#### **Research article**

Available in: http://jips.ippi.ac.ir

Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian), Vol. 32, No. 1, 79-92 April-May 2019 ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883 DOI: 10.22063/JIPST.2019.1638

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

Morteza Razavi<sup>1</sup>, Mohammad Tabatabaee Ghomi<sup>2\*</sup>, Fatollah Taheri-Behrooz<sup>3</sup>, and Golamhossein Liaghat<sup>4</sup>

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

**ypothesis**: 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.

 $\overline{(*)}$ 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.

#### Keywords:

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

# اثر بار خمشی بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیتهای کربن–اپوکسی پرشده با نانوذرات

مرتضى رضوى'، محمد طباطبايي قمي "، فتحاله طاهري بهروز"، غلامحسين لياقت ا

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 ۱۳۱۴–۱۶۸۴۶ ۴- تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک، صندوق پستی ۱۴۶–۱۴۱۱۵

دریافت: ۱۳۹۷/۹/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۴

مقاله پژوهشی

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

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیودوم، شماره ۱، صفحه ۹۲ - ۹۷، ۱۳۹۸ ISSN: 1016-3255 Online ISSN: 2008-0883 DOI: 10.22063/JIPST.2019.1638

چکيده

**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 پیشنهادشده 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 چهارنقطهای اندازهگیری شد. متوسط آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی برای کامپوزیتهای دارای دوده، گرافیت انبساطیافته و نانولوله کربن به ترتیب ۲۳/۲، ۲۳/۲ و ٪۲۴ بهدست آمد. سپس، نمونههای مزبور زیر بار خمش قرار گرفته و به ازای ۵/۰، ۱، ۵/۱، ۲ و mm ۲/۵ 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 خمش کمترین مقدار و در نمونههای کربن-اپوکسی دارای دوده بیشترین مقدار بود. در ادامه، نمونهها مطابق استاندارد خمش سهنقطهای زیر بار خمشی قرار گرفتند و مقدار استحکام خمشی نمونهها بهدست 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 الکتروستایی نمکردایی نفت خام) قرار میگیرند.

> \* مسئول مكاتبات، پيامنگار: tabatabaee@usc.ac.ir

#### واژههای کلیدی

ذرات دوده، ذرات گرافیت انبساطیافته، ذرات نانولوله کربن، آستانه رسانندگی الکتریکی، بار خمشی

### مقدمه

از أنجا كه يليمرها، الكترونها يا حاملهاي جريان الكتريسيته را از خود عبور نمی دهند، از آنها به عنوان مواد نارسانا در بسیاری از كاربردها استفاده شده است. اما، نارسانایی رزینها همیشه بهعنوان مزیت بهشمار نمی رود. در برخی کاربردها اگر رزین ها رسانای جریان الکتریکی باشند، انتخاب بی رقیبی هستند. به همین دلیل تلاشهای زیادی برای ایجاد رسانندگی الکتریکی در رزین ها انجام شده است. امروزه موادی توسعه یافتهاند که در عین داشتن ویژگیهای مثبت رزين ها، جريان الكتريسيته را نيز از خود عبور مي دهند. در مقايسه با فلزات رسانا، کامپوزیتهای رزینی رسانا مزایایی چون چگالی کم، سهولت شکل دهی 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 انبساط یافته (EG) و نانولوله کربن (CNT) است. مهم ترین عامل اثر گذار بر رسانایی کامپوزیتهای دارای پرکننده، درصد و نوع آن است. در منحنى رسانايي نمونهها برحسب درصد پركننده، افزايش ناگهاني در رسانایی در محدوده درصد خیلی کم از پرکننده وجود دارد که به آستانه رسانندگی الکتریکی (electrical conductivity threshold) موسوم است. آستانه رسانندگی می تواند 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 می شود. در نتیجه حالت گذاری از نارسانا به رسانایی ایجاد می شود که بر تغییرات ناگهانی ذرات برای تشکیل شبکه رسانا دلالت دارد. بر این اساس منحني رسانايي برحسب درصد افزودني، Sشکل است. مقدار بحراني پرکننده برای ایجاد رزین رسانا به آستانه تراوایی مرسوم است. یعنی کمترین غلظت ذرات پرکننده که در آن زنجیرها یا شاخههای رسانای پيوسته تشكيل مي شود.

