

## بررسی و مقایسه خصوصیات الکترومغناطیس نانوکامپوزیت‌های اپوکسی - گرافن و اپوکسی - نانو لوله کربن

رحیم اقرء<sup>۱\*</sup>، بهزاد محمدی<sup>۲</sup>، کمال جانقربان<sup>۳</sup> و محمد امین منتصری<sup>۴</sup>

### چکیده

در این پژوهش، تأثیر نانولوله‌های کربنی و تک لایه‌های گرافیت (گرافن) بر خصوصیات الکترومغناطیسی اپوکسی بررسی و با هم مقایسه گردید. برای انجام این کار، نمونه‌های نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-گرافن و نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-نانو لوله کربن تا ۰/۵ درصد وزنی (۰/۲۶۶ درصد حجمی) با استفاده از روش ریخته‌گری ساخته شدند. پس از آن، مورفولوژی و نحوه پخش تقویت کننده‌ها در زمینه به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. سپس خصوصیات الکترومغناطیس نمونه‌ها در باند X امواج الکترومغناطیس (۸ تا ۱۲GHz) به وسیله شبکه آنالیز کننده اسکالر اندازه‌گیری و مقایسه گردید. نتایج نشان داد که بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی اپوکسی خالص با اضافه کردن ۰/۵ درصد وزنی گرافن و نانو لوله کربنی به ترتیب به طور متوسط ۳۶ و ۱۶ درصد افزایش می‌یابد. مقدار متوسط بخش موهومی نفوذ پذیری الکتریکی نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن به ۰/۵ رسیده است که ۳ برابر نمونه نانوکامپوزیت با درصد برابر نانو لوله کربن و ۱۲/۵ برابر اپوکسی خالص است. فاکتور اتلاف نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن برابر ۰/۱۳ و نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله کربن برابر ۰/۰۴۵ به دست آمده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهند، گرافن به مراتب بیش تر از نانو لوله کربن خصوصیات الکترومغناطیس و فاکتور اتلاف اپوکسی را بهبود می‌بخشد.

واژه‌های کلیدی: گرافن، نانو لوله کربن، نانوکامپوزیت، اپوکسی، تداخل امواج الکترومغناطیس.

۱- پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران

۲- پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

۳- بخش مهندسی مواد- دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز

۴- شرکت صنایع الکترونیک شیراز، بلوار میرزای شیرازی

\* نویسنده مسئول مقاله: eqra\_1343@yahoo.com

## پیشگفتار

و الکترومغناطیسی، تحقیق و تولید نانو کامپوزیت‌های الکترومغناطیس و کاربرد آن‌ها در زمینه‌های مختلف، جذابیت زیادی را برای تحقیقات در دو دهه گذشته داشته است. مزیت این نانوکامپوزیت‌ها به دلیل استفاده از درصد وزنی کم از مواد نانو برای رسیدن به خصوصیات مورد نظر، حفظ مزایای پلیمر زمینه از جمله شکل‌پذیری و وزن کم می‌باشد. لازم به ذکر است که رسیدن به خصوصیات پیش‌بینی شده برای نانوکامپوزیت‌ها به پخش یکنواخت و پیوند سطحی بین تقویت کننده و زمینه بستگی دارد [۴]. نانولوله‌های کربنی و تک لایه‌های گرافیت (گرافن) دو نوع تقویت کننده از مشتقات کربن می‌باشند. گرافن در سال ۲۰۰۴ توسط گیم و همکارانش [۵] معرفی شد. می‌توان گفت که گرافن همان تک لایه‌های ساختار گرافیت است که به صورت یک یا چند لایه جدا شده‌اند و به صورت شبکه دو بعدی لانه زنبوری با طول پیوند ۰/۱۴۲nm منظم شده است [۴]. گرافن دارای خصوصیات برجسته حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و فیزیکی از جمله هدایت حرارتی ۵۰۰۰W/m.K، هدایت الکتریکی ۶۰۰۰S/cm، استحکام کششی ۱۳۰GPa است [۶]. همچنین، سطح بسیار زیاد (۲۶۳۰m<sup>2</sup>/g)، در هم و چروکیده گرافن توانایی به وجود آوردن سطوح داخلی بسیار زیاد در نانوکامپوزیت با استحکام پیوند مناسب را دارد [۷، ۸، ۹]. ورقه ورقه کردن مکانیکی<sup>۹</sup>، رشد زیرلایه‌ای<sup>۱۰</sup>، رسوب شیمیایی بخار<sup>۱۱</sup> و احیای شیمیایی و حرارتی اکسید گرافن از روش‌های مرسوم تولید گرافن می‌باشند. در این میان، گرافن تولید شده با روش احیای حرارتی با ساختار عامل‌دار شده<sup>۱۲</sup> برای اعمال در کامپوزیت مناسب می‌باشد [۱۰-۱۲]. نانولوله‌های کربنی به صورت ورقه‌های گرافیتی یا گرافنی هستند که حول محور افقی به صورت لوله دوران یافته است. از لحاظ تعداد لایه، نانولوله‌های کربنی می‌توانند به شکل‌های تک دیواره و یا چند دیواره وجود داشته باشند. یکی از خصوصیات مکانیکی مهم نانولوله‌های کربنی، استحکام کششی بسیار بالای آن‌ها است که نزدیک به بیش از ۱۰۰ برابر استحکام فولاد است. مطالعات تئوری

