

Effect of Bending Load on the Electrical Conductivity of Carbon/Epoxy Composites Filled with Nanoparticles

Morteza Razavi¹, Mohammad Tabatabaee Ghomi^{2*}, Fatollah Taheri-Behrooz³, and Golamhossein Liaghat⁴

1. Technology Development Institute, ACECR, P.O. Box 13445-686, Tehran, Iran

2. Faculty of Mechanical Engineering, University of Science and Culture,
P.O. Box 14619-68151, Tehran, Iran

3. School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box 16846-13114, Tehran, Iran

4. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, P.O. Box 14115-146, Tehran, Iran

Received: 3 December 2018, accepted: 23 February 2019

ABSTRACT

Hypothesis: The purpose of this study was to investigate the effect of bending load on the electrical conductivity of carbon-epoxy composites containing various nanoparticles. The developed samples, while having sufficient flexural strength, must have the electrical conductivity proposed by the U.S Energy Institute to be used in the manufacturing of electrodes.

Methods: For this purpose, carbon black nanoparticles, carbon nanotubes and expanded graphite with unidirectional carbon fabrics and epoxy resin were used to make the samples. Carbon black particles, carbon nanotube and expanded graphite with optimum weight percentages (25, 10 and 15%) were added to carbon/epoxy composite and the electrical conductivity threshold of the samples was measured according to the four-point strength method. The average electrical conductivity permeability threshold for composites containing carbon black, expanded graphite and carbon nanotubes was 23.2, 27.3 and 24.7%, respectively. The samples were then subjected to bending load and for the 0.5, 1, 1.5, 2 and 2.5 mm transverse displacement, the electrical conductivity value was measured during loading and unloading.

Findings: The results showed that the value of electrical conductivity loss in carbon/epoxy samples containing carbon nanotubes caused by bending was at lowest and in the carbon/epoxy containing carbon black samples displayed the highest value. Then, the flexural strength of the specimens was measured using a three-point bending test method. The pattern of nanoparticle distribution in the samples was studied on images acquired by scanning electron microscope images. The result of this research could be used in manufacturing of composite electrodes which are subjected to flexural loading (electrostatic desalting crude oil tanks) in services.

Keywords:

carbon black particles,
expanded graphite
particles,
carbon nanotube particles,
electrical conductivity
threshold,
bending load

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: tabatabaee@usc.ac.ir

Please cite this article using:

Razavi M., Tabatabaee Ghomi M., Taheri-Behrooz F., and Liaghat G., Effect of Bending Load on the Electrical Conductivity of Carbon/Epoxy Composites Filled with Nanoparticles, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, 32, 79-92, 2019.

اثر بار خمشی بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی پر شده با نانوذرات

مرتضی رضوی^۱، محمد طباطبایی قمی^{۲*}، فتح‌اله طاهری بهروز^۳، غلامحسین لیاقت^۴

۱- تهران، پژوهشکده توسعه تکنولوژی جهاد دانشگاهی صنعتی شریف، صندوق پستی ۶۸۶-۱۳۴۴۵

۲- تهران، دانشگاه علم و فرهنگ، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۶۸۱۵۱-۱۴۶۱۹

۳- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

۴- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۴۶-۱۴۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

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

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و دوم، شماره ۱،

صفحه ۹۲-۷۹، ۱۳۹۸

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2019.1638

چکیده

فرضیه: هدف از این پژوهش بررسی اثر بار خمشی بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی دارای انواع نانوذرات مختلف بود. نمونه‌های توسعه‌یافته باید ضمن داشتن استحکام خمشی کافی، رسانندگی الکتریکی پیشنهاد شده در استاندارد مؤسسه انرژی آمریکا را داشته باشند تا در ساخت الکترودها استفاده شوند.

روش‌ها: بدین منظور، از نانوذرات دوده، نانولوله‌های کربن و گرافیت انبساط‌یافته همراه با الیاف کربن و رزین اپوکسی برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. ذرات دوده، نانولوله کربن و گرافیت انبساط‌یافته با مقادیر وزنی بهینه (۲۵، ۱۰ و ۱۵٪) به کامپوزیت کربن-اپوکسی اضافه شده و آستانه رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها مطابق روش استحکام چهار نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. متوسط آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی برای کامپوزیت‌های دارای دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن به ترتیب ۲/۲، ۲۷/۳ و ۲۴/۷٪ به دست آمد. سپس، نمونه‌های مزبور زیر بار خمشی قرار گرفته و به ازای ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ mm جابه‌جایی عرضی، مقدار رسانندگی الکتریکی حین بارگذاری و پس از باربرداری اندازه‌گیری شد.

یافته‌ها: نتایج این پژوهش نشان داد، مقدار کاهش رسانندگی الکتریکی در نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای نانولوله‌های کربنی ناشی از خمشی کمترین مقدار و در نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای دوده بیشترین مقدار بود. در ادامه، نمونه‌ها مطابق استاندارد خمشی سه نقطه‌ای زیر بار خمشی قرار گرفتند و مقدار استحکام خمشی نمونه‌ها به دست آمد. با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی کیفیت توزیع نانوذرات در نمونه‌ها مطالعه شد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در ساخت الکترودهای کامپوزیتی رسانایی استفاده شود که زیر بار خمشی (مخازن الکتروستاتیک نمک‌زدایی نفت خام) قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی

ذرات دوده،

ذرات گرافیت انبساط‌یافته،

ذرات نانولوله کربن،

آستانه رسانندگی الکتریکی،

بار خمشی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

tabatabaee@usc.ac.ir

مقدمه

از آنجا که پلیمرها، الکترون‌ها یا حامل‌های جریان الکتریسیته را از خود عبور نمی‌دهند، از آن‌ها به‌عنوان مواد نارسانا در بسیاری از کاربردها استفاده شده است. اما، نارسائیی رزین‌ها همیشه به‌عنوان مزیت به‌شمار نمی‌رود. در برخی کاربردها اگر رزین‌ها رسانای جریان الکتریکی باشند، انتخاب بی‌رقیبی هستند. به همین دلیل تلاش‌های زیادی برای ایجاد رسانندگی الکتریکی در رزین‌ها انجام شده است. امروزه موادی توسعه یافته‌اند که در عین داشتن ویژگی‌های مثبت رزین‌ها، جریان الکتریسیته را نیز از خود عبور می‌دهند. در مقایسه با فلزات رسانا، کامپوزیت‌های رزینی رسانا مزایایی چون چگالی کم، سهولت شکل‌دهی و انعطاف در طراحی، محدوده گسترده رسانندگی الکتریکی و مقامت به خوردگی دارند. افزودن پرکننده رسانا به ماتریس رزینی معمول‌ترین راه ایجاد کامپوزیت رزینی رساناست. پرکاربردترین پرکننده رسانا برای رزین‌ها، دوده (CB)، گرافیت انبساط‌یافته (EG) و نانولوله کربن (CNT) است. مهم‌ترین عامل اثرگذار بر رسانایی کامپوزیت‌های دارای پرکننده، درصد و نوع آن است. در منحنی رسانایی نمونه‌ها برحسب درصد پرکننده، افزایش ناگهانی در رسانایی در محدوده درصد خیلی کم از پرکننده وجود دارد که به آستانه رسانندگی الکتریکی (electrical conductivity threshold) موسوم است. آستانه رسانندگی می‌تواند با تغییر نوع پرکننده افزایش یا کاهش یابد. رسانایی الکتریکی کامپوزیت به‌طور کلی به کسر حجمی پرکننده وابسته است. بسیاری از کامپوزیت‌های رزینی رسانا آستانه رسانندگی را نشان می‌دهند که طبق آن در محدوده درصد کم از افزودنی رسانا تغییرات ناگهانی در مقاومت رزین ایجاد می‌شود. در نتیجه حالت گذاری از نارسانا به رسانایی ایجاد می‌شود که بر تغییرات ناگهانی ذرات برای تشکیل شبکه رسانا دلالت دارد. بر این اساس منحنی رسانایی برحسب درصد افزودنی، S شکل است. مقدار بحرانی پرکننده برای ایجاد رزین رسانا به آستانه تراوایی مرسوم است. یعنی کمترین غلظت ذرات پرکننده که در آن زنجیرها یا شاخه‌های رسانای پیوسته تشکیل می‌شود.