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 الکترود، خواصی را لازم میداند که درباره رسانندگی الکتریکی الکترود حداقل مقدار ۱۰۰ است [۲،۲]. 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 می تواند با توجه به کاریرد مدنظر انتخاب شود. از کاربردهای مهم رزين هاي يرشده با الياف كربن استفاده از آن ها بهعنوان الكترود است. داشتن بسیاری از خواص چون رسانایی، یکپارچگی مکانیکی، نفوذناپذیری، فعالیت الکتروشیمیایی و پایداری در الکترولیتها برای استفاده از آنها بهعنوان الكترود لازم است. اضافهكردن افزودنيها باعث بهبود خواص مکانیکی رزین می شود [۳]. در همین رابطه، Johnson [۴] با استفاده از رزین یلی پروییلن و افزودن پرکننده های دوده، گرافیت و نانولوله کربن به ترتیب با مقادیر وزنی ۲/۵، ۶/۵ و ./۶ کامپوزیتهایی با رسانندگی الکتریکی ۹۱ S/cm ساخت. Mighri و همکاران [۵] از دوده، گرافیت و الیاف کربن برای افزایش رسانندگی الکتریکی در رزین پلیپروپیلن و پلیفنیلین سولفید استفاده كردند. نتايج نشان داد، بهترين شرايط مربوط به كاميوزيت دارای ٪۶۰ پرکننده بوده که در این حالت رسانندگی الکتریکی ۱۶ S/cm و استحکام ۸۴ MPa بود. غلامی و همکاران [۶] رسانندگی نانوکامپوزیت پلیآنیلین–روی اکسید را بررسی کردند و دریافتند، افزودن نانوذرات روى اكسيد به دليل داشتن ماهيت نيمهرسانا باعث کاهش رسانندگی پلی آنیلین می شود. Chen و همکاران [۷] با استفاده از رزین فنولی و پرکننده های گرافیت و دوده، کامپوزیتی ساختند که در حالت بهینه دارای رسانندگی الکتریکی ۱۰۷ S/cm و استحکام ۱۷۳ MPa بود. در مطالعه دیگری، Wang [۸] با استفاده از رزین پلیپروپیلن و پرکنندههای گرافیت، الیاف کربن و دوده کامپوزیتی ساخت که دارای ٪۶۵ وزنی پرکننده بود. وی، مقادیر رسانندگی الكتريكي حجمي و استحكام خمشي را براي حالت بهينه به ترتيب ۲۰۵ S/cm و ۴۷ MPa بهدست آورد. در ادامه، Kakati و همکاران [۹] با استفاده از رزین فنولی و ترکیبی از پرکنندههای دوده، گرافیت و الياف كربن (دوده، الياف كربن و گرافيت به ترتيب با مقادير وزني ۵/۵ و ./۶) کامپوزیتی با رسانندگی الکتریکی ۹۲ S/cm و استحکام خمشی ۵۵ MPa ساختند که این مقادیر نزدیک به مقادیر گزارششده توسط DOE بود. همچنین، Shen و همکاران [۱۰] با روش قالب گیری 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 کامپوزیت ها بررسی کردند. Lin و همکاران [۱۱] به مقدار رسانندگی الکتریکی ۱۰۰ S/cm برای کامپوزیتهای دارای ٪۸۵ وزنی پودر گرافیت دست یافتند. Sahari و I۲] Dweiri از راه فرایند قالب گیری فشاری، کامپوزیتهایی با ترکیب پلیپروپیلن-گرافیت-دوده

