

بررسی اثر توان مایکروویو روی میزان پلیمریزاسیون در جا پلی استایرن روی نانولوله کربنی و ویژگی‌های الکتریکی نانوکامپوزیت حاصله

شهره جلالی، مجید بنی آدم، مرتضی مغربی*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده: نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی/پلی استایرن به کمک پلیمریزاسیون در جا تحت تابش امواج مایکروویو سنتز شدند. به علت اینکه نانولوله‌های کربنی جاذب مایکروویو هستند در اثر تابش مایکروویو گرم شدند و پلیمریزاسیون حرارتی خود به خودی استایرن بدون استفاده از آغازگر انجام شد. برای بررسی تاثیر امواج مایکروویو در پلیمریزاسیون، سنتز نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن به کمک حرارت دهی نیز انجام شد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی و میکروسکوپ الکترونی عبوری مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصه یابی نمونه‌ها به کمک آنالیزهای طیف سنجی فرسرخ تبدیل فوریه، گرما سنج وزنی و رامان انجام شد و رسانایی الکتریکی نمونه‌ها نیز بررسی گردید. نتیجه‌ها نشان دادند که استفاده از امواج مایکروویو می‌تواند باعث ایجاد یک لایه پلی استایرنی روی نانولوله‌ها شود و نانوکامپوزیت حاصله دارای کلوخه‌های اندکی بود. علاوه بر این، با افزایش توان مایکروویو، ضخامت لایه پلیمری ایجاد شده روی نانولوله‌ها افزایش و رسانایی الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها از ۱۴/۳۷ زیمنس بر متر برای نانوکامپوزیت سنتز شده با حرارت (صفر وات) به ۷/۱۷، ۵/۳۹ و ۲/۹۴ زیمنس بر متر به ترتیب برای نانوکامپوزیت سنتز شده با مایکروویو با قدرت ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ وات، کاهش یافت.

واژگان کلیدی: نانولوله کربنی، مایکروویو، پلیمریزاسیون، نانوکامپوزیت.

Keywords: Carbon nanotubes, Microwave, Polymerization, Nanocomposites.

مقدمه

از یک نانولوله به دیگری انجام می‌شود. برای اینکه بتوان رفتار الکتریکی کامپوزیت را کنترل نمود پیشنهاد می‌شود که فاصله نانولوله‌ها از یکدیگر تنظیم گردد و یکی از راه‌های انجام این امر، پوشش دهی نانولوله‌ها است [۱۰].

برای پوشش دهی نانولوله‌ها می‌توان از روش لایه به لایه بهره گرفت [۱۰]. اما این روش دارای مراحل زیاد، سخت و زمان بر است.

نانولوله‌های کربنی بخاطر دارا بودن ویژگی‌های منحصر بفرد، به عنوان تقویت‌کننده در نانوکامپوزیت‌های زیادی استفاده شده‌اند. در این نانوکامپوزیت‌ها، نانولوله‌ها (در نقش پرکننده) باعث بهبود رفتار مکانیکی، حرارتی و یا الکتریکی ماتریس پلیمری می‌شوند [۱-۸].

عملکرد الکتریکی یک نانوکامپوزیت به فاصله بین نانولوله‌ها وابسته است [۹]. چرا که هدایت الکتریکی از طریق پرش بار الکتریکی

*E-mail: mmaghrebi@um.ac.ir

* عهده‌دار مکاتبات

برای پراکندگی بهتر نانو لوله‌های کربنی در استایرن، مخلوط به مدت ۲ ساعت درون دستگاه اولتراسونیک قرار داده شد و بعد مخلوط نانولوله کربنی و استایرن تحت تابش امواج مایکروویو (با توان‌های ۳۰۰، ۵۰۰ و ۷۰۰) به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. در مرحله آخر، نانولوله‌های کربنی به کمک سانتریفیوژ از استایرن جدا و بعد از شستشو با استون و آب مقطر، در آن به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۶۰ درجه سلسیوس خشک شدند.

تهیه نانو کامپوزیت نانو لوله کربنی و استایرن به کمک حرارت

برای مقایسه تاثیر امواج مایکروویو در فرآیند سنتز، نانو کامپوزیت نانولوله کربنی و استایرن به کمک حرارت دهی نیز سنتز شد. برای تهیه این نانو کامپوزیت، مراحل کاملا مشابه با روش ذکر شده برای سنتز نانو کامپوزیت به کمک مایکروویو است و فقط به جای استفاده از امواج مایکروویو، مخلوط به مدت ۲۰ دقیقه در حمام روغن با دمای ۱۳۰ درجه سلسیوس قرار داده شد.

