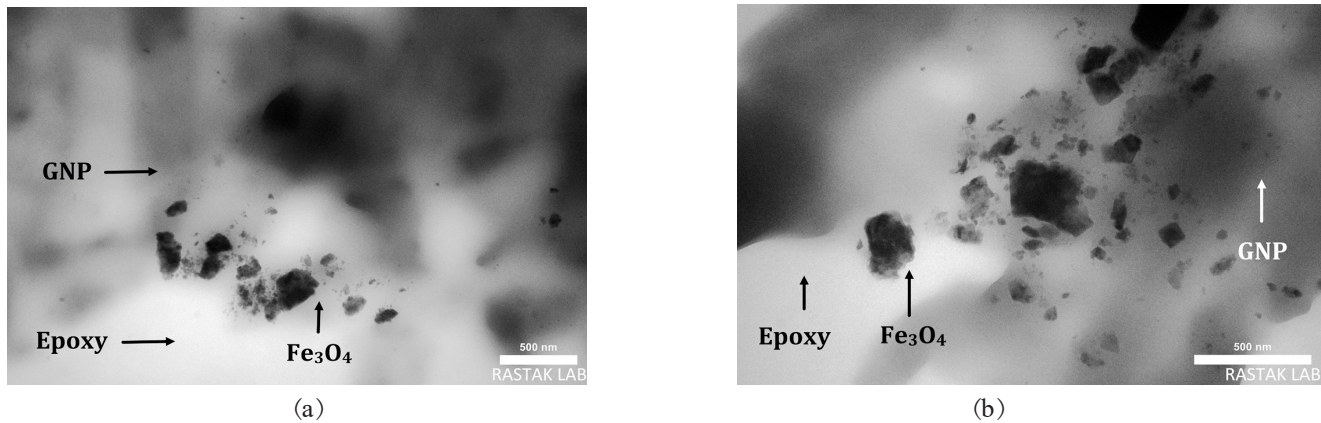
Fig. 8. SEM images of the reinforced resin samples EP/ Fe_3O_4 2wt%/GNP 0.3wt% and EP/ Fe_3O_4 8wt%/GNP 0.7wt% in the presence of a magnetic field: (a) alignment of reinforced resins at the lowest nanoparticle content, (b) alignment of reinforced resins at the highest nanoparticle content, (c) nanoparticle agglomeration at the lowest weight percentage, (d) nanoparticle agglomeration at the highest weight percentage, (e) fewer Fe_3O_4 nanoparticle clusters, (f) more Fe_3O_4 nanoparticle clusters.

هرچقدر مقدار وزنی ذرات مغناطیسی به مقدار وزنی سایر ذرات بیشتر باشد، خواص مکانیکی مناسب‌تری ارائه می‌دهد.

برای بررسی و تحلیل ساختار بلوری نمونه‌ها از اندازه‌گیری XRD استفاده شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ (a) و (b) نشان داده شده است، پیک‌های مشخصه اصلی XRD نانوذرات Fe_3O_4 در 2θ برابر 30.4° ، 35.7° ، 57.3° و 62.8° ، مربوط به صفحه‌های (۲۲۰)، (۳۱۱)، (۴۰۰)، (۵۱۱) و (۴۴۰) از Fe_3O_4 در فاز مکعبی مرکز پر است [۳۳]. نانوصفحه‌های GNP پیک‌های مشخصه را در 2θ برابر 26.52° و 54.64° نشان می‌دهند که به صفحه (۰۰۲) و (۰۰۴) با فاصله بین‌سطحی به ترتیب $1/3$ و 0.95 nm مربوط است [۳۴]. منحنی‌های XRD نانوکامپوزیت EP/ Fe_3O_4 /GNP نشان داده شده در شکل ۱۰ (a) در کمترین مقدار نانوذرات تنها یک پیک منظم را با اعمال و بدون اعمال میدان مغناطیسی در 2θ حدود 16.41° در دو منحنی نشان

این پراکنش به سرعت مناسب مخلوط‌کن نسبت داده می‌شود و هر چقدر سرعت آن بیشتر باشد، پراکنش همگن بهتر است [۲۱]. سرعت مخلوط‌کن ارتباط مستقیمی با مقدار نانوذرات دارد. با افزایش غلظت نانوذرات، سرعت اختلاط مخلوط‌کن نیز باید افزایش یابد.