ساختند و با استفاده از پودر گرافیت به رسانندگی الکتریکی S/cm ۷

حسینی و زندی [۲۴] نیز به بررسی و تحلیل الکترومکانیک ورق کامپوزیتی تقویت شده پرداختند. طاهریان و همکاران [۲۷–۲۵] نیز يژوهش هايي درباره ساخت صفحه هاي دوقطبي كاميوزيتي انجام دادند. هدف آنها تولید صفحه دوقطبی کامیوزیتی 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 کامیوزیتهای کرین اپوکسی دارای نانوذرات دوده، نانولوله کربن و گرافیت انبساط یافته 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 الیاف، رزین و نانوذرات زیر بارهای مكانيكي كار مي كنند. بنابراين لازم است، پژوهشي 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-ایوکسی دارای نانوذرات زیر بارگذاری خمشی بود. بدین منظور، ابتدا نمونههای کامپوزیت کربن-ایوکسی دارای نانوذرات دوده، گرافیت انبساطیافته و نانولوله کربن تهیه و آستانه رسانندگي الکتريکي بهينه براي هر نمونه بهدست آمد. سيس، 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.

## تجربى

#### مواد

مقادیر مقاومت الکتریکی نمونه ها وابسته به نوع و مقدار پرکننده در آن هاست. ماتریس رزین نیز به واسطه عواملی چون گرانروی، 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 11 از محصولات شرکت مواد مهندسی مکرر بهعنوان ماده ماتریس استفاده شد. این نوع رزین بر پایه رزین اپوکسی بیسفنول A بوده و سختکننده آن نیز از نوع پلی آمینی است. مشخصات رزین اپوکسی استفاده شده بر مبنای کالانمای شرکت سازنده در جدول ۱ آمده است. همچنین از پرکننده های دوده،

دست یافتند در ادامه، Rhodes و همکاران [۱۳] نیز پژوهشی در زمينه فراهمآوردن خواص الكتريكي بهبوديافته براي رزينها از راه شکل گیری 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 الیاف کربن) را به رزین بلور مایع Vectra A950RX افزودند و از سه مدل تحلیلی مختلف برای پیش بینی رسانندگی الکتریکی در سامانه های 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 كاميوزيت پلي يروييلن-گرافيت مخلوط شده با نانولوله كربن چندديواره با فرايندهاي قالب گيري فشاري و مخلوط مذاب پرداختند و مقدار رسانندگی الکتریکی را در مقدار ٪۸۰ وزنی گرافیت Du بیان اوردند. 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 نانوورقهای گرافن و نانولولههای کربن بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیتها را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشانگر مؤثر تربودن نانوورقهای 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] کامیوزیتهای رسانای متشکل از وينيل استر (بهعنوان ماتريس ضدخورندگي)، الياف كربن (بهعنوان تقویت کننده و ماده رسانا) و پودر دوده (بهعنوان پرکننده رسانا) را با درصدهای وزنی مختلف ساختند. کامپوزیتهای ساخته شده می توانند بهعنوان کامپوزیتهای رزینی رسانای الکتریکی بهکار گرفته شوند و قابلیت کاربرد در محیطهای خورنده شیمیایی را نیز دارند. Bourell و همکاران [۲۲] در بررسی ها 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 طبيعي موجود بهوسيله ذرات دوده پوشانده مي شود. همچنين، در اين حالت مقادير رسانندگي الکتريکي و استحکام خمشي کاهش مي يابد. Leu و Guo [۲۳] بهینهسازی صفحههای کامپوزیتی رسانا ساختهشده از مواد گرافیتی متفاوت را با فرایند تفتجوشی انتخابی با لیزر انجام دادند. این روش نسبت به روش های مرسوم مثل قالب گیری 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 استفاده شده از شرکت Merck آلمان تهیه شد و خواص آن بر مبنای کالانمای شرکت سازنده در جدول ۱ آمده است. کامپوزیتهای بر پایه نانولولههای کربن بهدلیل خواص منحصر بهفرد 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 استفاده شده در این پژوهش محصول شرکت خواص نانولوله کربن استفاده شده در این پژوهش محصول شرکت 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 استفاده شده در این پژوهش از شرکت بازرگانی آدرینا رابر تهیه شد. خواص دوده استفاده شده که توسط شرکت سازنده ارائه شده در جدول ۱ آمده است. گرافیت نیز به دلیل داشتن مزایایی مانند رسانندگی الکتریکی زیاد، قیمت مناسب و عدم افزایش زیاد گرانروی، در سالهای اخیر برای ایجاد رسانایی بسیار پرمصرف بوده