آنالیزها

برای بررسی ریخت‌شناسی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل LMU TESCAN BRNO-Mira3 و میکروسکوپ الکترونی عبوری Philips Holland CM120 استفاده گردید. برای بررسی بهتر قطر نانو لوله‌ها در تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، از نرم افزار ANIX EMICA بهره گرفته شد و با در نظر گرفتن ۷۰ نانو لوله و اندازه‌گیری قطر آن‌ها، متوسط قطر در هر نمونه به دست آمد.

مطالعه رفتار حرارتی نمونه‌ها و بررسی مقدار پلی استایرن روی نانو لوله‌های کربنی به کمک آزمون گرما سنج وزنی و توسط دستگاه TGA- Shimadzu 50 انجام شد. سرعت افزایش دما برای تمامی نمونه‌ها ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه و اتمسفر دستگاه هوا بود. به منظور بررسی گروه‌های عاملی روی سطح نانو لوله‌های کربنی از دستگاه طیف سنج فرسرخ مدل FT-IR Avator 370 Nicolet spectrometer استفاده شد. مقدار ۳ درصد وزنی از نمونه با پتاسیم برمات ترکیب شد و به صورت قرص تهیه و تحت تابش امواج فرسرخ قرار گرفت. طیف‌ها در محدوده 400Cm^{-1} تا 4000Cm^{-1} ثبت شدند. طیف رامان به کمک دستگاه Ava-Raman-PRB-785 با طول موج 532 نانومتر انجام شد.

برای بررسی رسانایی الکتریکی نمونه‌ها، قرص‌هایی با مقطع دایره‌ای شکل با قطر ۵ میلی متر و ضخامت ۳ میلی متر تهیه شد.

روش ساده‌تر برای پوشش دهی، پلیمریزاسیون در جا است. در پژوهش‌های متعددی، پوشش دهی با این روش انجام شده است [۱۶-۱۱]. به عنوان مثال، وو و همکارانش موفق شدند که نانولوله‌های کربنی را با پلی متیل متاکریلات و پلی استایرن پوشش دادند [۱۷]. در پژوهش مشابه دیگری، ساهو و همکارانش نانولوله‌های کربنی را با پلی پیرول پوشش دادند و رفتار الکتریکی کامپوزیت حاصله را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. در اکثر مطالعاتی که انجام شده است، برای شروع واکنش از آغازگر استفاده شده است. فرایند پلیمریزاسیون می‌تواند بصورت حرارتی و یا استفاده از آغازگر شیمیایی شروع گردد که در هر دو حالت، نقاطی که از آن‌ها واکنش شروع می‌شود بصورت اتفاقی از توده مخلوط هستند [۱۸، ۱۹]. بنابراین، احتمال ایجاد کلوخه‌های پلیمری افزایش می‌یابد که منجر به ایجاد فواصل متفاوتی در نانو کامپوزیت حاصله شده و کنترل ویژگی‌های الکتریکی را دشوار می‌سازد.

یک راه برای کاهش این مشکل، آغاز شدن واکنش پلیمریزاسیون از سطح نانو لوله‌ها است. در این صورت احتمال تشکیل لایه پلیمری در نزدیکی سطح نانولوله بالا می‌رود [۲۰]. پژوهش حاضر بر پایه گرم شدن انتخابی سطح نانولوله و گرم شدن مونومرهای اطراف آن و در نتیجه آغاز پلیمریزاسیون است. برای انجام این روش از مونومر غیر قطبی استایرن در کنار نانولوله و اعمال تابش مایکروویو استفاده شد تا با تابش امواج مایکروویو، استایرن گرم نشود. ولی نانولوله‌ها با جذب امواج مایکروویو، گرم شوند و نقاط داغی را در مخلوط ایجاد نمایند [۱۷، ۲۱]. با ایجاد این نقاط داغ، پلیمرهای اطراف نانولوله‌ها گرم شده و واکنش پلیمریزاسیون حرارتی خودبخودی استایرن آغاز می‌گردد. بنابراین، انتظار می‌رود که یک لایه پلیمری در اطراف نانولوله‌ها ایجاد شود. با توجه به تحقیقات گذشته، مطالعات چندانی برای کنترل ضخامت لایه پلیمری روی نانولوله این پژوهش، اثر توان تابش مایکروویو روی ضخامت لایه پلیمری و سرانجام رسانایی الکتریکی نمونه‌ها بررسی شد.