پیشرفت‌های سریع و نزدیک شدن فرکانس کاری وسایل الکترونیکی به فرکانس‌های میکروویو، مطالعه خصوصیات الکترومغناطیسی مواد به کار رفته در قطعات الکترونیکی، مدارها، بسته‌بندی و جعبه بردهای الکترونیکی در این فرکانس‌ها لازم و ضروری می‌باشد. توسعه کاربرد قطعات الکترونیکی در فرکانس‌های میکروویو، اطلاع از خصوصیات انتقال الکتریکی در این فرکانس‌ها از قابلیت تحرک هال<sup>۱</sup> و دانسیته انتقال دهنده‌ها یا حمل کننده‌ها و از طرف دیگر خواص مواد مانند نفوذپذیری الکتریکی<sup>۲</sup> ( $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ )، قابلیت نفوذ مغناطیسی<sup>۳</sup> ( $\mu = \mu' - j\mu''$ ) و هدایت الکتریکی ( $\sigma$ ) را لازم دارد. لازم به ذکر است که در روابط فوق  $\epsilon'$  و  $\mu'$  بخش‌های حقیقی<sup>۴</sup> در ارتباط با ذخیره و  $\epsilon''$  و  $\mu''$  بخش‌های موهومی<sup>۵</sup> در ارتباط با اتلاف امواج الکترومغناطیس می‌باشند. هم‌چنین نسبت بخش موهومی به بخش حقیقی برابر فاکتور اتلاف<sup>۶</sup> ماده است [۱۰ و ۱۱]. از طرف دیگر، نتایج تحقیقات مواد و شناسایی خواص الکترومغناطیس برای کاربردهای هوایی و فضایی، فتولتائیک، الکترونیک، حسگرها، کشاورزی، و مهندسی زیستی<sup>۷</sup> و به ویژه جلوگیری از تداخل امواج الکترومغناطیس<sup>۸</sup> و جذب امواج الکترومغناطیس (سیستم‌های رادار گریز)، سودمند و مفید می‌باشند [۱]. در چند دهه گذشته استفاده از مواد کامپوزیت پلیمری به دلیل وزن کم، استحکام خوب، سهولت در ساخت و هزینه کم با اضافه شونده‌هایی از قبیل مواد دی‌الکتریک، مغناطیس و هادی الکتریسته به صورت منفرد یا با هم و کاربرد آن‌ها به عنوان مواد الکترومغناطیس توجه محققین بسیاری را به خود معطوف کرده است [۳]. با دستیابی پژوهشگران به مواد نانو با خصوصیات خارق العاده به ویژه سطح مؤثر بسیار زیاد و دارا بودن ترکیب منحصر به فرد از خصوصیات الکتریکی، حرارتی، مکانیکی

- 1-Hall effect
- 2-Permittivity
- 3-Permeability
- 4-Real part
- 5-Imaginary part
- 6-Dissipation factor
- 7-Bio engineering
- 8-Electromagnetic interference shielding

- 9- Mechanical exfoliation
- 10- Epitaxial growth
- 11- Chemical vapor deposition (CVD)
- 12- Functionalize structure

کرده‌اند. جدا از این که حجم اطلاعات منتشرشده کم می‌باشد، گاهی اختلافاتی نیز در آن‌ها دیده می‌شود [۲۰، ۱۷]. از طرفی دیگر با توجه به تفاوت ساختاری موجود ما بین نانو لوله کربنی و گرافن، گزارشی در ارتباط با میزان تأثیر آن در خصوصیات دی‌الکتریک نانو کامپوزیت‌های آن‌ها نشده است. در این تحقیق، گرافن به روش انبساط و احیای حرارتی تولید شد [۲۲] و نانو لوله کربنی چند دیواره با خلوص ۹۵ درصد و با مشخصات طول  $1-3 \mu\text{m}$ ، قطر خارجی  $20-10 \text{ nm}$  و قطر داخلی  $5-10 \text{ nm}$ ، خریداری شد. برای ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت از رزین اپوکسی و روش ریخته‌گری استفاده شد. سپس با توجه به این‌که گرافن و نانو لوله کربن خاصیت مغناطیسی ندارند، خصوصیات دی‌الکتریک و فاکتور اتلاف نمونه‌ها در باند X امواج الکترومغناطیس (۸ تا ۱۲GHz) اندازه‌گیری و مقایسه گردید.