جدول ۱- مشخصات رزین اپوکسی ML-506، ذرات دوده (CB)، گرافیت انبساطیافته (EG) و نانولوله کربن (CNT) [۴۴–۴۴]. Table 1. Properties of ML-506 epoxy resin, carbon black (CB), expanded graphite (EG), and carbon nanotube (CNT) particles [42-44].

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

مجله علمی \_ پژوهشی، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال سیو دوم، شماره ۱، فروردین – آبان ۱۳۹۸

الکتریکی رزین استفاده شدند. پارچه تکجهتی با چگالی سطحی ۲۰۰ g/m² 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. همان طور که در این شکل دیده می شود، نمونه های مدنظر در این بست قرار داده شده و پس از سفت کردن پیچ های دو طرف گیره و قراردادن اندازه گیر بین دو دهانه، مقدار تغییر شکل عرضی نمونه صفر شد. در ادامه، با سفت ترکردن پیچ گیره ها مقدار جابه جایی عرضی دهانه نمونه به ترتیب ۰/۰، ۱، مرا، ۲ و mm ۲/۵ شد که در هر حالت مقدار رسانندگی الکتریکی محاسبه شد. همچنین، در هر حالت پس از بارگذاری و اندازه گیری رسانندگی الکترکی بار خمشی برداشته شده و تغییرات رسانندگی الکتریکی در این حالت نیز اندازه گیری شد. حداقل ابعاد نمونه های آزمون خمش ۲۰۰۳ می معایم کرد و فاصله تکیه گاها mm ۱۰۰ مطابق با استاندارد خمش سه نقطه ای ASTM-D7264 [۵۳] انتخاب شدند.

## اندازه گیری رسانندگی الکتریکی با روش چهارنقطهای

شیوه مرسوم در اندازه گیری رسانندگی الکتریکی، روش های اندازه گیری استحکام چهارنقطهای هستند [۳۶]. اکثر چندسنجههای



شکل ۱- بست بارگذاری و نمونه.

Fig. 1. Loading fixture and the specimen.

(multimeter) رقمی دقیق (DMMs) و بسیاری از واحدهای اندازه گیری منبع (SMUs) روش اندازه گیری استحکام چهارنقطهای را در اختیار قرار می دهند. اندازه گیری رسانندگی الکتریکی در این پژوهش مطابق دستورکار ارائه شده در استاندارد ASTM F390-98 [77] بود. معمولاً برای اندازه گیری مقاومت های ۸ یا کوچکتر از روش اندازه گیری چهارنقطهای استفاده می شود. دستگاه اندازه گیری چهارنقطهای به کار گرفته شده در آزمایشگاه متشکل از چهار رأس فلزی با فاصله برابر از جنس تنگستن با شعاع دماغه محدود بود. هر یک از این رئوس به وسیله فنرهایی مهار شدند که سبب کاهش مقدار آسیب هنگام آزمون می شوند. این چهار رأس فلزی اجزایی از پایه مکانیکی خودکار هستند که در طول فرایند اندازه گیری به سمت بالا و پایین حرکت می کنند. از منبع جریان با مقاومت ظاهری زیاد برای تأمین چریان دو پایه سنجش بیرونی استفاده شد. ولت سنج نیز ولتاژ بین دو پایه سنجش داخلی را برای تعیین مقاومت نمونه اندازه گیری می کند.