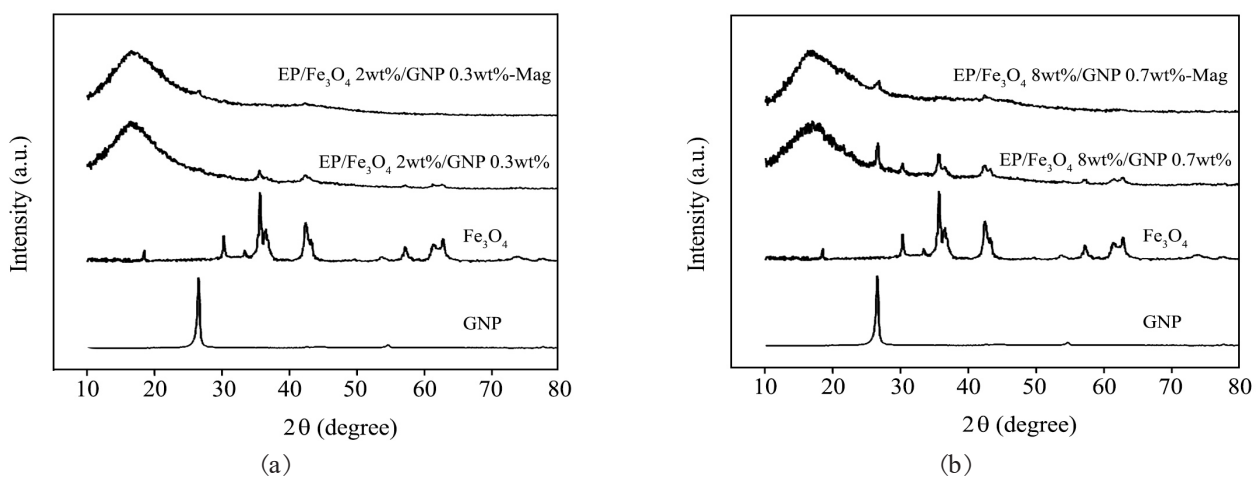
همان‌طور که در تصاویر TEM (شکل ۹) نیز نشان داده شده است، تجمع نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 روی سطح نانوصفحه‌های GNP توزیع می‌شود که می‌تواند به‌طور شایان توجهی پراکنش GNP را در رزین افزایش دهد. همان‌طور که در شکل ۹ (a) مشاهده می‌شود، در کمترین مقدار، تجمع نانوذرات Fe_3O_4 کمتر از شکل ۹ (b) در بیشترین مقدار آن است. پیرو خاصیت فاصله‌دهندگی فیزیکی ذرات Fe_3O_4 ، در کمترین حالت مقدار نانوذرات و با توجه به سرعت مناسب مخلوط‌کن نسبت به مقدار درصد نانوذرات، خواص فیزیکی مناسبی حاصل می‌شود. اما براساس مقدار وزنی نانوذرات هیبریدی،



شکل ۹- تصاویر TEM نمونه‌های رزین تقویت‌شده با اعمال میدان مغناطیسی: (a) کمترین مقدار نانوذرات و (b) بیشترین مقدار نانوذرات.
Fig. 9. TEM images of the reinforced resin samples in the presence of a magnetic field: (a) the lowest nanoparticle content and (b) the highest nanoparticle content.