## مواد و روش‌ها

### دستگاه‌ها

اسید سولفوریک، اسید نیتریک، کلرات پتاسیم، اسید هیدروکلریک، کلرید باریم و گرافیت برای سنتز گرافن از نمایندگی شرکت مرک آلمان در ایران خریداری شد. رزین اپوکسی با کد M506 و هاردنر پلی آمینی با کد HA11 از شرکت مواد مکرر خریداری گردید. مورفولوژی گرافن سنتز شده، نانو لوله کربن خریداری شده و سطح شکست نانو کامپوزیت‌های اپوکسی جهت بررسی نحوه پخش نانو لوله کربنی و گرافن در زمینه با کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی "مدل S4160 FESEM، ساخت شرکت Hitachi کشور ژاپن" و میکروسکوپ الکترونی روبشی "مدل LEICA CAMBRIDGE S360" بررسی گردید. برای اندازه‌گیری نفوذ پذیری الکتریکی از شبکه آنالیز کننده اسکالر "مدل 8757D" و سیگنال ژنراتور 26.5GHz "مدل 8363OL" استفاده شد.

و تحقیقات عملی، مدول الاستیک بالاتر از یک تراپاسکال را برای نانولوله‌ها نشان می‌دهد. هم‌چنین، افزون بر خواص مکانیکی، نانولوله‌های کربنی از خواص الکتریکی، حرارتی و مغناطیسی ویژه‌ای نیز برخوردار هستند. از سوی دیگر چگالی کم و هدایت حرارتی بالا، سبب کاربرد گسترده آن‌ها در قطعات با نسبت استحکام به وزن بالا و به‌خصوص در کامپوزیت‌های پلیمری شده است [۱۳].

در دهه گذشته مطالعاتی بر روی خواص حفاظتی و خصوصیات الکترومغناطیس نانو کامپوزیت‌های پلیمری نانولوله کربن و گرافن انجام شده است [۱۴-۲۱]. برای مثال، صالح<sup>۱</sup> و همکارانش [۱۴] مکانیزم‌های حفاظت از تداخل امواج الکترومغناطیس نانو کامپوزیت‌های پروپیلن-نانولوله کربن را بررسی کرده و ضمن گزارش مکانیزم جذب به عنوان مکانیزم غالب حفاظت، مقدار حفاظت برای مقادیر زیر ۱ درصد وزنی نانولوله کربن را کم‌تر از ۵dB گزارش کرده‌اند. آنجوکاپتا<sup>۲</sup> و همکارش [۱۶]، خصوصیات دی‌الکتریک و حفاظت از تداخل امواج الکترومغناطیس نانو کامپوزیت‌های پلی‌تری‌متیلن تری فتالات - نانولوله کربن را در باند فرکانسی  $K_{II}$  (۱۸GHz) - مورد بررسی قرار داده و برای ۰/۵ درصد نانولوله کربن، هدایت الکتریکی را برابر با  $0.04 \text{ S/cm}$ ، بخش حقیقی و موهومی نفوذپذیری الکتریکی را به ترتیب برابر با  $0.05$  و  $0.08$  در فرکانس ۱۲/۴GHz و  $0.02$  و  $0.04$  در فرکانس ۱۸GHz گزارش داده‌اند. هم‌چنین، دبلیز<sup>۳</sup> و همکارانش [۶] در تحقیقات خود گزارش کردند که برای نانو کامپوزیت‌های اپوکسی با ترکیب ۰/۱ و ۰/۵ درصد وزنی گرافن برای بازه فرکانسی ۸ تا ۱۸GHz به ترتیب به مقادیر  $3/2$  و  $5/4$  برای بخش حقیقی و  $0/1$  و  $0/7$  برای بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی رسیده‌اند و فاکتور اتلاف یا تانژانت اتلاف آن‌ها که به صورت  $D = \tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$  تعریف می‌شود به ترتیب برابر با  $0/03$  و  $1/3$  گزارش شده است. در تحقیقات فوق هر کدام از محققین در شرایط تعریف شده برای تحقیق خود مقادیری را برای خصوصیات دی‌الکتریک نانو کامپوزیت‌های نانو لوله کربنی و گرافن گزارش

1- Mohammed H. Al-Saleh

2- Anju Gupta

3- De Bellis

4- Scalar Network Analyzer (SNA)

## تولید گرافن

معمولی مانند انبردست از محل شیار شکسته شدند. در انتها سطح شکست ایجاد شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

## اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک

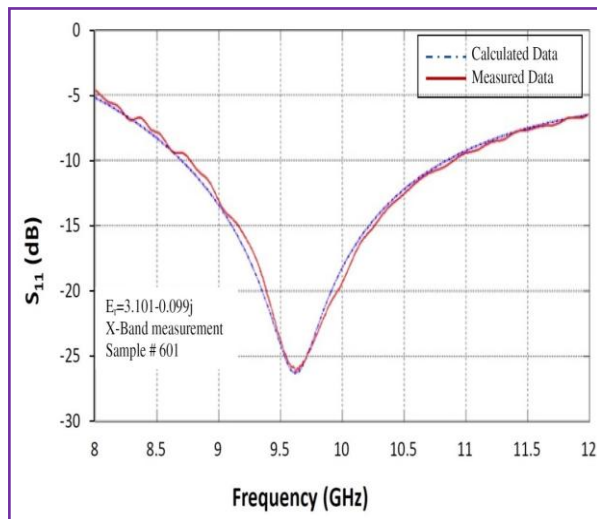
برای اندازه‌گیری خصوصیات دی‌الکتریک از الگوریتم پیشنهاد شده توسط منتصری [۲۳] استفاده شد. در این روش، نفوذ پذیری الکتریکی مختلط بر اساس روش نیکلسون، رس، ویر اما بدون نیاز به اندازه‌گیری فاز و تنها با داشتن یک نمودار که می‌تواند اندازه پارامتر تفرق<sup>۱</sup> (S۱۱ یا S۲۲) باشد، به دست می‌آید. بنابراین نمونه‌های تهیه شده با استفاده از موج بر<sup>۲</sup> باند ایکس با ابعاد ۲۲/۸mm و ۱۰/۱mm و ضخامت ۱۰mm در دستگاه شبکه آنالیز کننده اسکالر تحت تابش امواج در محدوده ۸ تا ۱۲GHz قرار گرفتند و ضرایب تفرق آن‌ها استخراج شدند. سپس با استفاده از الگوریتم مورد استفاده توسط منتصری، نفوذ پذیری الکتریکی و فاکتور اتلاف آن‌ها محاسبه گردید. نمونه‌ای از کار انجام شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

نانو صفحات گرافنی بر اساس کار قبلی [۲۲] به روش انبساط و احیای حرارتی تولید شد. در این روش، گرافیت به مخلوط اسید سولفریک غلیظ و اسید نیتریک غلیظ در حمام حاوی آب و یخ افزوده شده و به تدریج کلرات پتاسیم به این مخلوط اضافه می‌شود. سپس مخلوط به دست آمده تا زمانی که یون سولفات به وسیله محلول کلرید باریم تشخیص داده نشود با محلول اسید هیدروکلریک شسته می‌شود. پودر به دست آمده در این مرحله اکسید گرافیت بوده که خشک شده و در اتمسفر نیتروژن، شوک حرارتی داده می‌شود تا به گرافن تبدیل شود.

گرافن تولید شده دارای صفحات غیر منظم و در هم پیچیده می‌باشد. پهنای صفحات و ضخامت این گرافن به ترتیب کم‌تر از ۳μm و ۴nm است. از طرف دیگر با توجه به فاصله صفحات در گرافیت، به‌طور تقریبی می‌توان گفت که گرافن تولیدی از تعداد صفحات کم‌تر از ۱۰ لایه تشکیل شده است.

## ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت

از روش ریخته‌گری برای ساخت نمونه‌های نانوکامپوزیت تا ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله کربنی یا گرافن استفاده شد. برای انجام این کار، نانو لوله‌های کربنی یا ورقه‌های گرافن با بهره‌گیری از دستگاه التراسونیک با توان ۲۰۰W به مدت نیم ساعت در حلال استون پخش شدند. پس از آن با اضافه کردن اپوکسی، مخلوط حاصل دوباره به مدت ۸۰min در شرایط مشابه فوق هم زده شد. برای خارج سازی حلال از مخلوط، از خشک کن در دمای ۶۰°C استفاده گردید. در نهایت، هاردنر به مخلوط آماده شده اضافه شد و پس از گاز زدایی در محیط خلأ، در قالب نمونه‌ها ریخته شد. لازم به ذکر است که نمونه‌ها پس از ۷ روز و رسیدن به مرحله پخت کامل، مورد آزمایش قرار گرفتند.

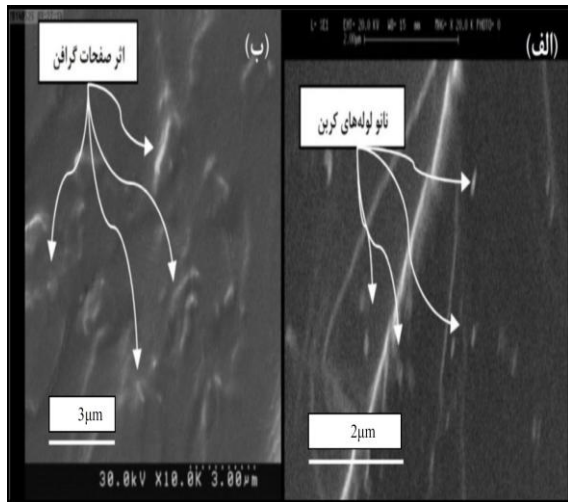


شکل ۱- نتایج اندازه‌گیری عملی و محاسبات انجام گرفته با روش منتصری برای نمونه ۰/۳ درصد وزنی نانو لوله کربنی منحنی