نوع، اندازه و جهت‌گیری ذرات پرکننده در ماتریس رزین اثر بسزایی بر خواص الکتریکی و مکانیکی کامپوزیت دارد. انجمن انرژی آمریکا (United States Department of Energy, DOE) بر اساس کاربرد صفحه الکتروود، خواصی را لازم می‌داند که درباره رسانندگی الکتریکی الکتروود حداقل مقدار 100 S/cm است [1,2]. شرایط لازم برای پرکننده ایده‌آل عبارت از رسانندگی الکتریکی زیاد، بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی، پخش‌پذیری خوب، قابلیت کنترل اندازه ذرات، چگالی و جذب رطوبت کم، اشتعال‌ناپذیری، قیمت

کم و دسترسی آسان است. هر پرکننده بنا بر ویژگی‌های نامبرده می‌تواند با توجه به کاربرد مدنظر انتخاب شود. از کاربردهای مهم رزین‌های پرشده با الیاف کربن استفاده از آن‌ها به‌عنوان الکتروود است. داشتن بسیاری از خواص چون رسانایی، یکپارچگی مکانیکی، نفوذناپذیری، فعالیت الکتروشیمیایی و پایداری در الکتروولت‌ها برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان الکتروود لازم است. اضافه کردن افزودنی‌ها باعث بهبود خواص مکانیکی رزین می‌شود [3]. در همین رابطه، Johnson [4] با استفاده از رزین پلی‌پروپیلن و افزودن پرکننده‌های دوده، گرافیت و نانولوله کربن به ترتیب با مقادیر وزنی $2/5$ ، $6/5$ و 6% کامپوزیت‌هایی با رسانندگی الکتریکی 91 S/cm ساخت. Mighri و همکاران [5] از دوده، گرافیت و الیاف کربن برای افزایش رسانندگی الکتریکی در رزین پلی‌پروپیلن و پلی‌فنیلین سولفید استفاده کردند. نتایج نشان داد، بهترین شرایط مربوط به کامپوزیت دارای 60% پرکننده بوده که در این حالت رسانندگی الکتریکی 16 S/cm و استحکام 84 MPa بود. غلامی و همکاران [6] رسانندگی نانوکامپوزیت پلی‌آنیلین-روی اکسید را بررسی کردند و دریافتند، افزودن نانوذرات روی اکسید به دلیل داشتن ماهیت نیمه‌رسانا باعث کاهش رسانندگی پلی‌آنیلین می‌شود. Chen و همکاران [7] با استفاده از رزین فنولی و پرکننده‌های گرافیت و دوده، کامپوزیتی ساختند که در حالت بهینه دارای رسانندگی الکتریکی 107 S/cm و استحکام 173 MPa بود. در مطالعه دیگری، Wang [8] با استفاده از رزین پلی‌پروپیلن و پرکننده‌های گرافیت، الیاف کربن و دوده کامپوزیتی ساخت که دارای 65% وزنی پرکننده بود. وی، مقادیر رسانندگی الکتریکی حجمی و استحکام خمشی را برای حالت بهینه به ترتیب 105 S/cm و 47 MPa به‌دست آورد. در ادامه، Kakati و همکاران [9] با استفاده از رزین فنولی و ترکیبی از پرکننده‌های دوده، گرافیت و الیاف کربن (دوده، الیاف کربن و گرافیت به ترتیب با مقادیر وزنی $5/5$ و 6%) کامپوزیتی با رسانندگی الکتریکی 92 S/cm و استحکام خمشی 55 MPa ساختند که این مقادیر نزدیک به مقادیر گزارش شده توسط DOE بود. همچنین، Shen و همکاران [10] با روش قالب‌گیری فشاری در دمای معمولی کامپوزیتی رسانا از جنس سدیم سیلیکات گرافیت ساختند و در آن اثر پارامترهایی همچون مقدار و اندازه ذرات گرافیت و زمان انجام فرایند را بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌ها بررسی کردند. Lin و همکاران [11] به مقدار رسانندگی الکتریکی 100 S/cm برای کامپوزیت‌های دارای 85% وزنی پودر گرافیت دست یافتند. Sahari و Dweiri [12] از راه فرایند قالب‌گیری فشاری، کامپوزیت‌هایی با ترکیب پلی‌پروپیلن-گرافیت-دوده ساختند و با استفاده از پودر گرافیت به رسانندگی الکتریکی 7 S/cm

حسینی و زندی [۲۴] نیز به بررسی و تحلیل الکترومکانیک ورق کامپوزیتی تقویت‌شده پرداختند. طاهریان و همکاران [۲۷-۲۵] نیز پژوهش‌هایی درباره ساخت صفحه‌های دوقطبی کامپوزیتی انجام دادند. هدف آن‌ها تولید صفحه دوقطبی کامپوزیتی با رسانندگی الکتریکی، خواص مکانیکی و عبوردهی گاز مناسب برای به‌کارگیری در پیل سوختی رزینی بود. همچنین، مدرسی و همکاران [۲۸] کامپوزیت‌های رسانا را با افزودن سیلیکا به پلی‌آنیلین بررسی کردند. طباطبایی و همکاران [۲۹] نیز رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های کربن اپوکسی دارای نانوذرات دوده، نانولوله کربن و گرافیت انبساط‌یافته را بررسی کردند. Li و همکاران [۳۰] رسانندگی الکتریکی و گرمایی کامپوزیت‌های ماتریس پلیمری را بررسی کردند. Chen و همکاران [۳۱] نیز رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های ناهمسانگرد را با پرکننده دوده مطالعه کردند. با توجه به اینکه در نهایت محصولات رسانای تولیدشده از ترکیب یواف، رزین و نانوذرات زیر بارهای مکانیکی کار می‌کنند. بنابراین لازم است، پژوهشی انجام شده و نشان داده شود، این نوع مواد رسانا چه مقدار از رسانایی را زیر بارگذاری حفظ می‌کنند. هدف از این پژوهش، بررسی رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی دارای نانوذرات زیر بارگذاری خمشی بود. بدین منظور، ابتدا نمونه‌های کامپوزیت کربن-اپوکسی دارای نانوذرات دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن تهیه و آستانه رسانندگی الکتریکی بهینه برای هر نمونه به دست آمد. سپس، نمونه‌ها زیر بار خمشی سه‌نقطه‌ای قرار گرفتند و منحنی تغییرات آستانه رسانندگی الکتریکی زیر بارگذاری و هنگام باربرداری خمشی مطالعه شد. همچنین، استحکام مکانیکی نمونه زیر خمش بررسی و مقایسه شد.

تجربی

مواد

مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه‌ها وابسته به نوع و مقدار پرکننده در آن‌هاست. ماتریس رزین نیز به واسطه عواملی چون گرانش، درصد بلورینگی و برهم‌کنش رزین و پرکننده بر رسانایی کامپوزیت اثرگذار است. در این پژوهش از رزین با نام تجاری ML-506 به همراه سخت‌کننده HA-11 از محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر به‌عنوان ماده ماتریس استفاده شد. این نوع رزین بر پایه رزین اپوکسی بیس فنول A بوده و سخت‌کننده آن نیز از نوع پلی‌آمین است. مشخصات رزین اپوکسی استفاده‌شده بر مبنای کالانمای شرکت سازنده در جدول ۱ آمده است. همچنین از پرکننده‌های دوده،