ایجاد قله‌های پهن و مواد بی‌نظم می‌شوند. منحنی‌های XRD نانوکامپوزیت EP/Fe₃O₄/GNP نشان داده‌شده در شکل ۱۰ (b) در بیشترین مقدار نانوذرات تنها یک پیک منظم را با و بدون وجود میدان مغناطیسی در ۲θ حدود ۱۶/۹۴° در دو منحنی نشان می‌دهد. ناپدید شدن پیک مشخصه Fe₃O₄/GNP در پلیمر در بیشترین مقدار نانوذرات نشان می‌دهد، پرکننده‌ها به‌طور کامل در صفحه‌های منفرد لایه‌لایه نشده و به‌طور همگن درون ماتریس پلیمری پراکنده نشده‌اند و هنوز نیز پیک‌هایی در امتداد نمودار وجود دارد که از ماده بی‌شکل دور می‌شوند. این به دلیل درصد بیشتر نانوذرات در ماتریس پلیمری است که به سرعت اختلاط بیشتری به کمک مخلوط‌کن نیاز دارد.

می‌دهد. ناپدید شدن پیک مشخصه Fe₃O₄/GNP در پلیمر در کمترین مقدار نانوذرات نشان می‌دهد، پرکننده‌ها به‌طور کامل در صفحه‌های جداگانه میان‌لایه‌ای شده (intercalation) و به‌طور همگن درون ماتریس پلیمری پراکنده شده‌اند. این نشان می‌دهد، لایه مانع از یک ورق نانوذره در ماتریس پلیمری تشکیل شده است، نه از تجمع GNP ناشی از جذب مغناطیسی و پیوند هیدروژنی، که نقش مهمی در این سامانه ایفا می‌کند. این موضوع تضمین می‌کند، نسبت تصویر بالایی را در ورق‌های Fe₃O₄/GNP حفظ کنند، حتی اگر تحت نیروهای میدان مغناطیسی قرار گیرند. گفتنی است، نیروهای میدان مغناطیسی زوایای پرتوهای بازتابیده را به سمت جلو حرکت می‌دهند و باعث



شکل ۱۰- منحنی‌های پراش پرتو X مربوط به Fe₃O₄، GNP و EP/Fe₃O₄/GNP با و بدون اعمال میدان مغناطیسی: (a) در کمترین مقدار نانوذرات و (b) در بیشترین مقدار نانوذرات.

Fig. 10. X-ray diffraction curves of GNP, Fe₃O₄, and EP/Fe₃O₄/GNP in the presence and absence of a magnetic field: (a) field in the lowest amount of nanoparticles and (b) in the most amount of nanoparticles.

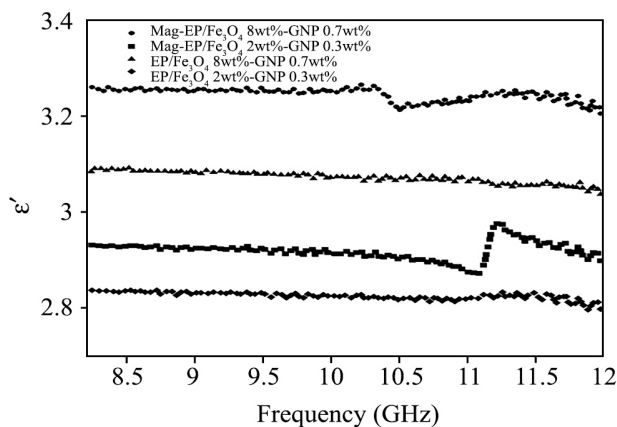
رزین‌های تقویت‌شده در کمترین مقدار نانوذرات (Mag-EP/Fe₃O₄ ۲wt%-GNP ۰/۳wt%) و بیشترین محتوای نانوذرات (EP/Fe₃O₄ ۸wt%-GNP ۰/۷wt%)، با و بدون اعمال میدان مغناطیسی ارزیابی شد که بخش‌های حقیقی و موهومی مقدار گذردهی برحسب بسامد در شکل ۱۱ (a) و (b) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱ (a)، مقادیر ϵ' برای نمونه‌ها با کمترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب ۲/۹۷ و ۲/۸۴ حاصل شد، در حالی که برای نمونه‌ها با بیشترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال مغناطیسی، به ترتیب ۳/۲۶ و ۳/۰۹ به دست آمد. برای نمونه‌هایی با کمترین مقدار نانوذرات، هنگامی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد، بخش حقیقی گذردهی افزایش می‌یابد. به‌طور مشابه، برای نمونه‌هایی با بیشترین مقدار نانوذرات نیز، نمونه بیشترین گذردهی حقیقی را نشان می‌دهد. افزایش اثر عملکردی در بیشترین مقدار نانوذرات و با