## بررسی پخش تقویت کننده‌ها در زمینه اپوکسی

برای بررسی نحوه پخش تقویت کننده‌ها در زمینه، ابتدا شیاری با عمق کم‌تر از ۱mm روی نمونه‌ها ایجاد شد. سپس نمونه‌ها به مدت ۳۰min درون نیتروژن مایع قرار گرفته و پس از آن خارج و بلافاصله با یک وسیله

- 1- Scattering parameters
- 2- Wave guide



شکل ۴- سطح شکست، الف) نانوکامپوزیت اپوکسی- گرافن  
ب) نانوکامپوزیت اپوکسی-گرافن

شکل ۵ نتایج به دست آمده برای بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی یا ثابت دی الکتریک، نسبت به درصد وزنی گرافن و نانو لوله کربن را نشان می دهد. همان گونه که در شکل مشخص است هر دو تقویت کننده، بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی اپوکسی خالص را افزایش داده اند که در این میان مقدار افزایش با تقویت کننده گرافن بیش تر بوده است به طوری که در ۰/۵ درصد وزنی تقویت کننده به ترتیب افزایش متوسط ۳۶ و ۱۶ درصدی برای نمونه های گرافن و نانو لوله کربنی نسبت به اپوکسی خالص به دست آمده است. با توجه به فاکتورهای ایجاد کننده خاصیت دی الکتریک در ماده از جمله پلاریزاسیون یونی، الکتریکی، جهت و فضای شارژ [۸]، می توان گفت که حضور گرافن یا نانو لوله کربنی در زمینه پلیمری باعث ایجاد سطوح داخلی ناهمگن در اثر حضور فضاهای شارژ انباشته شده و ناهمگن در سطح داخلی می شوند و این امر باعث افزایش بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی اپوکسی خالص می شود. تأثیر بیش تر گرافن به دلیل سطح مؤثر بیش تر نسبت به نانو لوله کربنی و در نتیجه ایجاد فضاهای شارژ انباشته شده و ناهمگن بیش تر در سطوح داخلی می باشد. از طرف دیگر، افزایش بیش تر بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی اپوکسی خالص با افزایش درصد وزنی تقویت کننده به ویژه در مورد گرافن، به دلیل تشکیل بیش تر سطوح داخلی ناهمگن در زمینه اپوکسی می باشد. همچنین، کاهش بخش حقیقی نفوذ

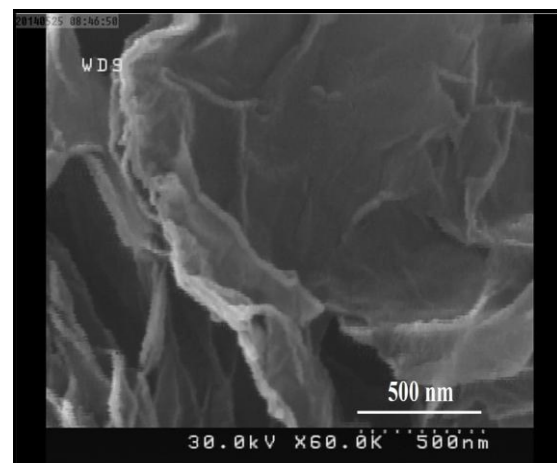
## نتایج و بحث

شکل های ۲ و ۳ به ترتیب مورفولوژی نانولوله کربن و گرافن استفاده شده در این تحقیق را نشان می دهد که نمایانگر اندازه آن ها در مقیاس نانو می باشد.

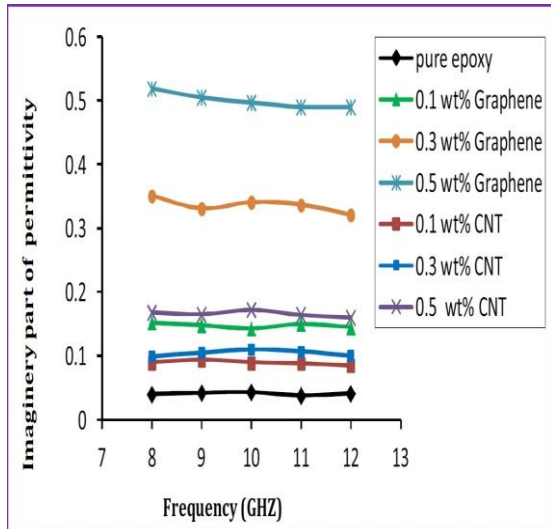
رسیدن به شرایط و خصوصیات پیش بینی شده برای نانوکامپوزیت، به پخش یکنواخت تقویت کننده در زمینه بستگی دارد. به این منظور، سطح شکست نانوکامپوزیت های ساخته شده مورد بررسی قرار گرفتند که نمونه ای از آن در شکل ۴ آمده است. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، نانو لوله های کربن و صفحات گرافن توزیع مناسبی در زمینه دارند.