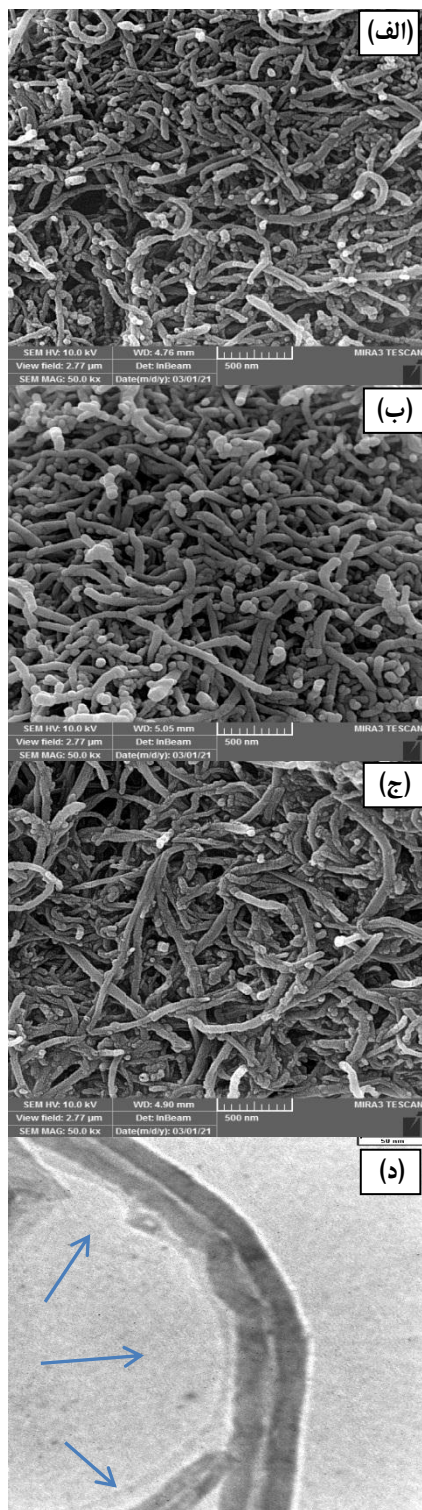
بخش تجربی

مواد اولیه

نانولوله‌های کربنی چند جداره از شرکت نوترینو تهیه و به همان صورت استفاده شدند. استایرن از شرکت سانچوان چین و استون از شرکت مرک تهیه شد.

تهیه نانو کامپوزیت نانو لوله کربنی و استایرن به کمک مایکروویو

مخلوط ۰/۰۰۱ گرم بر میلی لیتر نانو لوله کربنی در استایرن تهیه شد و به مدت ۵ دقیقه در دمای آزمایشگاه هم زده شد.



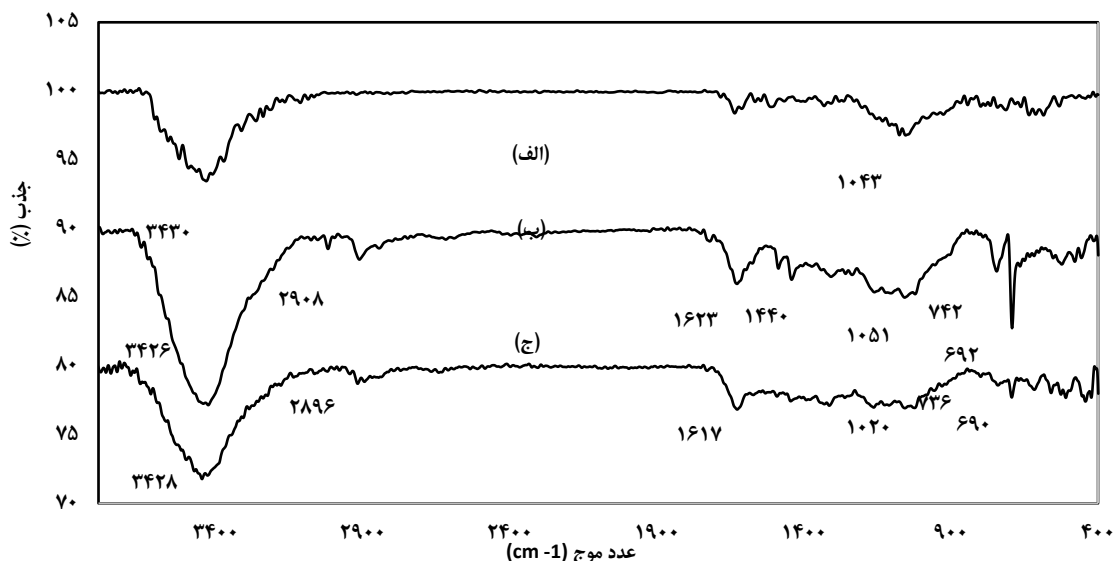
شکل ۱- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانولوله کربنی خام (الف)، نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با حرارت (ب)، نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با مایکروویو (ج) و تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با مایکروویو (د).

