



## تولید عایق‌های امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی کارآمد بر پایه نانولوله‌های کربنی با روش پخش و جداسازی الکترومکانیکی

ایوب کریم‌زاد قویدل<sup>1\*</sup>، محمد زادشکویان<sup>2</sup>، غلامرضا کیانی<sup>3</sup>

1- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

3- دانشیار، شیمی آلی و بیوشیمی، دانشگاه تبریز، تبریز

\* تهران، صندوق پستی 14357-61137، a-karimzad@tvu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله:

این پژوهش در تلاش است تا با بکارگیری روش نوین الکترومکانیکی برای پخش و جداسازی نانولوله‌ها، عایق جاذب الکترومغناطیسی باند X با راندمان بالا و مقرون به صرفه تولید نماید. برای این منظور، نخست نانوکامپوزیت‌هایی با زمینه پلی‌متیل‌متاکریلات با درصدهای بین 0 تا 2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی با دو روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک تولید شد. ساختار نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی و طیف‌نگاری رامان مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین مقاومت الکتریکی نمونه‌ها برای تعیین غلظت آستانه رسانایی اندازه‌گیری شد. در گام نهایی ارزیابی‌ها، رفتار الکترومغناطیسی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند آستانه رسانایی در روش الکترومکانیکی در غلظت وزنی 0.2٪ رخ داده است، در حالی که برای روش التراسونیک این رویداد در غلظت 1٪ مشاهده شد. بر اساس مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان، توانایی جداسازی الکترومکانیکی در حفاظت از ساختار و طول نانولوله‌ها، عامل اصلی کاهش 80 درصدی غلظت آستانه رسانش تشخیص داده شد. بررسی خصوصیات الکترومغناطیسی نمونه‌ها در آستانه رسانایی نشان می‌دهد که روش الکترومکانیکی علی‌رغم داشتن غلظتی معادل 20٪ روش پروب التراسونیک، عایق‌سازی موثر الکترومغناطیسی 38 dB را ارائه می‌دهد که در مقایسه با روش التراسونیک 16٪ بیشتر است. البته مزیت روش الکترومکانیکی در مقایسه با سایر روش‌ها، حاکی از امکان تقلیل 25 برابری غلظت و هم‌زمان افزایش میزان جذب از 25 به 36 dB است.

دریافت: 1400/11/18

پذیرش: 1401/01/10

### کلیدواژگان

عایق امواج الکترومغناطیسی، نانولوله‌های کربنی، نسبت وجهی، پخش و جداسازی الکترومکانیکی، التراسونیک

## Fabrication of carbon nanotubes-based efficient electromagnetic wave shield nanocomposites using electro-mechanical dispersion technique

Ayub Karimzad Ghavidel<sup>1\*</sup>, Mohammad Zadshakoyan<sup>2</sup>, Gholamreza Kiani<sup>3</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University, Tehran, Iran.

2- Department of Manufacturing and Production, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Department of Organic and Biochemistry, University of Tabriz, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 14357-61137, Tehran, Iran, a-karimzad@tvu.ac.ir

### Keywords

Electromagnetic waves shields, Carbon nanotubes, Aspect ratio, Electro-Mechanically Dispersion Technique (EMDT), Ultrasonic

### Abstract

This research is trying to fabricate an efficient and economical EMIS X-band using Electro-Mechanical Dispersion Technique (EMDT). For this purpose, first, poly-methyl-methacrylate (PMMA)-based nanocomposites were produced with the different weight percentages between 0 to 2%, by two EMDT and ultrasonic probe methods. The structure of samples was evaluated by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The electrical resistivity of samples was also measured to determine percolation threshold. At the final assessments, electromagnetic behavior of the samples was examined. The results show percolation threshold was occurred at the concentration of 0.2 wt.% in EMDT, while this event was observed at the concentration of 1 wt.% for ultrasonic method. According to the microscopic study and the results of Raman spectroscopy, the ability of EMDT in protecting the structure and length of CNTs was detected as the main factor to decrease 80% in percolation threshold concentration. The investigation of electromagnetic properties of samples at percolation threshold show that EMDT method, despite having a concentration equal to 20% of the ultrasonic probe method, offers effective EMIS of 38 dB, which is 16% higher than the ultrasonic probe method. However, the advantage of EMDT compared to earlier presented methods relates to reduce 25 times the concentration and simultaneously increasing the absorption from 25 to 36 dB.

Please cite this article using:

Karimzad Ghavidel, A., Zadshakoyan, M., Kiani, G., "Fabrication of Carbon Nanotubes-Based Efficient Electromagnetic Waves Shields Nanocomposites Using Electro-Mechanically Dispersion Technique", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 3, pp. 1737-1744, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.548352.1770>

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

## 1- مقدمه

پدیده خستگی مکانیکی چرخه بالا خواهد بود [24]. مزیت برجسته این روش در مقایسه با سایر روش‌های مرسوم پخش و جداسازی، عدم آسیب به ساختار اولیه نانولوله‌ها و نیز جلوگیری از شکست طول آن‌هاست [24].