شکل ۲- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانولوله های کربنی چند دیواره خریداری شده

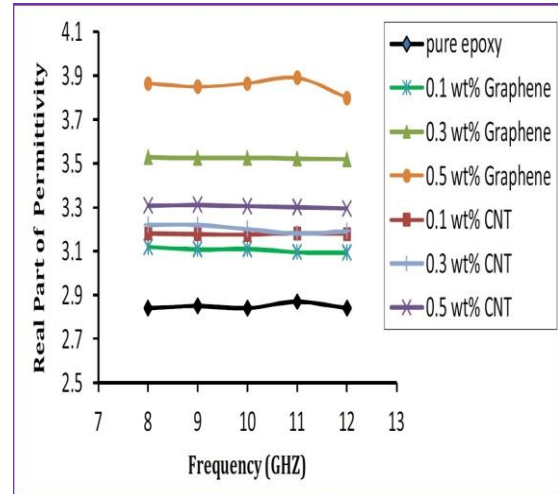


شکل ۳- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گرافن تولید شده

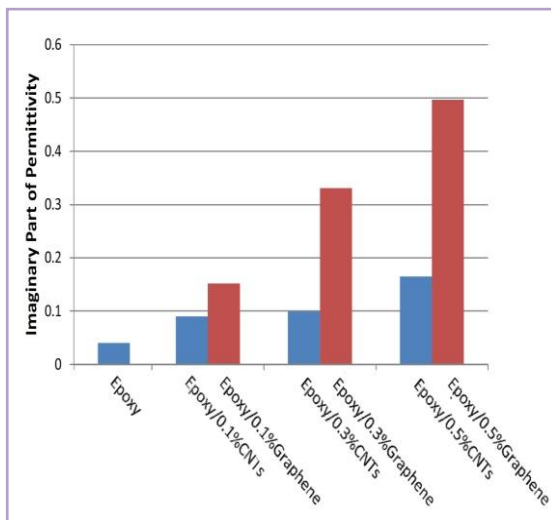


شکل ۶- مقادیر به دست آمده برای بخش موهومی نفوذ پذیری الکتریکی نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی - نانو لوله کربن و نانوکامپوزیت اپوکسی - گرافن

پذیری الکتریکی مشاهده شده با افزایش فرکانس را می‌توان به عدم تطبیق سریع جهت دوقطبی‌های موجود در سیستم در پاسخ به میدان الکتریکی نسبت داد [۸].



شکل ۵- مقادیر به دست آمده برای بخش حقیقی نفوذ پذیری الکتریکی نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی - نانو لوله کربن و نانوکامپوزیت اپوکسی - گرافن

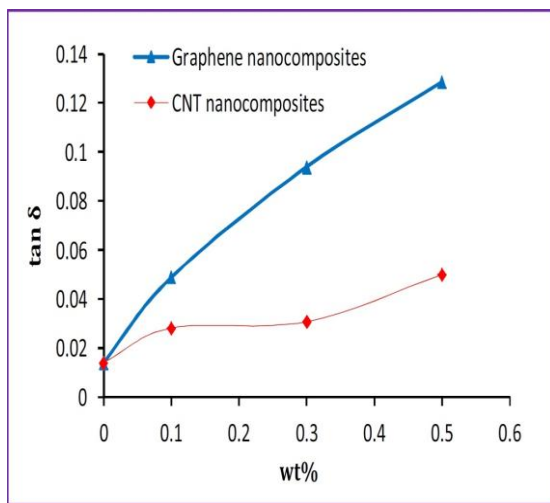


شکل ۷- مقادیر متوسط به دست آمده برای بخش موهومی نفوذ پذیری الکتریکی نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی - نانو لوله کربن و نانوکامپوزیت اپوکسی - گرافن

مقدار انرژی که ماده در زمان قرارگرفتن در میدان‌های الکترومغناطیسی هدر می‌دهد، به بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی بستگی دارد و در ارتباط با هدایت الکتریکی ماده است [۱]. مقادیر اندازه‌گیری شده برای بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی نمونه‌ها با درصد وزنی مختلف از گرافن و نانو لوله کربن در شکل ۶ آمده است. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تأثیر گرافن در افزایش بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی اپوکسی خالص به مراتب بیشتر از نانو لوله کربن می‌باشد و این اختلاف با افزایش درصد وزنی تقویت کننده بیشتر می‌شود که به خوبی در شکل ۷ دیده می‌شود. در این راستا، مقدار متوسط بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن به ۰/۵ رسیده است که ۳ برابر نمونه نانوکامپوزیت با درصد برابر نانو لوله کربن و ۱۲/۵ برابر اپوکسی خالص است.