در دو طرف قرص‌ها میله‌های مسی قرار داده شدند و در معرض ولتاژ تولید شده توسط منبع تغذیه قرار گرفتند. سپس، ولتاژ عبوری از نمونه‌ها به کمک مولتی متر CD100 اندازه گیری شد. با توجه به قانون اهم، شیب نمودار ولتاژ بر حسب جریان الکتریکی برابر مقاومت الکتریکی است و معکوس مقاومت بیانگر رسانایی الکتریکی است. به منظور مستقل سازی رسانایی از ضخامت نمونه‌ها، رسانایی الکتریکی ویژه به صورت زیرمنس بر متر گزارش شد.

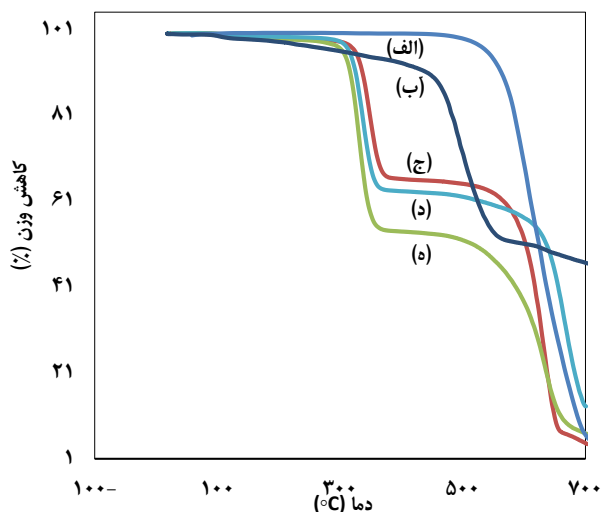
نتیجه‌ها و بحث

شکل ۱-الف، ۱-ب و ۱-ج، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نانولوله کربنی خام، نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با مایکروویو و نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با حرارت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نانولوله‌های موجود در نانوکامپوزیت سنتز شده با مایکروویو قطر بیشتری نسبت به نانولوله‌های سنتز شده با حرارت و نانولوله‌های خام دارند. متوسط قطر نانولوله‌ها در نمونه خام برابر ۴۳ نانومتر، برای نانوکامپوزیت سنتز شده با حرارت برابر ۵۷ نانومتر و برای نانوکامپوزیت سنتز شده با مایکروویو برابر ۷۳ نانومتر اندازه‌گیری شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که احتمالاً نانولوله‌های کربنی توسط پلی استایرن پوشش یافته‌اند. قطر نانولوله‌ها در نمونه‌های سنتز شده با مایکروویو در مقایسه با نمونه سنتز شده با حرارت بیشتر است که نشان دهنده تاثیر تابش امواج مایکروویو در تسریع واکنش پلیمریزاسیون است [۲۲-۲۴]. با توجه به دما و زمان واکنش یکسان در حین سنتز هر دو نانوکامپوزیت، احتمالاً در نمونه‌های سنتز شده با مایکروویو واکنش آغاز شده از سطح باعث تشکیل زنجیره پلی استایرنی روی سطح می‌شود و قطر آن‌ها را افزایش می‌دهد ولی در نمونه‌های سنتز شده با حرارت بیشتر پلیمر به صورت آزاد و کلوخه‌ای ایجاد می‌گردد. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های سنتز شده با مایکروویو کلوخه‌های چندانی مشاهده نمی‌شود. در حالی که در نمونه‌های سنتز شده با حرارت دهی، آگلومره‌هایی مشهود است. در این نمونه‌ها، گرما به تمام مخلوط داده می‌شود و نقاط داغ در تمام توده مخلوط نانولوله و پلی استایرن وجود دارد. بنابراین، شروع واکنش پلیمریزاسیون از هر نقطه‌ای در مخلوط محتمل است و احتمالاً این امر سرانجام باعث ایجاد پلی استایرن به صورت کلوخه‌ای نمونه می‌گردد.

شکل ۱-د، تصویر میکروسکوپ الکترونی کامپوزیت نانولوله کربنی/پلی استایرن سنتز شده با مایکروویو را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، یک لایه پلیمری روی نانولوله کربنی ایجاد شده است که تایید کننده نتیجه‌های حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی است. مشاهده لایه پلیمری روی سطح احتمالاً بیانگر آن است که واکنش از سطح نانولوله‌ها آغاز شده و پلیمر روی سطح نانولوله‌ها ایجاد شده است.