بررسی ضرایب نفوذپذیری الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی

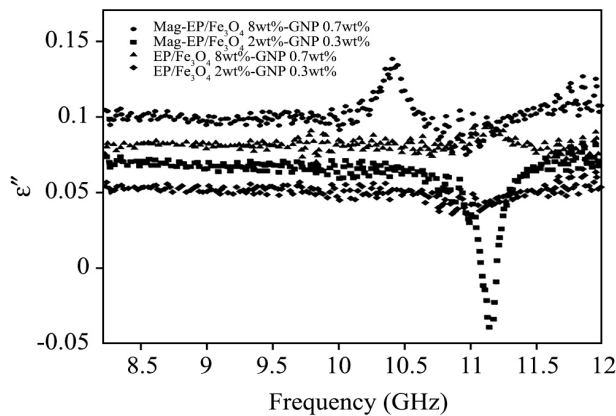
مؤلفه‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی را می‌توان با تجزیه و تحلیل ضرایب ماتریس پراکندگی محاسبه کرد. گذردهی الکتریکی (معادله ۱) و نفوذپذیری مغناطیسی (معادله ۲) مواد طبق معادله‌های زیر به‌عنوان مقادیر پیچیده تعریف می‌شوند، جایی که ϵ' و ϵ'' به ترتیب نشان‌دهنده ذخیره و اتلاف انرژی الکتریکی مواد هستند. بخش‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری مغناطیسی، μ' و μ'' به ترتیب نشان‌دهنده ذخیره انرژی میدان مغناطیسی و اتلاف انرژی مغناطیسی هستند [۳۵].

$$\epsilon = \epsilon' - \epsilon'' \quad (1)$$

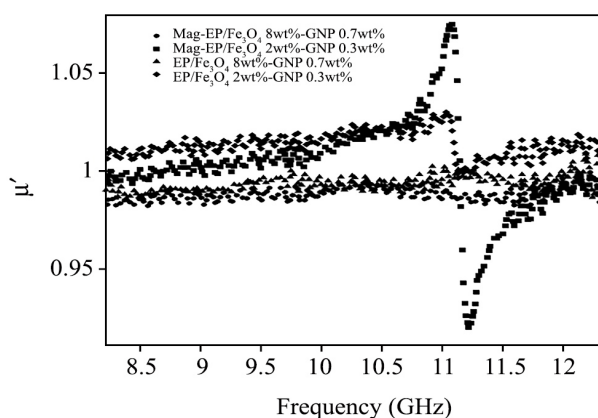
$$\mu = \mu' - \mu'' \quad (2)$$



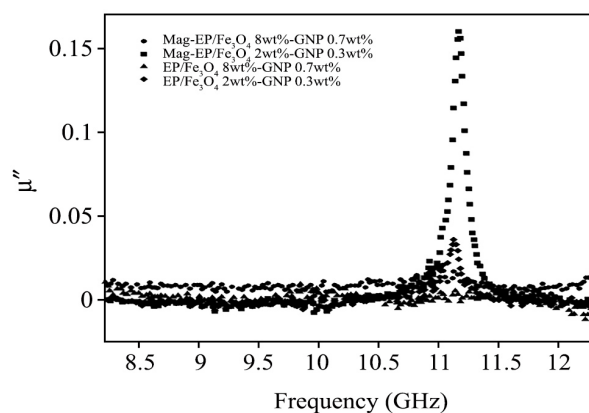
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱۱- نمودارهای وابستگی (a) حقیقی و (b) موهومی گذردهی به‌عنوان تابعی از بسامد، (c) حقیقی و (d) موهومی نفوذپذیری مغناطیسی در محدوده بسامد نوار X.