دست یافتند در ادامه، Rhodes و همکاران [۱۳] نیز پژوهشی در زمینه فراهم‌آوردن خواص الکتریکی بهبودیافته برای رزین‌ها از راه شکل‌گیری شبکه نانوالیاف کربن در درصد وزنی کم (آستانه نفوذ کم) انجام دادند. در پژوهش دیگری، Barton و همکاران [۱۴] سه نوع پرکننده کربنی متفاوت (دوده، گرافیت مصنوعی و یواف کربن) را به رزین بلور مایع Vectra A950RX افزودند و از سه مدل تحلیلی مختلف برای پیش‌بینی رسانندگی الکتریکی در سامانه‌های کامپوزیتی دارای پرکننده استفاده کردند که هر سه مدل نتایج قابل قبولی را ارائه داد. همچنین، Liao و همکاران [۱۷-۱۵] در چند پژوهش به ساخت کامپوزیت پلی‌پروپیلن-گرافیت مخلوط‌شده با نانولوله کربن چنددیواره با فرایندهای قالب‌گیری فشاری و مخلوط‌مذاب پرداختند و مقدار رسانندگی الکتریکی را در مقدار ۸۰٪ وزنی گرافیت ۱۰۰ S/cm به دست آوردند. Du و همکاران [۱۸] در مطالعه‌ای بیان کردند، به دلیل آنکه رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌های رزینی پایه کربن فاقد پرکننده حدود ۳۰۰ S/cm است، به پژوهش‌های بیشتری برای افزایش رسانندگی الکتریکی نیاز است. به همین دلیل پیشنهاد دادند، گرافیت انبساط‌یافته (EG) بهترین گزینه به‌عنوان پرکننده رساناست. Xie و همکاران [۱۹] اثر افزودن نانورق‌های گرافن و نانولوله‌های کربن بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌ها را بررسی کردند. نتایج پژوهش آن‌ها نشانگر مؤثرتر بودن نانورق‌های گرافیت در افزایش رسانندگی الکتریکی کامپوزیت‌ها بود. Park و همکاران [۲۰] آزمونی برای تعیین اثر نانوالیاف گرافیتی بر نانوکامپوزیت‌ها انجام دادند و بهبود خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی پلی‌رزین را ثبت کردند. شکریه و همکاران [۲۱] کامپوزیت‌های رسانای متشکل از وینیل استر (به‌عنوان ماتریس ضدخوردگی)، یواف کربن (به‌عنوان تقویت‌کننده و ماده رسانا) و پودر دوده (به‌عنوان پرکننده رسانا) را با درصد‌های وزنی مختلف ساختند. کامپوزیت‌های ساخته‌شده می‌توانند به‌عنوان کامپوزیت‌های رزینی رسانای الکتریکی به‌کار گرفته شوند و قابلیت کاربرد در محیط‌های خورنده شیمیایی را نیز دارند. Bourell و همکاران [۲۲] در بررسی‌ها نشان دادند، در صورت استفاده از ذرات دوده با اندازه نانو در ساخت صفحه‌های کامپوزیتی رسانا در مجاورت گرافیت طبیعی، نتیجه منفی حاصل می‌شود. زیرا، سطح ذرات گرافیت طبیعی موجود به‌وسیله ذرات دوده پوشانده می‌شود. همچنین، در این حالت مقادیر رسانندگی الکتریکی و استحکام خمشی کاهش می‌یابد. Guo و Leu [۲۳] بهینه‌سازی صفحه‌های کامپوزیتی رسانا ساخته‌شده از مواد گرافیتی متفاوت را با فرایند تفت‌جوشی انتخابی با لیزر انجام دادند. این روش نسبت به روش‌های مرسوم مثل قالب‌گیری تزریقی و فشاری کم‌هزینه‌تر و برای ارتقای صفحه‌های رسانا مناسب‌تر است.

است. این نوع گرافیت رسانندگی الکتریکی و گرمایی بسیار خوبی دارد [۳۲]. گرافیت انبساط‌یافته استفاده‌شده از شرکت Merck آلمان تهیه شد و خواص آن بر مبنای کالانمای شرکت سازنده در جدول ۱ آمده است. کامپوزیت‌های بر پایه نانولوله‌های کربن به دلیل خواص منحصر به فرد مکانیکی و الکتریکی، نظر پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند. نحوه افزودن نانولوله‌ها به پلیمر بر کلوخگی و نیز خواص کامپوزیت مربوط بسیار مؤثر است [۳۳]. در جدول ۱ مشخصات و خواص نانولوله کربن استفاده‌شده در این پژوهش محصول شرکت Advance Nanopower آمده است. پارچه‌های کربنی تک‌جهتی به‌عنوان تقویت‌کننده رزین اپوکسی برای افزایش خواص مکانیکی و

گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن استفاده شد. دوده اگرچه به‌طور تجاری به‌عنوان تقویت‌کننده به‌کار می‌رود، اما مقادیر شایان توجهی از آن در تهیه کامپوزیت‌های رسانا استفاده می‌شود. دوده کرمی شکل است و رسانندگی الکتریکی ماتریس عایق را افزایش می‌دهد. در حالی که از طرفی دیگر باعث کاهش خواص مکانیکی ماده می‌شود. دوده استفاده‌شده در این پژوهش از شرکت بازرگانی آدرینا رابر تهیه شد. خواص دوده استفاده‌شده که توسط شرکت سازنده ارائه‌شده در جدول ۱ آمده است. گرافیت نیز به دلیل داشتن مزایایی مانند رسانندگی الکتریکی زیاد، قیمت مناسب و عدم افزایش زیاد گرانبوی، در سال‌های اخیر برای ایجاد رسانایی بسیار پر مصرف بوده

جدول ۱- مشخصات رزین اپوکسی ML-506، ذرات دوده (CB)، گرافیت انبساط‌یافته (EG) و نانولوله کربن (CNT) [۴۲-۴۴].

Table 1. Properties of ML-506 epoxy resin, carbon black (CB), expanded graphite (EG), and carbon nanotube (CNT) particles [42-44].

Property	Epoxy resin	CB particles	EG particles	CNT particles
Figure/Color	Liquid/ Yellow	-	-	-
Viscosity, 25°C (cP)	1450	-	-	-
Density (g/m ³)	1.11	-	-	-
Pot life (min)	50	-	-	-
Gel time (min)	60	-	-	-
Primary curing time (min)	90	-	-	-
Final curing time (day)	7	-	-	-
Electrical resistant (Ω .cm)	-	0.01-1	-	-
Bulk dimension (mm)	-	30-100	-	-
Bulk density (kg/m ³)	-	100-120	-	-
Figure	-	-	Powder	-
Average dimension powder	-	-	For 1000 mesh, 41.6 % above the screen	-
Humidity	-	-	0.58	-
Purity (%)	-	-	99.5	-
Density (g/m ³)	-	-	1.7	-
Diameter (μ m)	-	-	5	-
Thickness (nm)	-	-	35	-
Purity (%)	-	-	-	95
Electrical conductivity (S/cm)	-	-	-	> 100
Density (g/cm ³)	-	-	-	1.8
Bulk density (g/L)	-	-	-	356
Average diameter (nm)	-	-	-	10-20
CNT length (μ m)	-	-	-	20

(multimeter) رقمی دقیق (DMMs) و بسیاری از واحدهای اندازه‌گیری منبع (SMUs) روش اندازه‌گیری استحکام چهارنقطه‌ای را در اختیار قرار می‌دهند. اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی در این پژوهش مطابق دستورکار ارائه‌شده در استاندارد ASTM F390-98 [۳۷] بود. معمولاً برای اندازه‌گیری مقاومت‌های $1 \text{ k}\Omega$ یا کوچک‌تر از روش اندازه‌گیری چهارنقطه‌ای استفاده می‌شود. دستگاه اندازه‌گیری چهارنقطه‌ای به کار گرفته‌شده در آزمایشگاه متشکل از چهار رأس فلزی با فاصله برابر از جنس تنگستن با شعاع دماغه محدود بود. هر یک از این رؤس به وسیله فنرهای مهار شدند که سبب کاهش مقدار آسیب هنگام آزمون می‌شوند. این چهار رأس فلزی اجزایی از پایه مکانیکی خودکار هستند که در طول فرایند اندازه‌گیری به سمت بالا و پایین حرکت می‌کنند. از منبع جریان با مقاومت ظاهری زیاد برای تأمین جریان دوپایه سنجش بیرونی استفاده شد. ولت‌سنج نیز ولتاژ بین دو پایه سنجش داخلی را برای تعیین مقاومت نمونه اندازه‌گیری می‌کند.

تهیه نمونه‌ها

نمونه‌های کربن-اپوکسی همراه با انواع نانوذرات دوده، گرافیت انبسط‌یافته و نانولوله کربن در مقادیر وزنی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۵٪ ساخته شدند. بدین منظور، ابتدا رزین همراه با مقدار مدنظر پرکننده به وسیله همزن برقی به مدت ۱۰ min همزده شد. سپس، به مدت ۴۵ min با توان ۸۰ W در دمای 40°C صوت‌دهی شد. از آنجا که پرکننده‌هایی نظیر گرافیت انبسط‌یافته بسیار غلیظ هستند، بنابراین برای رقیق کردن نمونه پس از گذشت هر ۵ min به مدت ۵ min نیز درون گرم‌کن با دمای 90°C قرار گرفتند. سپس با اضافه کردن تدریجی سخت‌کننده به ترکیب، صوت‌دهی انجام‌شده، محلول حاصل به مدت ۵ min همزده شد. در نهایت، فرایند حباب‌گیری از نمونه‌ها به مدت ۲۰ min با قراردادن نمونه‌ها در پمپ خلأ انجام شد. به دلیل اینکه هوا رسانای جریان الکتریکی نیست، این کار اثر بسزایی بر افزایش رسانایی نمونه دارد. در نهایت، نمونه‌ها به مدت ۲ h در دمای 90°C داخل گرم‌کن قرار داده شدند. از همزن برقی مدل PT1200C ساخت شرکت POLYTRON، دستگاه صوت‌دهی با کاونده US70/T ساخت شرکت BANDELIN و گرم‌کن ساخت شرکت STUART SCIENTIFIC استفاده شد. انتخاب درصد بهینه نانوذرات برای رسانایی الکتریکی هر یک از ذرات در مقاله دیگری مطالعه و تعیین شده است [۲۹]. کسر حجمی الیاف در نمونه‌های ساخته‌شده طبق استاندارد ASTM D3171-06 [۳۸] اندازه‌گیری شد که برابر ۵۳/۵٪ بود. در این پژوهش، نمونه‌ها با ابعاد نهایی $2 \times 20 \times 200 \text{ mm}$ شامل ۱۰ لایه کربن تک‌جهتی و درصد بهینه نانوذرات با روش لایه‌گذاری دستی

الکتریکی رزین استفاده شدند. پارچه تک‌جهتی با چگالی سطحی 200 g/m^2 محصول شرکت Torayca بود [۳۴].