شکل ۲ - طیف فروسرخ نانولوله کربنی خام (الف) و نانوکامپوزیت‌های سنتز شده با مایکروویو (ب) و نانو کامپوزیت‌های سنتز شده با حرارت (ج)

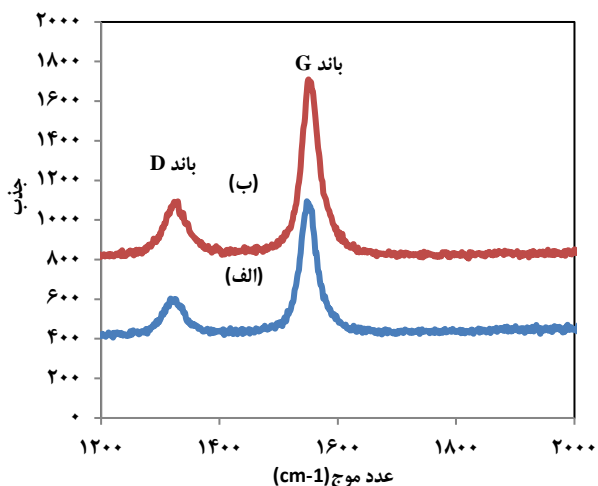


شکل ۳ - منحنی گرماسنج وزنی نانولوله کربنی خام (الف)، نانوکامپوزیت سنتز شده با حرارت (ب)، نانوکامپوزیت سنتز شده با ۳۰۰ وات مایکروویو (ج)، ۵۰۰ وات مایکروویو (د) و ۷۰۰ وات مایکروویو (ه).

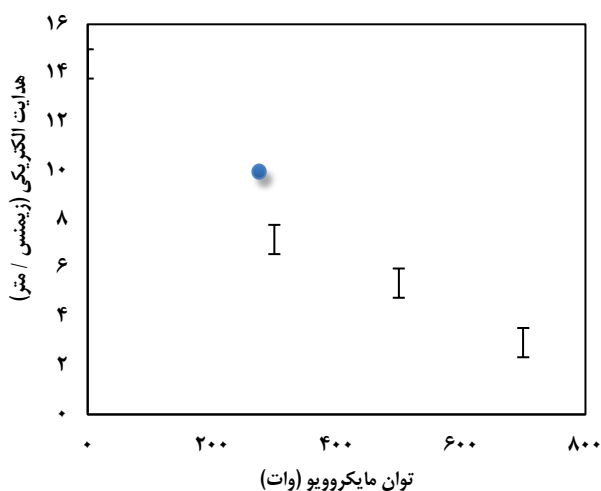
شکل ۳، منحنی گرماسنج وزنی نانولوله کربنی، نمونه سنتز شده با ۲۰ دقیقه حرارت دهی و نمونه‌های سنتز شده با ۲۰ دقیقه تابش مایکروویو در توان‌های مختلف، را نشان می‌دهد. در نمونه نانولوله کربنی خام کاهش وزن محسوسی تا ۵۵۰ درجه سلسیوس دیده نمی‌شود که به علت عاری بودن نانولوله‌ها از رطوبت و ناخالصی است. مشاهده می‌شود که در نمونه‌های سنتز شده با مایکروویو، آغاز تجزیه در حدود ۳۵۰ درجه سلسیوس است. نانولوله‌های کربنی در دمای بیش از ۵۵۰ درجه سلسیوس شروع به تجزیه می‌کنند و بنابراین افت جرم

شکل ۲، طیف فروسرخ نانولوله کربنی خام و نانوکامپوزیت‌های سنتز شده با مایکروویو و حرارت را نشان می‌دهد. طیف نانولوله کربنی مشابه سایر مقالات است [۲۵، ۲۶] و در حدود 3430 cm^{-1} یک قله مشاهده می‌گردد که به گروه‌های عاملی اکسیژن دار مانند هیدروکسیل و کربوکسیل‌ها می‌تواند مرتبط باشد. علت وجود این قله را می‌توان به فرآوری‌های اکسیداتیو انجام شده در حین اسیدشویی نانولوله‌ها جهت حذف کاتالیزور، منتسب نمود [۲۷-۲۹]. هم چنین، وجود قله در 1043 cm^{-1} ناشی از ارتعاشات کششی گروه کربوکسیل است که بیانگر وجود این گروه روی سطح نانولوله است [۲۹].

در نانوکامپوزیت‌های سنتز شده با مایکروویو و حرارت، قله‌های موجود در محدوده 3426 cm^{-1} و 3428 cm^{-1} و همچنین 1051 cm^{-1} و 1020 cm^{-1} ، در طیف مربوط به نانولوله نیز مشاهده شد و به وجود نانولوله مرتبط است. قله‌های موجود در محدوده 2908 cm^{-1} و 2896 cm^{-1} ناشی از ارتعاشات کششی گروه C-H است که احتمالاً به واسطه وجود پلی استایرن در این نانوکامپوزیت‌ها است. جذب‌های جدید در ناحیه 1623 cm^{-1} و 1440 cm^{-1} در نانوکامپوزیت سنتز شده با مایکروویو و 1623 cm^{-1} در نانوکامپوزیت سنتز شده با حرارت، به علت ارتعاشات کششی C=C و ارتعاشات کششی کربن در حلقه آروماتیک است و وجود این گروه‌ها می‌تواند بیانگر وجود پلی استایرن در نانوکامپوزیت حاصله باشد [۱۷]. هم چنین، قله‌هایی در هر دو نانوکامپوزیت که در محدوده 742 cm^{-1} و 692 cm^{-1} قابل تشخیص هستند ناشی از ارتعاشات C-H در حلقه بنزنی است که در پلی استایرن یافت می‌شود [۱۷].