Fig. 11. The dependency plots of the (a) real and (b) imaginary parts of the permittivity as a function of frequency, (c) real, and (d) imaginary parts of the magnetic permeability within the X-band frequency range.

مغناطیسی بر توزیع و پراکنش نانوذرات Fe_3O_4 و نانوصفحه‌های GNP درون ماتریس اپوکسی بررسی شد. نتایج نشان داد، غلظت نانوذرات با سرعت مخلوط‌کن رابطه مستقیم دارد که در غلظت‌های بیشتر، سرعت باید افزایش یابد. همچنین، وجود میدان مغناطیسی به همراه مخلوط‌کن با سرعت زیاد به پراکنش بهتر نانوذرات در ماتریس منجر می‌شود. این بهبود در توزیع نانوذرات به دلیل تمایل نانوذرات مغناطیسی به برهم‌کنش با گروه‌های عاملی است که پیوندهای الکتروستاتیک و واندروالسی را آسان می‌کند و در نهایت استحکام مکانیکی را افزایش می‌دهد. افزون بر این، نتایج آزمایش‌ها نشان داد، میدان مغناطیسی به‌تنهایی بر توزیع نانوصفحه‌های GNP اثر نمی‌گذارد و باید با نانوذرات مغناطیسی ترکیب شود تا اثرهای مثبت بیشتری داشته باشد. آزمون‌های SEM و XRD نشان داد، افزایش درصد هر دو نانوپرکننده به افزایش تجمع نانوذرات و کاهش میان‌لایه‌ای شدن Fe_3O_4 به دلیل چگالی بیشتر آن منجر می‌شود. در آزمایش‌های انجام‌شده، وجود میدان مغناطیسی افزایش شایان توجهی در استحکام کششی، چقرمگی و درصد کشیدگی نسبت به نمونه‌های بدون اعمال میدان مغناطیسی نشان می‌دهد. همچنین، نمونه Fe_3O_4 با ۸٪ وزنی و GNP با ۰/۷٪ وزنی تحت میدان مغناطیسی، بیشترین گذردهی الکتریکی را در نوار X نشان داد. در نهایت، برای ساخت نانوکامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه-اپوکسی، نتایج نشان می‌دهد، در درصدهای وزنی بیشتر از نانوپرکننده‌ها، افزایش سرعت اختلاط مکانیکی ضروری است تا کیفیت توزیع و خواص مکانیکی بهینه حاصل شود. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، اعمال میدان مغناطیسی اثر معناداری بر مدول کشسانی ندارد. این تفاوت می‌تواند ناشی از عواملی مانند نوع و غلظت نانوذرات، ساختار داخلی کامپوزیت و شرایط اعمال میدان مغناطیسی باشد. مطالعات پیشین نیز تأکید کرده‌اند، اثر میدان مغناطیسی بر مدول کشسانی به شدت به این عوامل بستگی دارد و همیشه معنادار نیست. این یافته‌ها می‌تواند مبنای مناسبی برای توسعه مواد جدید و کارآمد در صنایع مختلف باشد و به ایجاد راهکارهای نوآورانه در طراحی، ساخت و سبک‌سازی انواع سازه‌های هوایی و فضایی کمک کند.

مراجع

- Allahbakhsh A., Surface Characteristics and Mechanical Performance of EPDM/Graphene Oxide Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol (Persian)*, **37**, 2024.
- Tiwari A., Panda S., Shaw S., Experimental Characterization Optimizing the Alignment Parameter for GNP Epoxy Base Nanocomposite via a Weak DC Magnetic Field, *Polym. Adv.*

اعمال میدان مغناطیسی حاصل می‌شود. به‌طور کلی، نمونه ۰/۷wt% Fe_3O_4 -GNP تحت میدان مغناطیسی دارای بیشترین گذردهی حقیقی در بین همه نمونه‌هاست.