رابطه  $\sigma_T = \omega \epsilon_0 \epsilon''$  برای محاسبه هدایت الکتریکی کلی یا مؤثر نمونه‌ها [۱۹،۶] استفاده شد که نتایج آن در شکل ۸ آمده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، مقادیر ۰/۲۲ و ۰/۳۲۵ S/m برای هدایت الکتریکی نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن به ترتیب در فرکانس‌های ۸ و ۱۲ GHz به دست آمده است. این مقادیر به طور تقریبی ۳ برابر مقادیر به دست آمده برای نمونه

گرافن برابر ۰/۱۳ و نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله کربن برابر ۰/۴۵ به دست آمده است. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای تقویت کننده گرافن و نانو لوله کربن به ترتیب با مقادیر گزارش شده در مراجع ۶ و ۱۶ مطابقت دارند. با توجه به نتایج به دست آمده، قابلیت اتلاف یا جذب امواج الکترومغناطیس در نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی گرافن به مراتب بیشتر از نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی نانو لوله کربن است و برای کاربردهای جذب امواج الکترومغناطیس از جمله سیستم‌های رادار گریز مناسب‌تر هستند.

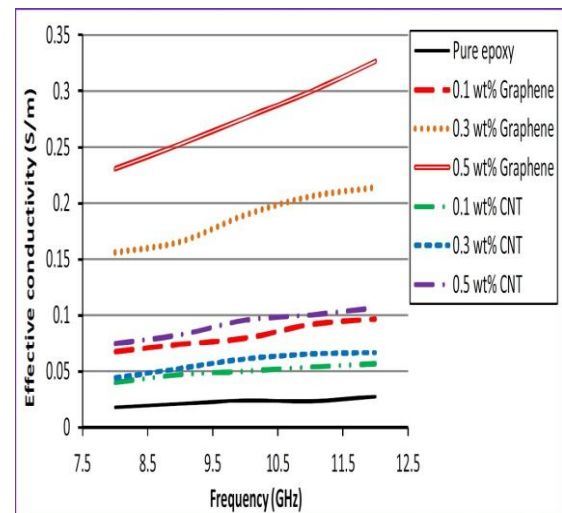


شکل ۹- فاکتور اتلاف به دست آمده برای نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی- نانو لوله کربن و نانوکامپوزیت اپوکسی-گرافن

### نتیجه‌گیری

مقادیر به دست آمده برای خصوصیات الکترومغناطیس و فاکتور اتلاف نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی گرافن به مراتب بیشتر از نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی نانو لوله کربن است که این اختلاف با افزایش درصد وزنی گرافن بیشتر می‌شود. به طوری که تفاوت در مقادیر به دست آمده برای این خصوصیات در نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی گرافن بطور متوسط ۳ برابر نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله کربن می‌باشد. با توجه به این نتایج، نانوکامپوزیت‌های اپوکسی حاوی گرافن برای کاربرد در

نانوکامپوزیت با تقویت کننده نانو لوله کربن در شرایط مشابه می‌باشد. تأثیر بیش‌تر گرافن که با افزایش درصد وزنی، بیش‌تر هم شده است را می‌توان به هدایت الکتریکی آن و همچنین به بیش‌تر بودن سطح مؤثر و شکل دو بعدی آن نسبت داد. که باعث می‌شود، صفحات گرافن در زمینه اپوکسی به هم نزدیک‌تر یا به هم متصل شوند که در نتیجه آن به ترتیب مکانیزم‌های هدایت الکتریکی شامل پرش الکترونی و حرکت الکترونی بهتر عمل کرده و هدایت الکتریکی و بخش موهومی نفوذپذیری الکتریکی در این نمونه‌ها بیش‌تر شود. از طرف دیگر بالا رفتن هدایت الکتریکی در اثر افزایش فرکانس در شکل ۸ دیده می‌شود که در واقع مربوط به این نکته است که با افزایش فرکانس، نوسانات الکترون‌ها و احتمال قرارگرفتن آن‌ها در منطقه هدایت افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج فوق و بالاتر بودن خصوصیات الکترومغناطیس نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی گرافن، می‌توان گفت که این نانوکامپوزیت‌ها برای کاربرد در محافظ‌های جلوگیری کننده از تداخل امواج الکترومغناطیس مناسب‌تر از نانوکامپوزیت‌های حاوی تقویت کننده نانو لوله کربن هستند.



شکل ۸- هدایت الکتریکی محاسبه شده برای نمونه‌های نانوکامپوزیت اپوکسی- نانو لوله کربن و نانوکامپوزیت اپوکسی-گرافن

فاکتور اتلاف نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است. فاکتور اتلاف نمونه نانوکامپوزیت با ۰/۵ درصد وزنی

محافظ‌های جلوگیری کننده از تداخل امواج الکترومغناطیس و جذب امواج الکترومغناطیس از جمله سیستم‌های رادار گریز مناسب‌تر از نانوکامپوزیت‌های حاوی تقویت کننده نانولوله کربن هستند.