شکل ۴ - طیف رامان برای نانولوله کربنی خام (الف) و نانوکامپوزیت نانولوله کربنی- پلی استایرن سنتز شده با میکروویو (ب).



شکل ۵- هدایت الکتریکی نمونه‌ها را بر حسب توان میکروویو.

از آنالیزها، نشان داد که یک لایه پلیمری روی نانولوله ایجاد شده است و هم چنین ساختار نمونه‌های سنتز شده با میکروویو کلوخه‌ای نبود. علاوه بر این، مشاهده شد که با افزایش توان تابش میکروویو، ضخامت لایه پلی استایرنی افزایش می‌یابد که سرانجام باعث کاهش رسانایی نمونه می‌گردد. با مقایسه نمونه‌های سنتز شده با حرارت و نمونه‌های سنتز شده با میکروویو، ساختار کلوخه‌ای و آگلومره‌های پلیمری بیشتری دیده شد که تایید کننده تاثیر مطلوب میکروویو در پیشبرد واکنش پلیمریزاسیون است.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۶

در پایین‌تر از این دما احتمالاً به خاطر وجود پلی استایرن است که در دمای ۳۸۰ تا ۴۳۰ درجه سلسیوس تجزیه می‌شود [۳۰]. افت جرمی نمونه‌ها با افزایش توان میکروویو، افزایش می‌یابد که به علت افزایش محتوای پلی استایرن در نمونه‌ها است. در نمونه حرارتی (شکل ۳-ب)، افت جرم نسبت به نمونه‌های سنتز شده با میکروویو با تاخیر اتفاق افتاده است که می‌تواند بخاطر ساختار کلوخه‌ای پلی استایرن در این نانوکامپوزیت و دیرتر سوختن توده‌های پلیمری در این نانوکامپوزیت باشد.

شکل ۴، طیف رامان را برای نانولوله کربنی خام و نانوکامپوزیت نانولوله کربنی- پلی استایرن سنتز شده با میکروویو نشان می‌دهد. دو قله برای نمونه قابل مشاهده است که یک قله در 1530 cm^{-1} و دیگری در محدوده 1310 cm^{-1} قرار دارد و به ترتیب به باند G و باند D مربوط هستند. افزایش شدت باند D در نانوکامپوزیت، می‌تواند بیانگر پیوند کووالانت پلی استایرن روی سطح نانولوله باشد [۳۰]. نسبت شدت باند D به باند G در این نمونه از 0.544 به 0.632 افزایش یافته است که می‌تواند به معنای تبدیل شدن بخشی از کربن های sp^2 به sp^3 باشد. با توجه به اینکه نانولوله‌ها در محیط پلیمریزاسیون رادیکالی قرار داشتند، بخشی از رادیکال‌ها می‌توانند توسط کربن sp^2 جذب شده و آن‌ها را تبدیل به کربن sp^3 کنند و زنجیره پلیمری به نانولوله کربنی گرافت شود.

شکل ۵، نمودار هدایت الکتریکی نمونه‌ها را بر حسب توان میکروویو نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش توان تابش میکروویو از حالت حرارتی (۰ وات) تا ۷۰۰ وات، رسانایی الکتریکی کاهش می‌یابد که احتمالاً به علت افزایش پلی استایرن در نمونه است. پلی استایرن، پلیمری عایق است [۳۱] و نمی‌تواند در انتقال بار در نانوکامپوزیت مشارکت نماید. وقتی ضخامت لایه پلی استایرنی روی نانولوله‌ها بیشتر می‌شود، فاصله نانولوله‌ها که نقش پرکننده رسانا را در ماتریس پلیمری دارند [۹]، از یکدیگر زیادتر می‌گردد که این امر پرش بار را در نانوکامپوزیت دشوارتر نموده و باعث کاهش رسانایی می‌شود. بصورت مشابه، با مقایسه نمونه سنتز شده با حرارت با نمونه‌های سنتز شده با میکروویو، می‌توان دریافت که احتمالاً در نمونه حرارتی پلی استایرن کمتری روی سطح موجود است و بنابراین رسانایی آن بالاتر است.