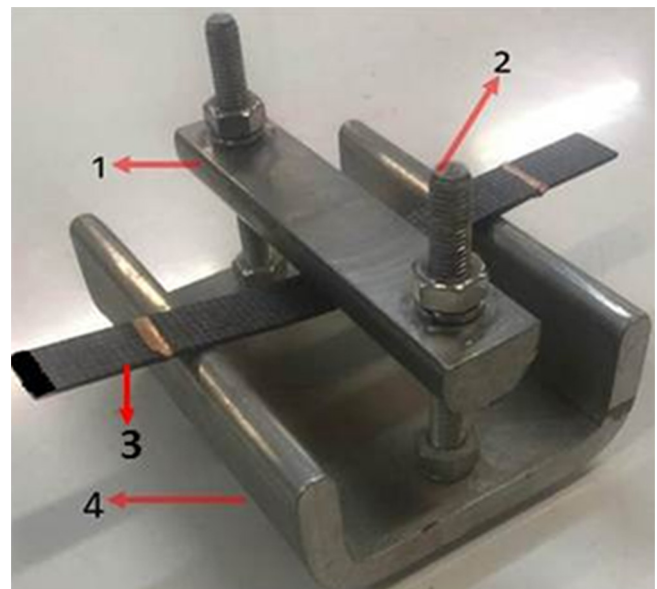
دستگاه‌ها و روش‌ها

اثر نیروی خمشی بر کامپوزیت‌های رسانا

برای بررسی اثر نیرو بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت رسانا، بستی برای آزمون خمش ساخته شد که مطابق شکل ۱ شامل میله بارگذاری، پیچ راهنما، نمونه و تکیه‌گاه بود. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نمونه‌های مدنظر در این بست قرار داده شده و پس از سفت کردن پیچ‌های دو طرف گیره و قراردادن اندازه‌گیر بین دو دهانه، مقدار تغییر شکل عرضی نمونه صفر شد. در ادامه، با سفت‌تر کردن پیچ گیره‌ها مقدار جابه‌جایی عرضی دهانه نمونه به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و $2/5 \text{ mm}$ شد که در هر حالت مقدار رسانندگی الکتریکی محاسبه شد. همچنین، در هر حالت پس از بارگذاری و اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی بار خمشی برداشته شده و تغییرات رسانندگی الکتریکی در این حالت نیز اندازه‌گیری شد. حداقل ابعاد نمونه‌های آزمون خمش $2 \times 20 \times 200 \text{ mm}$ و فاصله تکیه‌گاه‌ها 100 mm مطابق با استاندارد خمش سه‌نقطه‌ای ASTM-D7264 [۳۵] انتخاب شدند.

اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی با روش چهارنقطه‌ای

شیوه مرسوم در اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی، روش‌های اندازه‌گیری استحکام چهارنقطه‌ای هستند [۳۶]. اکثر چندسنج‌های



شکل ۱- بست بارگذاری و نمونه.

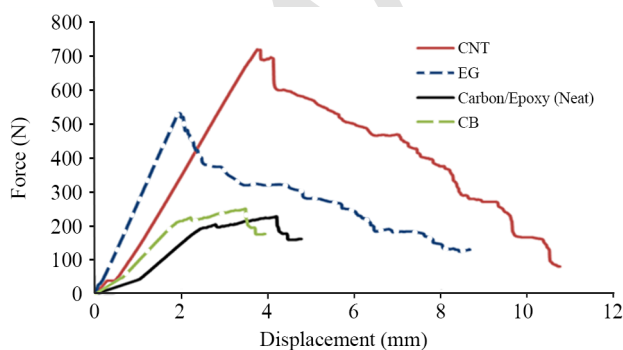
Fig. 1. Loading fixture and the specimen.

جدول ۲- ابعاد و نتایج نمونه‌ها در آزمون‌های خمشی.

Table 2. Dimensions and results of samples in the bending tests.

Sample	Sample code	Dimensions (mm)	Bending straight (MPa)	Deflection (mm)
Carbon/ Epoxy	CE	200.20.2	285.5	4.2
Carbon/ Epoxy/ EG	CE- EG15	200.20.2.7	361.66	2.1
Carbon/ Epoxy/CB	CE-CB25	200.20.2.5	196.42	3.5
Carbon/ Epoxy/ CNT	CE-CNT10	200.20.3	393.06	3.8

در این معادله، σ تنش حداکثر، P نیروی حداکثر، L فاصله دو تکیه‌گاه، b عرض و d ضخامت نمونه است. همان‌طور که در جدول ۳ آمده است، مقدار استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای نانولوله کربن از استحکام نمونه کربن-اپوکسی دارای گرافیت انبساط‌یافته بیشتر است و مقدار استحکام نمونه کربن-اپوکسی دارای گرافیت انبساط‌یافته از نمونه کربن-اپوکسی دارای دوده بیشتر است. به طوری که حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای نانولوله کربن از نمونه کربن-اپوکسی خالص به مقدار ۳۸٪ افزایش یافته است. همچنین، حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای گرافیت انبساط‌یافته از نمونه کربن-اپوکسی خالص به مقدار ۲۷٪ افزایش یافته است. این در حالی است که مقدار حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای دوده از نمونه کربن-اپوکسی به مقدار ۴۵٪ کاهش یافته است. با توجه به نتایج می‌توان گفت، نانولوله‌ها افزون بر داشتن خواص رسانندگی عالی، خواص مکانیکی منحصر به فردی دارند که باعث می‌شود، کامپوزیت تهیه‌شده



شکل ۳- نیرو-جاب‌جایی عرضی نمونه‌های کربن-اپوکسی پرشده با نانوذرات زیر خمش.

Fig. 3. Force-vertical displacement of carbon/epoxy specimens filled with nanoparticles under bending.

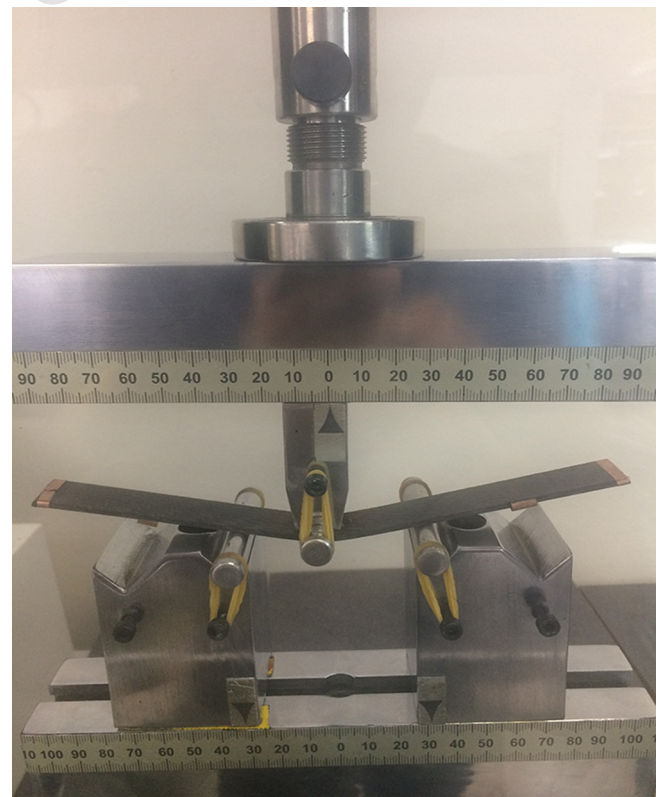
ساخته شدند. پخت نمونه‌ها مطابق با دستورکار سازنده رزین ۲۴ h در دمای معمولی و ۲ h در دمای 80°C انجام شد.