در شکل ۱۱ (b)، که بخش موهومی گذردهی را نشان می‌دهد، مقادیر ϵ'' برای نمونه‌ها دارای کمترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب ۰/۰۶۶۴ و ۰/۰۵۲۱ بود، در حالی که برای نمونه‌ها دارای بیشترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال مغناطیسی، به ترتیب ۰/۱۳۶ و ۰/۰۸۳۵ بود. پیک‌ها با افزایش نسبت وزنی Fe_3O_4 و GNP در محدوده بسامد نوار X مشاهده می‌شوند، بیشترین و مشخص‌ترین پیک به نمونه ۰/۷wt% Fe_3O_4 -GNP تحت میدان مغناطیسی مربوط است. این پیک‌ها به قطبش مواد دی‌الکتریک و رابط نانوذرات دی‌الکتریک مغناطیسی تحت تأثیر میدان الکتریکی نسبت داده می‌شوند [۳۵].

بخش‌های حقیقی و موهومی نفوذپذیری برحسب بسامد در شکل ۱۱ (c) و (d) نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱ (c)، مقادیر μ' که بخش حقیقی نفوذپذیری است، برای نمونه‌ها دارای کمترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب ۱/۰۷۶ و ۱/۰۲۵ حاصل شد، در حالی که برای نمونه‌ها دارای بیشترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال مغناطیسی، مقادیر به ترتیب ۰/۹۸۸ و ۰/۹۹۲ به دست آمد. در شکل ۱۱ (d)، که بخش موهومی نفوذپذیری را نشان می‌دهد، مقادیر μ'' برای نمونه‌ها دارای کمترین مقدار نانوذرات با و بدون اعمال میدان مغناطیسی به ترتیب ۰/۱۵۹ و ۰/۰۲۳۴ بود، در حالی که برای نمونه‌ها دارای بیشترین مقدار نانوذرات با و بدون وجود مغناطیسی، به ترتیب ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱۱ بود. تغییرات در پارامترهای جذب امواج الکترومغناطیسی در نوار X را می‌توان به تفاوت بین مقادیر متوسط بخش‌های حقیقی گذردهی الکتریکی (ϵ') و نفوذپذیری مغناطیسی (μ') نسبت داد [۳۵].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر مخلوط‌کن با سرعت برش زیاد و میدان