نتیجه‌گیری

به‌طور خلاصه، نانوکامپوزیت‌های نانولوله کربنی/ پلی استایرن توسط پلیمریزاسیون در جا به کمک میکروویو سنتز شدند. نتیجه‌های حاصله

مراجع

- [1] Kamran Behdinin, R.M.-D., Babak Safaei, Zhaoye Qin, Fulei Chu, David Hui [Graphene and CNT Impact on Heat Transfer Response of Nanocomposite Cylinders](#). *Nanotechnology reviews*, **9(1)**: 9107-9115 (2020)
- [2] Hamdy M.Zidan, E.M.A., Amr M.Abdelghany, Ahmed E.Tarabiah, [Characterization and Some Physical Studies of PVA/PVP Filled with MWCNTs](#). *Journal of materials research and technology*,. **8(1)**: 904-913 (2019)
- [3] Naser Eltahir Eltayeba, A.K., [Design and Preparation of a New and Novel Nanocomposite with CNTs and Its Sensor Applications](#). *Journal of materials research and technology*,. **8(2)**: 2238-2246 (2019)
- [4] Itziar O., Nora A., Maider I., Julen I., Gonzalo G-E., [The Effect of the Preparation Method and the Dispersion and Aspect Ratio of CNTs on the Mechanical and Electrical Properties of Bio-Based Polyamide-4,10/CNT Nanocomposites](#). *Polymers*, **11(12)**: 2059 (2019)
- [5] M.K.Hassanzadeh-Aghdam, M.J.M., J.Jamali, R.Ansari, [A New Micromechanical Method for the Analysis of Thermal Conductivities of Unidirectional Fiber/CNT-Reinforced Polymer Hybrid Nanocomposites](#). *Composites part B*, **175**: 107137 (2019)
- [6] Yasser Zare, K.Y.R., [Development of a Conventional Model to Predict the Electrical Conductivity of Polymer/Carbon Nanotubes Nanocomposites by Interphase, Waviness and Contact Effects](#). *Composites part A: Applied science and manufacturing*,. **100**: 305-312 (2017)
- [7] Tomo Takeda, Y.S., Yu Kuronuma, Fumio Narita, [Modeling and Characterization of the Electrical Conductivity of Carbon Nanotube-Based Polymer Composites](#). *Polymer*,. **52(17)**: 3852-3856. (2011)
- [8] M.Mohiuddin, S.V.H., [Estimation of Contact Resistance and Its Effect on Electrical Conductivity of CNT/PEEK Composites](#). *Composites science and technology*, **79**: 42-48 (2013)
- [9] C Gau, C.-Y.K., H S Ko, [Electron Tunneling in Carbon Nanotube Composites](#). *Nanotechnology*, 20 (2009)..
- [10] Rivadulla, F., C.M.-M., Correa-Duarte, M. A., [Layer-by-Layer Polymer Coating of Carbon Nanotubes: Tuning of Electrical in Random Networks](#). *Journal of American society*,. **132**: 3751-3755 (2010)
- [11] R.B.Rakhi, K.S., S.Ramaprabhu, [Electron Field Emission Properties of Conducting Polymer Coated Multiwalled Carbon Nanotubes](#). *applied surface science*,. **254(21)**: 6770-6774 (2008)
- [12] Nanda Gopal Sahoo, Y.C.J., Hyang Hwa So, Jae Whan Cho, [Polypyrrole Coated Carbon Nanotubes: Synthesis, Characterization and Enhanced Electrical Properties](#). *Synthetic Metals*, **157(8-9)**: 374-379 (2007)
- [13] Sarah Cohen, E.Z., Ran Yosef Suckeveriene, [Ultrasonically Induced Polymerization and Polymer Grafting in the Presence of Carbonaceous Nanoparticles](#). *Processes*, **8(12)**: 1680 (2020)