نتایج و بحث

بررسی استحکام خمشی نمونه‌ها

به منظور اندازه‌گیری استحکام خمشی نمونه‌های کربن-اپوکسی با نانوذرات مختلف که دارای درصد نانوذرات بهینه برای رسانندگی الکتریکی هستند، نمونه‌ها مطابق استاندارد خمش سه‌نقطه‌ای ASTM D7264 [۳۵] ساخته و بررسی شدند. از دستگاه آزمون خمش ۵ تنی مدل STM50 ساخت شرکت ستام برای انجام آزمون خمش مطابق شکل ۲ استفاده شد. جدول ۲ ابعاد نمونه‌ها و نتایج حداکثر استحکام خمشی و شکل ۳ منحنی بار-جاب‌جایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. استحکام‌های خمشی در نقطه حداکثر بار منحنی از معادله (۱) محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$



شکل ۲- بست آزمون خمش سه‌نقطه‌ای.

Fig. 2. Three point bending test fixture.

جدول ۳- رسانندگی الکتریکی کامپوزیت کربن-اپوکسی دارای دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن زیر بارگذاری خمشی.

Table 3. Electrical conductivity of carbon/epoxy composite containing carbon black, expanded graphite and carbon nanotube under bending loading.

Materials	Displacement (mm)	Conductivity (Ω/cm)				
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean	SD*
Carbon/Epoxy/CB	0	120.10	110.78	134.89	121.92	12.16
	0.5	118.36	105.33	131.11	118.27	12.89
	1	114.29	101.22	122.21	112.57	10.6
	1.5	110.25	98.57	115.47	108.1	8.65
	2	100.11	96.92	107.22	101.19	5.57
	2.5	96.41	93.15	96	95.19	1.78
Carbon/Epoxy/EG	0	151	118.82	142.96	137.59	16.75
	0.5	148.56	115.39	132.61	132.19	16.59
	1	138.5	111.01	129.6	126.37	14.03
	1.5	133.52	109.74	127.65	123.64	12.39
	2	133.42	107.58	126.33	122.44	13.35
	2.5	131.58	106.01	122.71	120.1	12.98
Carbon/Epoxy/CNT	0	141.66	148.24	151.74	147.21	5.12
	0.5	136.66	141.11	147.43	141.73	5.41
	1	132.22	139.33	145.11	138.89	6.46
	1.5	130.58	137.22	136.11	134.64	3.56
	2	125.54	130.11	134.98	130.21	4.72
	2.5	124.87	130.23	133.62	129.57	4.41

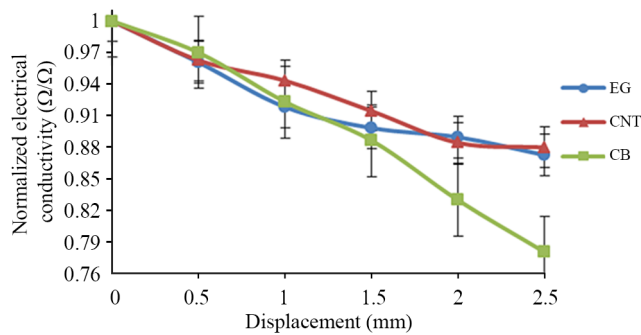
*SD: Standard deviation

است [۲۹]. بیشترین مقدار آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی مربوط به نانولوله کربن و کمترین آن مربوط به دوده است که به ترتیب برای پرکننده‌های دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن ۱۵،۲۵ و ۱۰٪ است. نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای نانولوله کربن کمترین آستانه رسانندگی را دارند. همچنین، با بررسی رسانایی نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای نانولوله کربن و دوده و گرافیت انبساط‌یافته این نتیجه حاصل می‌شود که نانولوله‌های کربن خواص رسانایی را بیشتر از سایر پرکننده‌های رسانا افزایش می‌دهند که این مقدار را در شیب نمودار شکل ۴ نیز می‌توان دید. مقادیر آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی در محدوده قابل قبول استاندارد DOE قرار دارد. مقادیر رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی حدود ۲۱ s/cm است [۲۹]. درصد زیاد پرکننده به دو دلیل روی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اثر می‌گذارد. نخست به این دلیل که رزین کمتری وجود دارد که پرکننده‌ها را تر کند. دوم اینکه احتمال کلوخه‌شدن پرکننده‌ها زیادتر

با آن دارای خواص رسانندگی و مکانیکی عالی باشد. از طرف دیگر، نانولوله‌های کربن خاصیت کلوخه‌شدن دارند که اگر نتوان نانولوله‌های کربن را به‌طور کامل در ماتریس توزیع کرد، اثر منفی روی خواص مکانیکی می‌گذارند. این اثر منفی بدین دلیل است که نانولوله‌ها به حالت کلوخه پراکنده می‌شوند و این کلوخه‌ها همانند نقص عمل می‌کنند و خواص مکانیکی را کاهش می‌دهند.

نتایج رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها زیر بار خمشی

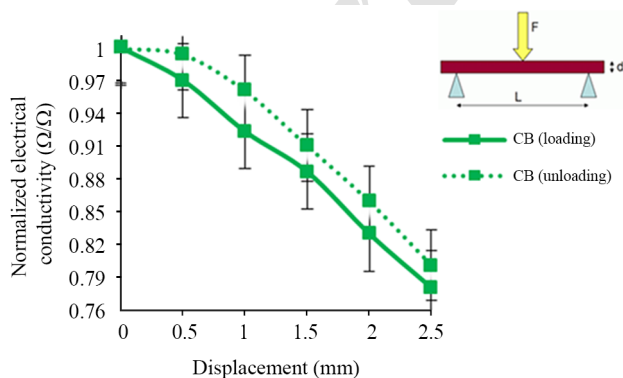
شکل ۴ مقدار آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی برای نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای پرکننده‌های دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن را در مقادیر مختلف وزنی نشان می‌دهد. بر اساس نتایج با افزایش درصد وزنی پرکننده‌ها مقدار رسانایی افزایش می‌یابد که این افزایش ابتدا خطی است و سپس روند افزایش ثابت می‌شود. این مقدار در واقع آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی



شکل ۵- تغییرات رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی-پرکننده زیر بارگذاری خمشی.

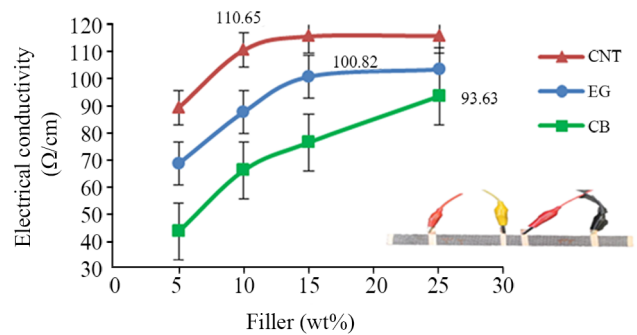
Fig. 5. Electrical conductivity variation of the carbon/epoxy/filler specimen under bending loading.

الکتریکی دوباره اندازه‌گیری می‌شود. در این شکل مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان‌طور که مشخص است، با اعمال نیرو رسانندگی الکتریکی کاهش می‌یابد و با اندازه‌گیری دوباره پس از گذشت زمان و باربرداری، اثر اعمال نیرو از بین رفته است و مقدار رسانندگی الکتریکی به حالت قبل می‌رسد. این روند تا اعمال جابه‌جایی عرضی ۱ mm ادامه دارد. پس از این مقدار جابه‌جایی، با باربرداری مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از اعمال نیرو نمی‌رسد و رسانندگی الکتریکی مقادیر کمتری از حالت پیش را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج بخش استحکام خمشی و شکل ۳ مشخص است، نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده دوده کمترین مقدار استحکام مکانیکی را دارد. بنابراین، با اعمال کمترین مقدار کرنش در مقایسه با مقادیر کرنش سایر پرکننده‌ها



شکل ۶- رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی-دوده زیر بارگذاری و باربرداری.

Fig. 6. Electrical conductivity of carbon/epoxy/carbon black specimen under loading and unloading.