- Technol.*, **34**, 3164-3182, 2023.
3. Chhetri S., Adak N.C., Samanta P., Murmu N.C., Srivastava S.K., Kuila T., Synergistic Effect of Fe₃O₄ Anchored N-doped rGO Hybrid on Mechanical, Thermal and Electromagnetic Shielding Properties of Epoxy Composites, *Compos. Part B: Eng.*, **166**, 371-381, 2019.
 4. Kumar R., Singh R.K., Vaz A.R., Savu R., Moshkalev S.A., Self-Assembled and One-Step Synthesis of Interconnected 3D Network of Fe₃O₄/Reduced Graphene Oxide Nanosheets Hybrid for High-Performance Supercapacitor Electrode, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 8880-8890, 2017.
 5. He F., Lam K., Ma D., Fan J., Chan L.H., Zhang L., Fabrication of Graphene Nanosheet (GNS)-Fe₃O₄ Hybrids and GNS-Fe₃O₄/Syndiotactic Polystyrene Composites with High Dielectric Permittivity, *Carbon*, **58**, 175-184, 2013.
 6. Liu Y., Pan F., Wang M., Cao C., Zhang Z., Wang H., Liu X., Li Y., Jiang Z., Vertically Oriented Fe₃O₄ Nanoflakes within Hybrid Membranes for Efficient Water/Ethanol Separation, *J. Membr. Sci.*, **620**, 118916, 2021.
 7. Huang Y., Xiao C.F., Huang Q.-L., Liu H., Hao J.Q., Song L., Magnetic Field Induced Orderly Arrangement of Fe₃O₄/GO Composite Particles for Preparation of Fe₃O₄/GO/PVDF Membrane, *J. Membr. Sci.*, **548**, 184-193, 2018.
 8. Ma X., Song Y., Wang Y., Zhang Y., Xu J., Yao S., Vafai K., Experimental Study of Boiling Heat Transfer for a Novel Type of GNP-Fe₃O₄ Hybrid Nanofluids Blended with Different Nanoparticles, *Powder Technol.*, **396**, 92-112, 2022.
 9. Abbandanak S.N.H., Siadati S.M.H., Eslami-Farsani R., Graphene Surface Treatment Effects on Mechanical Behavior of Basalt Fibers Epoxy Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **31**, 155-170, 2018.
 10. Gomari S., Ehsani Namin P., Ghasemi I., Polymer-Graphene Nanoplatelets Nanocomposites: Properties and Applications, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **32**, 101-121, 2019.
 11. Liu S., Yu B., Wang S., Shen Y., Cong H., Preparation, Surface Functionalization and Application of Fe₃O₄ Magnetic Nanoparticles, *Adv. Colloid Interface Sci.*, **281**, 102165, 2020.
 12. Anupam Tiwari S.K.P.S.K. Shaw, Experimental Characterization Optimizing the Alignment Parameter for GNP Epoxy Base Nanocomposite via a Weak DC Magnetic Field, *Polym. Adv. Technol.*, **34**, 3164-3182, 2023.
 13. Wang Y., Guo S., Dong B., Xing F., Enhanced Tensile Strength of Monolithic Epoxy with Highly Dispersed TiO₂-Graphene Nanocomposites, *J. Compos. Sci.*, **5**, 191, 2021.
 14. Liu H., Liang C., Chen J., Huang Y., Cheng F., Wen F., Xu B., Wang B., Novel 3D Network Porous Graphene Nanoplatelets/Fe₃O₄/Epoxy Nanocomposites with Enhanced Electromagnetic Interference Shielding Efficiency, *Compos. Sci. Technol.*, **169**, 103-109, 2019.
 15. Huang Y., Jiao W., Niu Y., Ding G., Wang R., Improving the Mechanical Properties of Fe₃O₄/Carbon Nanotube Reinforced Nanocomposites by a Low-Magnetic-Field Induced Alignment, *J. Polym. Eng.*, **38**, 731-738, 2018.
 16. Hao R., Jiao X., Zhang X., Tian Y., Fe₃O₄/Graphene Modified Waterborne Polyimide Sizing Agent for High Modulus Carbon Fiber, *Appl. Surface Science*, **485**, 304-313, 2019.
 17. Shen X.J., Dang C.Y., Tang B.L., Yang X.H., Nie H.J., Lu J.J., Zhang T.T., Friedrich K., The Reinforcing Effect of Oriented Graphene on the Interlaminar Shear Strength of Carbon Fabric/Epoxy Composites, *Mater. Design*, **185**, 108257, 2020.
 18. Zhang D., Yang F., Wang R., Magnetic Field-Induced Orientation of Fe₃O₄-GO and Toughening Effect on Epoxy Resin, *Appl. Phys. A*, **128**, 182, 2022.
 19. Chen G., Ma C., Fu Z., Wang J., Dai P., Significantly Enhancing Fracture Toughness of Epoxy Composite with promising γ -FeOOH@ Fe₃O₄ Hybrid Nanoparticles by Magnetic Field Assistance, *Nano Mater. Sci.*, **4**, 139-150, 2022.
 20. Tiwari A., Panda S.K., Magnetic Field Induced Alignment of Graphene Nanoplatelets in Epoxy Resin to Develop Model Nanocomposite, *J. Compos. Mater.*, **57**, 2451-2466, 2023.
 21. Ghiasvand M., Fazeli H., Eskandari Jam J., Kebritchi A., Molecular Dynamic Investigation of Graphene Oxide Presence and Three Experimental Distribution Methods in Reinforced Epoxy-Based Nanocomposites, *Mechan. Adv. Compos. Struct.*, **12**, 115-128, 2025.
 22. Yasmin A., Abot J.L., Daniel I.M., Processing of Clay/Epoxy Nanocomposites by Shear Mixing, *Scripta Mater.*, **49**, 81-86, 2003.
 23. Ashraf M.A., Peng W., Zare Y., Rhee K.Y., Effects of Size and Aggregation/Agglomeration of Nanoparticles on the Interfacial/Interphase Properties and Tensile Strength of Polymer Nanocomposites, *Nanoscale Res. Lett.*, **13**, 1-7, 2018.
 24. Borin D., Stepanov G., Dohmen E., On Anisotropic Mechanical Properties of Heterogeneous Magnetic Polymeric Composites, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **377**, 20180212, 2019.
 25. Snarskii A.A., Shamonin M., Yuskevich P., Effect of Magnetic-Field-Induced Restructuring on the Elastic Properties of Mag-