- [14] Zuzan aMorávková, M., ElenaTomšik, Juraj Čechvala, Jaroslav Stejskal, [Enhanced Thermal Stability of Multi-Walled Carbon Nanotubes After Coating with Polyaniline Salt](#). *Polymer degradation and stability*, **97(8)**: 1405-1414 (2012)
- [15] Lifang He, F.M., Minqiang Li, Jinhuai Liu, [Gas Sensors for Ammonia Detection Based on Polyaniline-Coated Multi-Wall Carbon Nanotubes](#). *Materials science and engineering*, **163(2)**: 76-81 (2009)
- [16] Elena N.Konyushenko, J.S., MiroslavaTrchová. Jiří Hradil, Jana Kovářová, Jan Prokeš, Miroslav Cieslar, Jeong-Yuan Hwang, Kuei-Hsien Chen, Irina Sapurina, [Multi-Wall Carbon Nanotubes Coated with Polyaniline](#). *Polymer*, **47(16)**: 5715-5723 (2006)
- [17] Hui-Xia Wu, X.-Q.Q., Wei-Man Cao, Yang-Hui Lin, Rui-Fang Cai ,Shi-Xiong Qian [Polymer-Wrapped Multiwalled Carbon Nanotubes Synthesized Via Microwave-Assisted in Situ Emulsion Polymerization and Their Optical Limiting Properties](#). *Carbon*, **45(15)**: 2866–2872 (2007)
- [18] Archana S. Patole, S.P.P., Ji-Beom Yoo, Jeong-Ho An, Tae-Ho Kim, [Fabrication of Polystyrene/Multiwalled Carbon Nanotube Composite Film Synthesized by in Situ Microemulsion Polymerization](#). *Polymer engineering and science*, 1327-1336 (2013)
- [19] Nilesh K.Shrivastava, B.B.K., [Development of Electrical Conductivity with Minimum Possible Percolation Threshold in Multi-Wall Carbon Nanotube/Polystyrene Composites](#). *Carbon*, **49(13)**: 4571-4579 (2011)
- [20] Georgios Sakellariou, D.P., [Durairaj Baskaran, Surface-Initiated Polymerization from Carbon Nanotubes: Strategies and Perspectives](#). *Chemical society reviews*, **42**: 677-704 (2013)
- [21] Keith R.Paton, A.H.W., [Efficient Microwave Energy Absorption by Carbon Nanotubes](#). *Carbon*, **46(14)**: 1935-1941 (2008)
- [22] K. Kempe, C.R.B., U. Schubert, [Microwave-Assisted Polymerizations: Recent Status and Future Perspectives](#). *Macromolecules*, **44(15)**: 5825-5842 (2011)
- [23] Tina Erdmenger, R.B., Hoogenboom Richard, Ulrich S. Schubert, [Simplifying the Free-Radical Polymerization of Styrene: Microwave-Assisted High-Temperature Auto Polymerizations](#). *Australian journal of chemistry*, **62**: 58-63 (2009)
- [24] Heiner Stange, A.G., [Microwave-Assisted Free Radical Polymerizations and Copolymerizations of Styrene and Methyl Methacrylate](#). *Marcromolecular rapid communication*, **28(4)**: 504-508 (2007)
- [25] Jong-Hwan Jeon, J.-H.L., Kyung-Min Kim, [Fabrication of Hybrid Nanocomposites with Polystyrene and Multiwalled Carbon Nanotubes Well-Defined Polystyrene Via Multiple Atom Transfer Radical Polymerization](#). *Polymer*, **50(19)**: 4488-4495 (2009)
- [26] Alejandro De Falco, M.L.F., Melisa E. Lamanna, Maria A. Corcuera, Inaki Mondragon, Gerardo H. Rubiola, Norma B. Daccorso, Silvia Goyanes, [Thermal Treatment of the Carbon Nanotubes and Their Functionalization with Styrene](#). *Physica*, **404(18)**: 2780-2783 (2009)

- [27] Bassandulam Tserengombo, H.J., Erdenechimeg Dolgor, Antonio Delgado, Sedong Kim, [Effects of Functionalization in Different Conditions and Ballmilling on the Dispersion and Thermal and Electrical Conductivity of MWCNTs in Aqueous Solution](#). *Nanomaterials*, **11(5)**: 1323 (2021)
- [28] Ting Zhang, M.T., Ying Yao, Ying Ma, Yuepu Pu [MWCNT Interactions with Protein: Surface-Induced Changes in Protein Adsorption and the Impact of Protein Corona on Cellular Uptake and Cytotoxicity](#). *International Journal of Nanomedicine*,. **14**: 993-1009 (2019)
- [29] Goutam Hatui, P.B., Sumanta Sahoo, Saptarshi Dhibar, Chapal Kumar Das, [Combined Effect of Expanded Graphite and Multiwall Carbon Nanotubes on the Thermo Mechanical, Morphological as Well as Electrical Conductivity of in Situ Bulk Polymerized Polystyrene Composites](#). *Composites: Part A*,. **56**: 181-191 (2014)
- [30] Rajesh Kumar Srivastava, V.S.M.V., You Zeng, Robert Vajtai, Satish Nagarajaiah, Pulickel M. Ajayan, Anchal Srivastana, [The Strain Sensing and Thermal-Mechanical Behavior of Flexible Multi-Walled Carbon Nanotube/Polystyrene Composite Films](#). *Carbon*, **49(12)**: 3928-3936 (2011)
- [31] Lynwood, C., [Polystyrene: Synthesis, Characteristics and Applications](#). Nova Publishers. (2014)