### References:

- 1- L.F. Chen, C.K. Ong, C.P. Neo, V.V. Varadan, V.K. Varadan, Microwave electronics- measurement and materials characterization, p.7-8, John Wiley and Sons, England, 2004.
- 2- M. Jaroszewski, J. Ziaja, EM Shielding-Theory and development of new materials, Ch.4, p. 1-6, Research Signpost, Kerala, India, 2012.
- 3- R.W. Evans, "Design guidelines for shielding effectiveness, current carrying capability and enhancement of composite materials", Appendix A, Fourth Quarter of First Annual Report, NASA-CR-200790, 1996.
- 4- D. Galpaya, M. Wang, M. Liu, N. Motta, E. Waclawik, C. Yan, "Recent advances in fabrication and characterization of graphene-polymer nanocomposites", Graphene, Vol. 1, pp. 30-49, 2012.
- 5- K.S. Navoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films", Science, Vol. 306, pp. 666-9, 2004.
- 6- G. De Bellis, A. Tamburrano, A. Dinescu, M.L. Santarelli, M.S. Sarto, "Electromagnetic properties of composites containing graphite nanoplatelets at radio frequency", Carbon, Vol. 49, pp. 4291-4300, 2011.
- 7- H. Kim, A.A. Abdala, C.W. Macosko, "Graphene/Polymer Nanocomposites", Macromolecules, Vol. 43, pp. 6515-6530, 2010.
- 8- A.P. Singh, P. Garg, F. Alam, K. Singh, R.B. Mathur, R.P. Tandon, A. Chandra, S.K. Dhawan, "Phenolic resin-based composite sheets filled with mixtures of reduced graphene oxide,  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  and carbon fibers for excellent electromagnetic interference shielding in the X-band", Carbon, Vol. 50, pp. 3868-3875, 2012.
- 9- S.Y. Yang, W.N. Lin, Y.L. Huang, H.W. Tien, J.Y. Wang, C.C.M. Ma, S.M. Li, Y.S. Wang, "Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites", Carbon, Vol. 49, pp. 793-803, 2011.
- 10- H. Kim, A.A. Abdala, C.W. Macosko, "Graphene/Polymer Nanocomposites", Macromolecules, Vol. 43, pp. 6515-6530, 2010.
- 11- D. Galpaya, M. Wang, M. Liu, N. Motta, E. Waclawik, C. Yan, "Recent advances in fabrication and characterization of graphene-polymer nanocomposites", Graphene, Vol. 1, pp. 30-49, 2012.



- 12- M.A. Rafiee, J. Rafiee, Z. Wang, H. Song, Z.Z. Yu, N. Koratkar, "Enhanced mechanical properties of nanocomposites at low graphene content", ACS Nano, Vol. 3, No. 12, pp. 3884-3890, 2009.
- ۱۳- سید مجتبی زبرجد، محمد هادی مقیم، مقدمه‌ای بر نانوکامپوزیت‌های پلیمری، واژگان خرد، ۱۳۹۴.
- 14- MH.Al-Saleh, U.Sundararaj, "Electromagnetic interference shielding mechanisms of CNT/polymer composites", Carbon, Vol. 47, pp. 1738-1746, 2009.
- 15- AS.Hoang, "Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding characteristics of multiwalled carbon nanotube filled polyurethane composite films", Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. Vol. 2, pp. 5-12, 2011.
- 16- A. Gupta, V. Choudhary, "Electromagnetic interference shielding behavior of poly(trimethylene terephthalate)/multi-walled carbon nanotube composites", Composites Science and Technology, Vol. 71, pp. 1563-1568, 2011.
- 17- B. Li, T. Oya, "Fabrication of novel electromagnetic shielding sheets using carbon-nanotube-composite paper", J. Surf. Sci. Nanotech. Vol. 12, pp. 242-246, 2014.
- 18- A.L. De Paula, J.J. Barroso, M.C. Rezende, "Comparative study of the teflon electromagnetic parameters (permittivity and permeability) experimentally obtained and numerically simulated", Int. Microwave. Optoelectronics. Conf (IMOC). Belem, 519-522, 2009.
- 19- S.U. Din Khan, M. Arora, M.A. Wahab, P. Saini, "Permittivity and electromagnetic interference shielding investigations of activated charcoal loaded Acrylic coating compositions", Polymers, Vol. 2014, pp.1-7, 2014.
- 20- G. De Bellis, I.M. De Rosa, A. Dinescu, M.S. Sarto, "Electromagnetic absorbing nanocomposites including carbon fibers, nanotubes and graphene nanoplatelets", IEEE, Vol. 978, pp. 202-207, 2010.
- ۲۱- رحیم اقرء، کمال جانقربان، حبیب دانش منش، حبیب اله عبیری، " بررسی توانایی حفاظت از تداخل امواج الکترومغناطیس در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-گرافن" مجله مواد نوین، جلد ۵، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۴.
- 22- R. Eqra, K. Janghorban, H. Daneshmanesh, "Mechanical properties and toughening mechanism of epoxy/graphene nanocomposites", J. Polym. Eng, Vol. 35, pp. 257-266, 2015.
- ۲۳- منتصری، یاحقی، علی‌نژاد، " ارائه یک روش کاربردی و دقیق در اندازه‌گیری ثابت دی الکتریک مختلط مواد" کنفرانس مهندسی برق (ICEE 2012)، تهران، ۱۳۹۱.