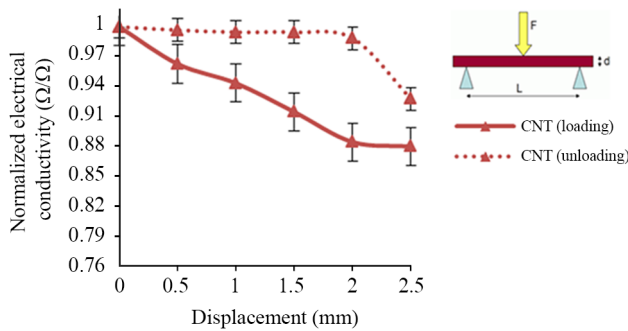


شکل ۴- رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها برحسب درصد وزنی پرکننده‌ها [۲۹].
Fig. 4. Electrical conductivity of specimens versus weight percentage of fillers [29].

می‌شود [۳۹،۴۰]. استحکام پرکننده و ماتریس وقتی در استحکام کامپوزیت مؤثر هستند که بار بتواند از ماتریس به پرکننده‌ها منتقل شود. در این صورت نیاز است که استحکام پیوند فصل مشترک آن‌ها زیاد باشد که انتقال تنش صورت گیرد. جدول ۳ مقادیر رسانندگی الکتریکی نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای پرکننده‌های دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن را نشان می‌دهد که زیر بار خمشی واقع شده‌اند. مقدار جابه‌جایی عرضی اعمال‌شده به ترتیب ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ mm بوده و مقدار افزودنی نانوذرات به اندازه مقدار درصد وزنی آستانه رسانندگی الکتریکی است. همان‌طور که نشان داده شده است، با افزایش مقادیر جابه‌جایی عرضی مقادیر رسانندگی الکتریکی کاهش می‌یابد.

شکل ۵ تغییرات رسانندگی الکتریکی نمونه‌های کربن-اپوکسی پرشده با انواع نانوذرات را زیر بارگذاری خمشی نشان می‌دهد. در محور عمودی شکل ۳ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها به مقدار مشابه در حالت بدون بارگذاری نرمال شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، کاهش رسانندگی الکتریکی بر اثر اعمال بار خمشی در نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای پرکننده دوده دارای بیشترین مقدار است. همچنین، کاهش رسانندگی الکتریکی در نمونه‌های کربن-اپوکسی دارای پرکننده نانولوله کربنی دارای کمترین مقدار است. در اثر اعمال بار خمشی به دلیل وجود کرنش در ماتریس و اینکه ذرات دچار کرنش چندانی نمی‌شوند، فاصله بین ذرات افزایش یافته و این مسئله سبب کاهش رسانایی می‌شود. در ضمن، در ذرات صفحه‌ای و لوله‌ای این کاهش نسبت به دوده که شکل ذره‌ای دارد، کمتر بوده است. زیرا، این ذرات سطح تماس بیشتری با یکدیگر داشته‌اند.

شکل ۶ رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده دوده را نشان می‌دهد که پس از بارگذاری و اندازه‌گیری، بار اعمال‌شده برداشته می‌شود و پس از گذشت ۶۰ min مقدار رسانندگی



شکل ۸- رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی-نانولوله کربن زیر بارگذاری و باربرداری.

Fig. 8. Electrical conductivity of carbon /epoxy/carbon nanotube specimen under loading and unloading.

پیش از بارگذاری نمی‌رسد و مقادیر کمتر را نشان می‌دهد. نانولوله‌ها افزون بر داشتن خواص رسانندگی عالی، خواص مکانیکی منحصربه‌فردی دارند که باعث می‌شود، کامپوزیت تهیه‌شده از آن دارای خواص رسانندگی و مکانیکی عالی باشد. بنابراین، همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، با وجود کاهش رسانندگی الکتریکی ناشی از اعمال بار خمشی با باربرداری نیرو مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از آن می‌رسد، اما با اعمال جابه‌جایی بیشتر از ۲/۵ mm با اعمال کرنش بیشتر، کامپوزیت قوی‌تر دچار نقص کمتر می‌شود.

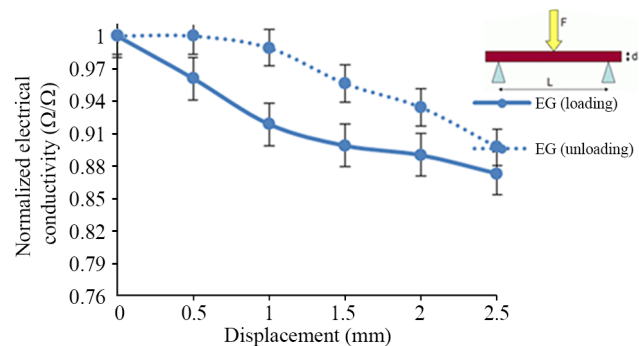
بررسی میکروسکوپی الکترونی پویشی

شکل ۹ به ترتیب تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) مربوط به کامپوزیت کربن-اپوکسی همراه با ذرات پرکننده گرافیت انبساط‌یافته، دوده و نانولوله کربن را زیر بار خمشی نشان می‌دهد. مقدار پرکننده همان مقدار درصد وزنی مربوط به آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی هر یک از پرکننده‌هاست که به ترتیب برای نمونه‌های دارای گرافیت انبساط‌یافته، دوده و نانولوله کربن ۱۵، ۲۵ و ۱۰٪ وزنی است. در شکل ۹ (a) تصویر SEM کامپوزیت کربن-اپوکسی-گرافیت انبساط‌یافته نشان داده شده است. گرافیت انبساط‌یافته ماده گرمی‌شکل پر منفذ است که ریزساختار آن به شکل صفحه‌های موازی است. گرانبوی کم رزین اپوکسی این امکان را فراهم می‌سازد که درون پرزهای ذرات گرافیت انبساط‌یافته نفوذ کرده و ساختار منسجم‌تر و یکنواخت‌تری را ایجاد کند که سبب افزایش رسانندگی الکتریکی می‌شود. شکل ۹ (b) به‌طور واضح نشان می‌دهد، ذرات دوده به‌طور یکنواخت درون کامپوزیت کربن-اپوکسی-نانولوله کربن توزیع شدند. این توزیع یکنواخت ذرات سبب رسانندگی الکتریکی

دچار نقص (کاهش رسانندگی الکتریکی) می‌شود. از این‌رو، نمونه کربن-اپوکسی دارای دوده ضمن اینکه در مقایسه با سایر پرکننده‌ها بیشترین مقدار کاهش رسانندگی الکتریکی را دارد، در کمترین مقدار جابه‌جایی پس از باربرداری (۱ mm) نسبت به سایر پرکننده‌ها به بازگشت مقادیر رسانندگی الکتریکی به مقدار قبل تمایل دارد که این موضوع از محدودیت‌های استفاده از این نانوذرات است.

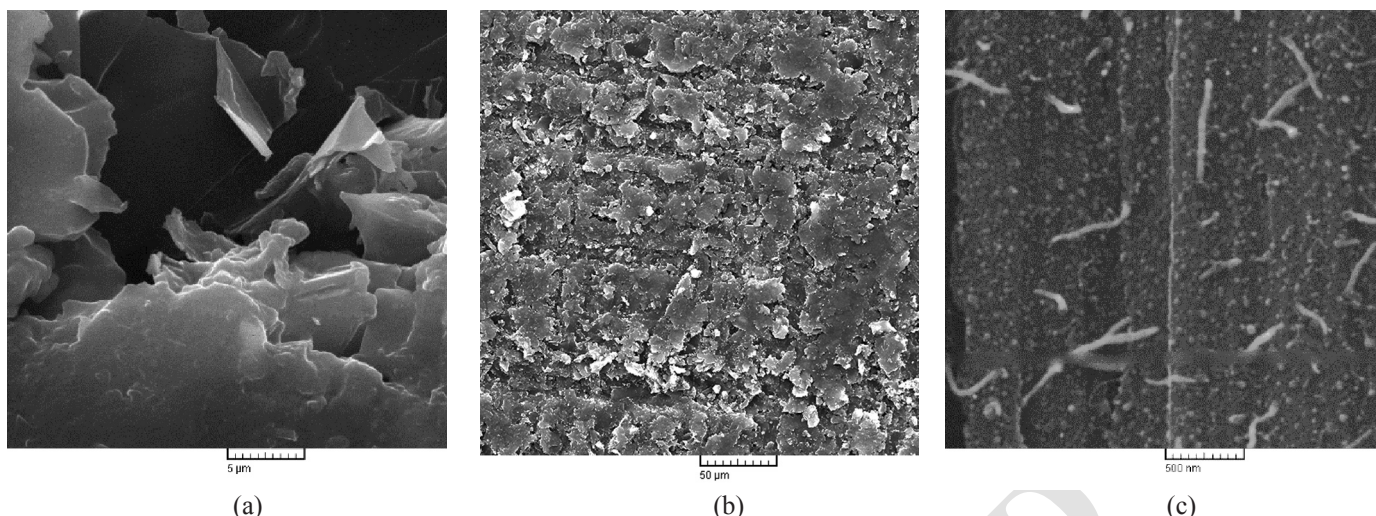
شکل ۷ رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده گرافیت انبساط‌یافته را در حالتی نشان می‌دهد که پس از بارگذاری و اندازه‌گیری، بار اعمال‌شده برداشته شد و پس از گذشت ۶۰ min مقدار رسانندگی الکتریکی دوباره اندازه‌گیری شد. در این شکل مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان‌طور که مشخص است، پس از اعمال نیرو، جابه‌جایی ۱/۵ mm و با برداشتن نیرو، مقدار رسانندگی الکتریکی پس از خمش به مقادیر پیشین نمی‌رسد و مقادیر کمتر از مقادیر پیش از بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده گرافیت انبساط‌یافته دارای استحکام مکانیکی بیشتر از نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده دوده است، بنابراین با اعمال مقدار کرنش بیشتر نسبت به نمونه دارای پرکننده دوده دچار نقص (کاهش رسانندگی الکتریکی) می‌شود.