#### تهيه نمونهها

نمونههای کربن-اپوکسی همراه با انواع نانوذرات دوده، گرافیت انبسط یافته 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 W ۸۰ در دمای C°۴ صوتدهی شد. از آنجا که پرکنندههایی نظیر گرافیت انبسط یافته بسیار غلیظ هستند، بنابراین برای رقیق کردن نمونه پس از گذشت هر ۵ min بهمدت ۵ min نیز درون گرمکن با دمای C•۰C قرار گرفتند. سپس با اضافه کردن تدریجی سختکننده به تركيب، صوتدهي انجامشده، محلول حاصل بهمدت ۵ min همزده شد. در نهایت، فرایند حباب گیری از نمونه ها به مدت ۲۰ min با قراردادن نمونهها در پمپ خلأ انجام شد. به دلیل اینکه هوا رسانای جريان الكتريكي نيست، اين كار اثر بسزايي بر افزايش رسانايي نمونه دارد. در نهایت، نمونه ها به مدت ۲ h در دمای ۹۰°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 BANDELIN استفاده شد. انتخاب درصد بهينه نانوذرات براي رسانايي الكتريكي هر یک از ذرات در مقاله دیگری مطالعه و تعیین شده است [۲۹]. كسر حجمي الياف در نمونههاي ساختهشده طبق استاندارد ASTM D3171-06 [۳۸] اندازه گیری شد که برابر ./۵۲/۵ بود. در این پژوهش، نمونهها با ابعاد نهایی mm ۲×۲۰×۲۰۰ شامل ۱۰ لایه کربن تکجهتی و درصد بهینه نانوذرات با روش لایهگذاری دستی

ساخته شدند. پخت نمونهها مطابق با دستورکار سازنده رزین ۲۴ h در دمای معمولی و ۲ h در دمای ۵۰۰۲ انجام شد.

## نتايج و بحث

(1)

## بررسي استحكام خمشي نمونهها

به منظور اندازه گیری استحکام خمشی نمونه های کربن-اپوکسی با نانوذرات مختلف که دارای درصد نانوذرات بهینه برای رسانندگی الکتریکی هستند، نمونه ها مطابق استاندارد خمش سه نقطه ای خمش ۵ تنی مدل ۲۵ STM ساخت شرکت سنتام برای انجام آزمون خمش مطابق شکل ۲ استفاده شد. جدول ۲ ابعاد نمونه ها و نتایج حداکثر استحکام خمشی و شکل ۳ منحنی بار-جابه جایی نمونه ها را نشان می دهد. استحکام های خمشی در نقطه حداکثر بار منحنی از معادله (۱) محاسبه شده و در جدول ۳ آمده است.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2}$$



شكل ۲- بست آزمون خمش سەنقطەاى. Fig. 2. Three point bending test fixture.

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/	CE-CNT10	200.20.3	393.06	3.8
CNT				

در این معادله، σ تنش حداکثر، P نیروی حداکثر، L فاصله دو تکیهگاه، b عرض و b ضخامت نمونه است. همان طور 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 افزایش یافته است. همچنین، حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-پوکسی حالص به مقدار ٪۲۸ ایوکسی دارای گرافیت انبساطیافته از نمونه کربن-اپوکسی حالص به مقدار ٪۲۲ افزایش یافته است. این در حالی است که مقدار حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن-پوکسی خالص به مقدار یربن-گولی یا نولوله کربن از نمونه کربن-پوکسی خالص به مقدار میرا افزایش یافته است. این در حالی است که مقدار حداکثر ایوکسی به مقدار ٪۴۵ کاهش یافته است. با توجه به نتایج می توان گفت، نانولولهها افزون بر داشتن خواص رسانندگی عالی، خواص مکانیکی منحصر به فردی دارند که باعث می شود، کامیوزیت تهیه شده



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

ثر بار خمشی بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیتهای کربن–اپوکسی پرشده با نانوذرات

#### مرتضی رضوی و همکاران

		0			•••••			3	•			0.0	0		
Ta	able 3.	Electrical	l conductivi	ty of	f carbon/e	роху	composite	containing	carbon	black,	expanded	graphite	and ca	rbon	nanotub
u	nder be	ending load	ding.												
- 1															

جدول ۳- رسانندگی الکتریکی کامبوزیت کرین-ایوکسی دارای دوده، گرافیت انسباط یافته و نانولوله کرین زیریار گذاری خمشی.