- netoactive Elastomers, *J. Magn. Magn. Mater.*, **517**, 167392, 2021.
26. Miękoś E., Cichomski M., Zieliński M., Klepka T., Sroczynski D., Fenyk A., Modification of the Properties of Polymer Composites in a Constant Magnetic Field Environment, *Materials*, **14**, 3806, 2021.
 27. Dawood T.S., Fadhil B.M., Ramadan D.O., Effect of Adding SiO₂ Nanoparticles on Tensile and Bending Tests of Glass/Carbon Hybrid Composite Materials.
 28. Woldemariam M.H., Belingardi G., Koricho E.G., Reda D.T., Effects of Nanomaterials and Particles on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Composite Materials: A Short Review, *AIMS Mater. Sci.*, **6**, 1191-1212, 2019.
 29. Zare Y., Evaluation of Nanoparticle Dispersion and Its Influence on the Tensile Modulus of Polymer Nanocomposites by a Modeling Method, *Colloid Polym. Sci.*, **295**, 363-369, 2017.
 30. Mustafa B.S., Jamal G.M., Abdullah O.G., Improving the Tensile, Toughness, and Flexural Properties of Epoxy Resin Based Nanocomposites Filled with ZrO₂ and Y₂O₃ Nanoparticles, *Results Phys.*, **38**, 105662, 2022.
 31. Yang Y., Wen J., Guo L., Wan X., Du P., Feng P., Shi Y., Wan Q., Long-Term Synaptic Plasticity Emulated in Modified Graphene Oxide Electrolyte Gated IZO-Based Thin-Film Transistors, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 30281-30286, 2016.
 32. Rong M., Zhang M., Ruan W., Surface Modification of Nanoscale Fillers for Improving Properties of Polymer Nanocomposites: A Review, *Mater. Sci. Technol.*, **22**, 787-796, 2006.
 33. Zhang J., Wang J., Lin T., Wang C.H., Ghorbani K., Fang J., Wang X., Magnetic and Mechanical Properties of Polyvinyl Alcohol (PVA) Nanocomposites with Hybrid Nanofillers–Graphene Oxide Tethered with Magnetic Fe₃O₄ Nanoparticles, *Chem. Eng. J.*, **237**, 462-468, 2014.
 34. Albozahid M., Naji H.Z., Alobad Z.K., Saiani A., Enhanced Mechanical, Crystallisation and Thermal Properties of Graphene Flake-Filled Polyurethane Nanocomposites: The Impact of Thermal Treatment on the Resulting Microphase-Separated Structure, *J. Polym. Res.*, **28**, 1-16, 2021.
 35. Heydari F., Afghahi S.S., Valmoozi A.E., A Study on the Structural, Magnetic, and Electromagnetic Wave Absorption Properties of CoFe₂O₄@MWCNT Nanocomposites, *J. Magn. Magn. Mater.*, 172273, 2024.