شکل ۸ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی دارای پرکننده نانولوله کربن را در حالتی نشان می‌دهد که پس از بارگذاری و اندازه‌گیری، بار اعمال‌شده برداشته شده و پس از گذشت ۶۰ min مقدار رسانندگی الکتریکی دوباره اندازه‌گیری شد. در شکل ۸ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه‌ها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان‌طور که مشخص است، پس از اعمال نیرو، جابه‌جایی عرضی ۲/۵ mm و با برداشتن نیرو، مقدار رسانندگی الکتریکی دیگر به مقدار



شکل ۷- رسانندگی الکتریکی نمونه کربن-اپوکسی-گرافیت انبساط‌یافته زیر بارگذاری و باربرداری.

Fig. 7. Electrical conductivity of carbon/epoxy/expanded graphite specimen under loading and unloading.



شکل ۹- ریزنگارهای SEM کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی شامل پرکننده‌ها: (a) گرافیت انبساط‌یافته، (b) دوده و (c) نانولوله کربن.
Fig. 9. SEM micrographs of carbon/epoxy composites containing fillers (a) expanded graphite, (b) carbon black, and (c) carbon nanotube.

اندازه‌گیری چهارنقطه‌ای اندازه‌گیری و با هم مقایسه شد. نتایج بیانگر این است که با اضافه کردن نانوذرات، رسانندگی الکتریکی افزایش می‌یابد تا جایی که اضافه کردن بیشتر نانوذره اثر بسزایی بر افزایش مقدار رسانندگی الکتریکی ندارد که این مقدار همان آستانه تراوایی الکتریکی نمونه‌هاست و به ترتیب برای دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن ۲۵، ۱۵ و ۱۰٪ وزنی به دست آمد. سپس، نمونه‌ها زیر نیروهای خمشی به ازای جابه‌جایی عرضی ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ mm قرار گرفتند و مقدار رسانندگی الکتریکی آن‌ها به ازای نیروهای خمشی متفاوت اندازه‌گیری شد. از نتایج این پژوهش می‌توان به کاهش رسانندگی الکتریکی زیر بار گذاری خمشی اشاره کرد، به طوری که این روند کاهش برای نانولوله کربن بیشترین و برای دوده کمترین مقدار است. در ادامه، با باربرداری نیروی خمشی مقدار رسانندگی الکتریکی نیز اندازه‌گیری و مشخص شد، برای نمونه کربن-اپوکسی همراه با نانوذرات دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن به ترتیب پس از ۱، ۱/۵ و ۲/۵ mm جابه‌جایی عرضی حاصل از نیروی خمشی، مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از بارگذاری نرسید. ولی پیش از این مقادیر جابه‌جایی و پس از باربرداری، همان مقدار رسانندگی الکتریکی پیشین حاصل شد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت، با باربرداری نیروی خمشی مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از اعمال نیرو می‌رسد. اما پس از مقداری مشخص این روند به یکباره تغییر می‌کند و رسانندگی الکتریکی آن‌ها با برداشتن نیروی خمشی دیگر به حالت پیشین نمی‌رسد. همچنین نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نشان داد، مقدار استحکام مکانیکی با افزودن نانوذرات افزایش می‌یابد و اثر نانولوله

مناسب درون‌لایه‌ای و میان‌لایه‌ای در ساختار کامپوزیت می‌شود. شکل ۹ (c) تصاویر SEM مربوط به کامپوزیت کربن-اپوکسی- نانولوله کربن را نشان می‌دهد. ذرات نانولوله کربن به شکل ذرات ریز کرمی‌شکل روی الیاف کربن و درون رزین به‌طور یکنواخت توزیع شدند که به دلیل رسانایی زیاد قابلیت رسانندگی الکتریکی مناسب را در تمام کامپوزیت ایجاد کرده‌اند [۴۱]. جهت‌گیری پرکننده‌ها داخل ماتریس به روش همزدن و نسبت طول به قطر پرکننده وابسته است. همان‌طور که تصاویر SEM نشان می‌دهد، الیاف نانولوله کربن در کامپوزیت‌های ساخته‌شده دارای جهت‌گیری تصادفی هستند و این جهت‌گیری تصادفی نشان می‌دهد، روش همزدن مناسب بوده است. جهت‌گیری تصادفی همواره برای جلوگیری از رشد ترک مناسب‌تر است. اما، در گرافیت انبساط‌یافته دیده می‌شود که لایه‌های گرافیتی در جهت خاصی روی هم چیده شده‌اند که این موضوع احتمالاً سبب جهت‌دار شدن خواص مکانیکی در این کامپوزیت می‌شود.

نتیجه‌گیری

هدف پژوهش حاضر، بررسی مقدار رسانندگی الکتریکی کامپوزیت رسانا زیر بار خمشی بود، به طوری که مقدار رسانایی در محدوده استاندارد انجمن انرژی آمریکا باشد. بدین منظور پرکننده‌هایی نظیر ذرات دوده، گرافیت انبساط‌یافته و نانولوله کربن به کامپوزیت کربن-اپوکسی اضافه شدند و رسانندگی الکتریکی نمونه‌های رزین دارای نانوذرات و کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی دارای نانوذرات با روش

که مقدار حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای دوده از نمونه کربن-اپوکسی به مقدار ۴۵٪ کاهش یافت. در نهایت، از نمونه‌ها تصاویر میکروسکوپی تهیه شد و مشاهدات ریزساختاری حاکی از توزیع مناسب نانوذرات درون کامپوزیت‌های ساخته‌شده بود. از نتایج این پژوهش می‌توان در ساخت الکترودهای رسانا استفاده کرد.

کربن در بین سایر افزودنی‌ها بیشتر است. همچنین، این استحکام مکانیکی بیشتر از استاندارد انجمن انرژی آمریکا است. به طوری که حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای نانولوله کربن از نمونه کربن-اپوکسی به مقدار ۳۸٪ افزایش یافت. همچنین، حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-اپوکسی دارای گرافیت انبساط‌یافته از نمونه کربن-اپوکسی به مقدار ۲۷٪ افزایش یافت. این در حالی است