Matariala	Dignlogoment (mm)	Conductivity (Ω/cm)								
Iviateriais		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Mean	$SD^*$				
//CB	0	120.10	110.78 134.89		121.92	12.16				
	0.5	118.36	105.33	131.11	118.27	12.89				
ixod	1	114.29	101.22	122.21	112.57	10.6				
on/E	1.5	110.25	98.57	115.47	108.1	8.65				
Carb	2	100.11	96.92	107.22	101.19	5.57				
Ū	2.5	96.41	93.15	96	95.19	1.78				
	0	151	118.82	142.96	137.59	16.75				
Carbon/Epoxy/EG	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				
n/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				
larbc	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 ۲۵، ۱۵ 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 وگرافیت انبساطیافته این نتیجه حاصل می شود که نانولولههای کربن خواص رسانایی را بیشتر از سایر پرکنندههای رسانا افزایش می دهند که این مقدار را در شیب نمودار شکل ۴ نیز می توان دید. مقادیر آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی در محدوده قابل قبول استاندارد عOC قرار دارد. مقادیر رسانندگی الکتریکی نمونه کربن–اپوکسی حدود mr ۲۱ است [۲۹]. درصد زیاد پرکننده به دو دلیل روی خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت اثر می گذارد. 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 می گذارند. این اثر منفی بدین دلیل است که نانولولهها به حالت کلوخه پراکنده می شوند و این کلوخهها همانند نقص عمل می کنند و خواص مکانیکی را کاهش می دهند.

## نتايج رسانندگي الكتريكي نمونهها زير بار خمشي

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



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

الکتریکی دوباره اندازه گیری می شود. در این شکل مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه ها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان طور که مشخص است، با اعمال نیرو رسانندگی الکتریکی کاهش می یابد و با اندازه گیری دوباره پس از گذشت زمان و باربرداری، اثر اعمال نیرو از بین رفته است و مقدار رسانندگی الکتریکی به حالت قبل می رسد. این روند تا اعمال جابه جایی عرضی ۱ mm ادامه دارد. پس از این مقدار جابه جایی، با باربرداری مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از اعمال نیرو نمی رسد و رسانندگی الکتریکی مقادیر کمتری از 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 پرکننده



سکل ۲- رسانندی انگیریکی کمونه عربن بپویسی تونی ریز بارگذاری و باربرداری.

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



مرتضی رضوی و همکاران

شکل ۴-رسانندگی الکتریکی نمونههابر حسب درصدوزنی پرکنندهها[۲۹]. Fig. 4. Electrical conductivity of specimens versus weight percentage of fillers [29].

می شود [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 می دهد که زیر بار خمشی واقع شدهاند. مقدار جابه جایی عرضی اعمال شده به ترتیب ۵/۰، ۱، ۵/۱، شدهاند. مقدار جابه جایی عرضی اعمال شده به اندازه مقدار درصد وزنی آستانه رسانندگی الکتریکی است. همان طور که نشان داده شده است، با افزایش مقادیر جابه جایی عرضی مقادیر رسانندگی الکتریکی کاهش می یابد.

شکل ۵ تغییرات رسانندگی الکتریکی نمونههای کربن-اپوکسی پرشده با انواع نانوذرات را زیر بارگذاری خمشی نشان می دهد. در محور عمودی شکل ۳ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونهها به مقدار مشابه در حالت بدون بارگذاری نرمال شدهاند. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود، 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 نمی شوند، فاصله بین ذرات افزایش یافته و این لولهای این کاهش رسانایی می شود. در ضمن، در ذرات صفحهای و لولهای این کاهش نسبت به دوده که شکل ذرهای دارد، کمتر بوده

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

دچار نقص (کاهش رسانندگی الکتریکی) می شود. از این رو، نمونه کربن-اپوکسی دارای دوده ضمن اینکه در مقایسه با سایر پرکنندهها بیشترین مقدار کاهش رسانندگی الکتریکی را دارد، در کمترین مقدار جابه جایی 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 می دهد که پس از بارگذاری و اندازه گیری، بار اعمال شده برداشته شد و پس از گذشت min مقدار رسانندگی الکتریکی دوباره اندازه گیری شد. در این شکل مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه ها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان طور که مشخص است، پس از اعمال نیرو، جابه جایی شدند. همان طور که مشخص است، پس از مقادیر پیش از خمش به مقادیر پیشین نمی رسد و مقادیر کمتر از مقادیر پیش از بارگذاری خمشی را نشان می دهد. همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، 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) می شود.

شکل ۸ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونه کربن⊣پوکسی دارای پرکننده نانولوله کربن را در حالتی نشان می دهد که پس از بارگذاری و اندازهگیری، بار اعمالشده برداشته شده و پس از گذشت ۶۰ min ۶۰ مقدار رسانندگی الکتریکی دوباره اندازهگیری شد. در شکل ۸ مقدار رسانندگی الکتریکی نمونهها به مقدار بدون بارگذاری نرمال شدند. همان طور که مشخص است، پس از اعمال نیرو، جابه جایی عرضی ۲/۵ mm



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



مرتضی رضوی و همکاران

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 نمی رسد و مقادیر کمتر را نشان می دهد. نانولوله ها افزون بر داشتن خواص رسانندگی عالی، خواص مکانیکی منحصر به فردی دارند که باعث می شود، کامپوزیت تهیه شده از آن دارای خواص رسانندگی و مکانیکی عالی باشد. بنابراین، همان طور که در شکل ۳ دیده می شود، با وجود کاهش رسانندگی الکتریکی ناشی از اعمال بار خمشی با باربرداری نیرو مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از آن می رسد، اما با اعمال جابه جایی بیشتر از mm مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از اعمال بارگذاری نمی رسد. با اعمال کرنش بیشتر، کامپوزیت قوی تر دچار نقص کمتر می شود.

## بررسي ميكروسكوپي الكتروني پويشي

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 می دهد. مقدار پرکننده همان مقدار درصد وزنی مربوط به آستانه تراوایی رسانندگی الکتریکی هر یک از پرکنندهاست که به ترتیب برای نمونههای دارای گرافیت انبساطیافته، دوده و نانولوله کربن ۱۵، ۲۵ و ۱۰/۰ وزنی است. در شکل ۹ (a) تصویر SEM کامپوزیت کربن-اپوکسی–گرافیت انبساطیافته نشان داده شده است. گرافیت انبساطیافته ماده کرمی شکل پر منفذ است که ریزساختار آن به شکل صفحههای موازی است. گرانروی کم رزین اپوکسی این امکان را فراهم می سازد منسجم تر و یکنواخت تری را ایجاد کند که سبب افزایش رسانندگی الکتریکی می شود. شکل ۹ (d) به طور واضح نشان می دهد، ذرات دوده به طور یکنواخت درون کامپوزیت کربن–اپوکسی–نانولوله کربن توزیع شدند. این توزیع یکنواخت ذرات سبب رسانندگی الکتریکی



شکل ۹- ریزنگارهای SEM کامپوزیتهای کربن-اپوکسی شامل پرکنندهها: (a) گرافیت انبساط یافته، (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.