مراجع

- Kakati B.K. and Deka D., Differences in Physico-Mechanical Behaviors of Resol (E) and Novolac Type Phenolic Resin Based Composite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell, *Electrochimica Acta*, **52**, 7330-7336, 2007.
- Du L. and Jana S.C., Highly Conductive Epoxy/Graphite Composites for Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Power Sources*, **172**, 734-741, 2007.
- Bidi A., Liaghat Gh., and Rahimi Gh., Effect of Nano Clay Addition to Energy Absorption Capacity of Steel-polyurea Bi-layer, *J. Sci. Technol. Compos.*, **3**, 157-164, 2016.
- Johnson B.A., *Thermally and Electrically Conductive Polypropylene Based Resins for Fuel Cell Bipolar Plates*, Thesis, Michigan Technological University, 2009.
- Mighri F., Huneault M.A., and Champagne M.F., Electrically Conductive Thermoplastic Blends for Injection and Compression Molding of Bipolar Plates in the Fuel Cell Application, *Polym. Eng. Sci.*, **44**, 1755-1765, 2004.
- Gholami H., Shakeri A., and Moosavi S.H., Preparation and Properties Investigation of Conductive Polyaniline-Zinc Oxide Nanocomposites, *J. Sci. Technol. Compos.*, **2**, 7-12, 2015.
- Chen S., Bourell D.L., and Wood K.L., Fabrication of PEM Fuel Cell Bipolar Plates by Indirect Selective Laser Sintering (SLS), *Proceeding of Solid Freeform Fabrication Symposium*, 244-256, 2004.
- Wang Y., *Conductive Thermoplastic Composite Blends for Flow Field Plates for Use in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)*, Thesis, University of Waterloo, 2006.
- Kakati B., Sathiyamoorthy D., and Verma A., Electrochemical and Mechanical Behavior of Carbon Composite Bipolar Plate for Fuel Cell, *Int. J. Hydrogen Energ.*, **35**, 4185-4194, 2010.
- Shen C., Mu P., and Yuan R.Z., Sodium Silicate/Graphite Conductive Composite Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Power Sources*, **162**, 460-463, 2006.
- Jin J., Lin Y., Song M., Gui C., and Leesirisan S., Enhancing the Electrical Conductivity of Polymer Composites, *Eur. Polym. J.*, **49**, 1066-1072, 2013.
- Dweiri R. and Sahari J., Computer Simulation of Electrical Conductivity of Graphite-Based Polypropylene Composites Based on Digital Image Analysis, *J. Mater. Sci.*, **42**, 10098-10102, 2007.
- Rhodes S.M., Higgins B., Xu Y., and Brittain W.J., Hyperbranched Polyol/Carbon Nanofiber Composites, *Polym. J.*, **48**, 1500-1509, 2007.
- Barton R., Keith J., and King J., Development and Modeling of Electrically Conductive Carbon Filled Liquid Crystal Polymer Composites for Fuel Cell Bipolar Plate Applications, *J. New Mater. Electrochem.*, **10**, 225-229, 2007.
- Hsiao M.C., Electrical and Thermal Conductivities of Novel Metal Mesh Hybrid Polymer Composite Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *J. Power Sources*, **195**, 509-515, 2010.
- Liao S.H., Hsiao M.C., Yen C.Y., Ma C.C. M., Lee S.J., Su A., Tsai M.C., Yen M.Y., and Liu P.L., Novel Functionalized Carbon Nanotubes as Cross-Links Reinforced Vinyl Ester/Nanocomposite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *J. Power Sources*, **195**, 7808-7817, 2010.
- Liao S.H., Hung C.H., Ma C.C. M., Yen C.Y., Lin Y.F., and Weng C.C., Preparation and Properties of Carbon Nanotube-Reinforced Vinyl Ester/Nanocomposite Bipolar Plates for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells, *J. Power Sources*, **176**, 175-182, 2008.
- Du L. and Jana S.C., Hygrothermal Effects on Properties of

- Highly Conductive Epoxy/Graphite Composites for Applications as Bipolar Plates, *J. Power Sources*, **182**, 223-229, 2008.
19. Sun L., Cui R., Jalbout A., Li M., Pan X., Wang R., and Xie H., LiFePO₄ as an Optimum Power Cell Material, *J. Power Sources*, **189**, 522-526, 2009.
 20. Park S.M., Jung D.H., Kim S.K., Lim S., Peck D., and Hong W.H., The Effect of Vapor-Grown Carbon Fiber as an Additive to the Catalyst Layer on the Performance of a Direct Methanol Fuel Cell, *Electrochimica Acta*, **54**, 3066-3072, 2009.
 21. Shokrieh M.M., Esmkhani M., Vahedi F., and Shahverdi H.R., Improvement of Mechanical and Electrical Properties of Epoxy Resin with Carbon Nanofibers, *Iran. Polym. J.*, **22**, 721-727, 2013.
 22. Bourell D., Leu M.C., Chakravarthy K., Guo N., and Alayavalli K., Graphite-Based Indirect Laser Sintered Fuel Cell Bipolar Plates Containing Carbon Fiber Additions, *CIRP Annals-Manufact. Technol.*, **60**, 275-278, 2011.
 23. Guo N. and Leu M.C., Effect of Different Graphite Materials on the Electrical Conductivity and Flexural Strength of Bipolar Plates Fabricated Using Selective Laser Sintering, *J. Hydrogen Energ.*, **37**, 3558-3566, 2012.
 24. Hosseini M. and Zandi Baghche Maryam A., Electromechanical Response Analysis of a Rotating Piezoelectric Cylinder with Functionally Graded Material under Thermomagnetic Fields, *J. Sci. Technol. Compos.*, **3**, 59-72, 2016.
 25. Taherian R., Hadianfard M.J., and Golikand A.N., Manufacture of a Polymer-Based Carbon Nanocomposite as Bipolar Plate of Proton Exchange Membrane Fuel Cells, *Mater. Desing*, **49**, 242-251, 2013.
 26. Taherian R., Golikand A.N., and Hadianfard M.J., The Effect of Mold Pressing Pressure and Composition on Properties of Nanocomposite Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Mater. Desing*, **32**, 3883-3892, 2011.
 27. Taherian R., A Review of Composite and Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Materials, Fabrication, and Material Selection, *J. Power Sources*, **265**, 370-390, 2014.
 28. Modarresi-Alam A.R., Soleimani M., Pakseresht M., Farzaneh-Jobaneh E., Zeraatkar V., Tabatabaei F.A., Shabzendedar S., and Movahedifar F., Preparation of New Conductive Nanocomposites of Polyaniline and Silica under Solid-State Condition, *Polym. Int.*, **29**, 387-398, 2016.
 29. Tabatabaee M., Taheri-Behrooz F., Razavi M., and Liaghat G., Electrical Conductivity Enhancement of Carbon/Epoxy Composites Using Nanoparticles, *J. Sci. Technol. Compos.*, **5**, 605-614, 2019.
 30. Zhang L., Deng H., and Fu Q., Recent Progress on Thermal Conductive and Electrical Insulating Polymer Composite, *Compos. Commun.*, **8**, 74-82, 2018.
 31. Chen Y.F., Li J., and Tan Y.J., Low Magnetic Field-Induced Morphological Regulation in Isotactic Polypropylene/Poly(ϵ -caprolactone)/Carbon Black Composites for High Electrical Conductivity and Conductive Anisotrop, *Compos. Commun.*, **9**, 58-62, 2018.
 32. Akhlaghi R., Bahramian A.R., and Kashani M.R., The Effect of Graphite Nanoparticles on Thermal Stability and Ablation of Phenolic/Carbon Fiber/Graphite Nanocomposites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 241-249, 2014.
 33. Karimi M., Ghajar R., and Montazeri A., Investigation of Nanotubes' Length and Their Agglomeration Effects on the Elastoplastic Behavior of Polymer-Based Nanocomposites, *J. Sci. Technol. Compos. (Persian)*, **4**, 229-240, 2017.
 34. TORAYCA®|TORAY, <http://www.torayca.com/en/>, Available 4 September 2018.
 35. Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D7264, 2007.
 36. Standard Test Methode for Sheet Resistance of Thin Metallic Films with a Collinear Four-Probe Array, Annual Book of ASTM Standard, F390-98, 2003.
 37. Pan Y.X., Yu Z.Z., Ou Y.C., and Hu G.H., New Process of Fabricating Electrically Conducting Nylon 6/Graphite Nanocomposites via Intercalation Polymerization, *J. Polym. Sci. Polym. Phys.*, **38**, 1628-1633, 2000.
 38. Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D3171, 2010.
 39. Shokrieh M.M. and Esmkhani M., Experimental Investigation on Fatigue Behavior of Epoxy Resin under Load and Displacement Controls, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**, 373-382, 2014.
 40. Shokrieh M.M. and Safarabadi M., Influence of Physical, Thermal and Mechanical Parameters on Micro Residual Stresses in Polymeric Composites, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **24**, 355-368, 2012.
 41. Hosseini H., Kokabi M., and Ebrahimi N.G., Vertical Electrospinning of UHMWPE/ZnO Nanocomposite Fibers at High Temperature, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **27**,

- 131-141, 2014.
42. Mokarrar Industrial Group, <http://mokarrar.com/en>, Available 4 September 2018.
43. Shimimarket, <http://www.shimimarket.com>, Available 4

- September 2018.
44. AMG Graphite-Graphit Kropfmühl GmbH, <https://www.gk-graphite.com/home>, Available 4 September 2018.

Archive of SID