> مناسب درونلایهای و میانلایهای در ساختار کامپوزیت میشود. شکل ۹ (۵) تصاویر SEM مربوط به کامپوزیت کربن اپوکسی-نانولوله کربن را نشان میدهد. ذرات نانولوله کربن به شکل ذرات ریز کرمی شکل روی الیاف کربن و درون رزین به طور یکنواخت توزیع شدند که بهدلیل رسانایی زیاد قابلیت رسانندگی الکتریکی مناسب را مدر تمام کامپوزیت ایجاد کردهاند [۴۱]. جهت گیری پرکنندهها داخل ماتریس به روش همزدن و نسبت طول به قطر پرکننده وابسته است. همان طور که تصاویر SEM نشان میدهد، الیاف نانولوله کربن در جهت گیری تصادفی نشان میدهد، روش همزدن مناسب بوده است. جهت گیری تصادفی همواره برای جلوگیری از رشد ترک مناسب تر است. اما، در گرافیت انبساطیافته دیده میشود که لایههای گرافیتی در جهت خاصی روی هم چیده شدهاند که این موضوع احتمالاً سبب جهتدارشدن خواص مکانیکی در این کامپوزیت میشود.

## نتيجه گيري

هدف پژوهش حاضر، بررسی مقدار رسانندگی الکتریکی کامپوزیت رسانا زیر بار خمشی بود، بهطوری 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

اندازه گیری چهارنقطهای اندازه گیری و با هم مقایسه شد. نتایج بیانگر این است که با اضافه کردن نانوذرات، رسانندگی الکتریکی افزایش مى يابد تا جايى كه اضافه كردن بيشتر نانوذره اثر بسزايي بر افزايش 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 بهدست آمد. سپس، نمونهها زیر نیروهای خمشی به ازای جابهجایی عرضی ۵/۰، 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 می توان به کاهش رسانندگی الکتریکی زیر بار گذاری خمشی اشاره کرد، بهطوری که این روند کاهشی 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 كربن-اپوكسي همراه با نانوذرات دوده، گرافيت انبساطيافته و نانولوله کربن به ترتیب پس از ۱، ۱/۵ و ۲/۵ mm جایی عرضی حاصل از نیروی خمشی، مقدار رسانندگی الکتریکی به مقدار پیش از بارگذاری نرسید. ولی پیش از این مقادیر جابه جایی و پس از باربرداری، همان مقدار رسانندگی الکتریکی پیشین حاصل شد. بر این اساس می توان 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 نمىرسد. همچنين نتايج آزمون خمش سەنقطەاى نشان داد، مقدار استحکام مکانیکی با افزودن نانوذرات افزایش می یابد و اثر نانولوله

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 ساخته شده بود. از نتایج این پژوهش میتوان در ساخت الکترودهای رسانا استفاده کرد. کربن در بین سایر افزودنی ها بیشتر است. همچنین، این استحکام مکانیکی بیشتر از استاندارد انجمن انرژی آمریکاست. به طوری که حداکثر استحکام خمشی نمونه کربن⊣پوکسی 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 Bilayer, 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.
- 10. 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.
- 18. 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.

- Sun L., Cui R., Jalbout A., Li M., Pan X., Wang R., and Xie H., LiFePO<sub>4</sub> as an Optimum Power Cell Material, *J. Power Sources*, 189, 522-526, 2009.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

- Zhang L., Deng H., and Fu Q., Recent Progress on Thermal Conductive and Electrical Insulating Polymer Composite, *Compos. Commun.*, 8, 74-82, 2018.
- Chen Y.F., Li J., and Tan Y.J., Low Magnetic Field-Induced Morphological Regulation in Isotactic Polypropylene/Poly(εcaprolactone)/Carbon Black Composites for High Electrical Conductivity and Conductive Anisotrop, *Compos. Commun.*, 9, 58-62, 2018.
- 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.
- 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.
- TORAYCA®|TORAY, http://www.torayca.com/en/, Available 4 September 2018.
- 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.
- Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, D3171, 2010.
- 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.
- 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.
- 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,

#### .....

## مرتضی رضوی و همکاران

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.