این پژوهش در تلاش است با حفاظت از ساختار اولیه نانولوله‌های کربنی، برای نخستین بار با به‌کارگیری روش نوین الکترومکانیکی در پخش و جداسازی، عایق‌های الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی با راندمان بالا و مقرون به صرفه تولید نماید. در این راستا نخست نمونه‌هایی از نانوکامپوزیت PMMA/CNTs در درصد‌های مختلف وزنی، با دو روش نوین الکترومکانیکی و مرسوم پروب التراسونیک تهیه خواهند شد. سپس ارزیابی‌های لازم جهت تعیین آستانه رسانایی و عایق‌سازی الکترومغناطیسی نمونه‌ها انجام و تأثیر فرایند الکترومکانیکی و حفاظت از ساختار اولیه نانولوله‌ها بر این خصوصیات تعیین خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود، در صورت موفقیت پژوهش حاضر، امکان تولید عایق‌های جاذب الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی با غلظت‌های بسیار ناچیز نانولوله‌های کربنی فراهم شده و بدین‌وسیله قیمت تمام شده این عایق‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای تقلیل یابد.

## 2- مواد و روش‌ها

در این پژوهش نانولوله‌های چند دیواره کربنی (MWCNTs) تولیدی شرکت نانوسیل بلژیک با کد مشخصه NC7000 مورد استفاده قرار گرفت. میانگین طول این نانولوله‌ها  $1.5 \mu\text{m}$ ، میانگین قطر آن‌ها  $9.5 \text{ nm}$  و درجه خلوص آن‌ها در حدود 90٪ گزارش شده است [26, 27]. همچنین کلروفورم تولیدی شرکت دکتر مجلی با کد شناسه DR66-67-3 با خلوص 98٪ برای تهیه نمونه‌ها استفاده شد. علت انتخاب کلروفورم، ضریب دی‌الکتریک فوق‌العاده بالای آن است و در فرایند الکترومکانیکی کمک می‌کند تا میدان الکتریکی اعمال شده به سمت میدان الکترواستاتیکی تمایل داشته باشد و از مصرف بیش از حد جریان جلوگیری شود [24]. از PMMA ساخت شرکت Tiwan-CHIMEI به عنوان ماتریس زمینه استفاده شد.

نمونه‌های نانوکامپوزیتی با دو روش متفاوت پخش و جداسازی الکترومکانیکی و پروب التراسونیک تولید گردیدند که در هر دو روش روندی کاملاً مشابه دنبال شد و تنها روش پخش و جداسازی متفاوت در نظر گرفته شد. در هر دو روش، میزان انرژی خالص مصرفی برای عملیات پخش و جداسازی دقیقاً برابر و معادل  $760 \text{ J}$  در نظر گرفته شد. برای ایجاد این مقدار از انرژی، در روش الکترومکانیکی، شدت میدان الکتریکی  $0.14 \text{ V}/\mu\text{m}$  و زمان‌های روشنی و خاموشی هر دو  $25 \mu\text{s}$  و نیز در روش پروب التراسونیک حالت پالسی توان برابر با  $50 \text{ W}$  و زمان‌های روشنی و خاموشی 5 ثانیه تنظیم گردید [24]. برای تهیه نانوکامپوزیت‌ها، نخست گرانول‌های PMMA درون کلروفورم در دمای محیط به کمک همزن مغناطیسی حل گردید. سپس  $0.0003 \text{ g}$  از نانولوله‌های کربنی در  $1.76 \text{ mL}$  از محلول کلروفورم با روش‌های الکترومکانیکی و یا پروب التراسونیک پخش گردید. سپس با افزودن مقداری معلوم از محلول PMMA در کلروفورم به مخلوط‌های نانولوله‌های پخش شده در زمینه کلروفورم، نانوکامپوزیت‌های PMMA/CNTs به شکل محلول با درصد‌های وزنی متفاوت حاصل شد. مقدار افزودن محلول PMMA به نحوی انتخاب شد تا نانوکامپوزیت با درصد‌های وزنی 0 تا 2٪ با نسبت تغییرات 0.1٪ تولید شود. سپس بلافاصله پس از عمل اختلاط، ترکیبات به دست آمده با همزن مغناطیسی هم زده شد و فوراً جهت جلوگیری از تشکیل کلوخه‌ها و بندل‌های ثانویه با روش انعقادی به صورت الیاف نانوکامپوزیتی در محیط الکل

تداخل امواج الکترومغناطیسی در مواردی که دو وسیله الکترونیکی در عملکرد یکدیگر تداخل ایجاد کرده و یا موجب آسیب‌هایی به تجهیزات می‌شوند، اهمیت پیدا می‌کند [1, 2]. بر این اساس، تداخل امواج الکترومغناطیسی با توجه به رشد سریع تجهیزات الکترونیکی مانند گوشی‌های همراه، لپ‌تاپ‌ها، رادارهای هواشناسی و نظامی، فرستنده‌های مخابراتی و تلویزیونی به یک چالش مهم فنی مبدل شده است. در این راستا، برای کاهش اثر امواج، مراجع ذیصلاح نظیر CISRP<sup>1</sup> مقرراتی را وضع نموده است که بر مبنای آن‌ها نباید امواج دستگاه‌های الکترونیکی و الکتریکی، خللی در عملکرد خود و یا تجهیزات هم‌جوار ایجاد کند [3]. با در نظر گرفتن این قانون، عایق‌سازی الکترومغناطیسی تجهیزات حداقل باید  $30 \text{ dB}$  و یا به عبارتی 99.9٪ باشد و تنها 0.1٪ از امواج را از خود عبور دهند [4]. عایق‌سازی به مجموع امواج بازتاب یافته و جذب شده اطلاق می‌شود [5].

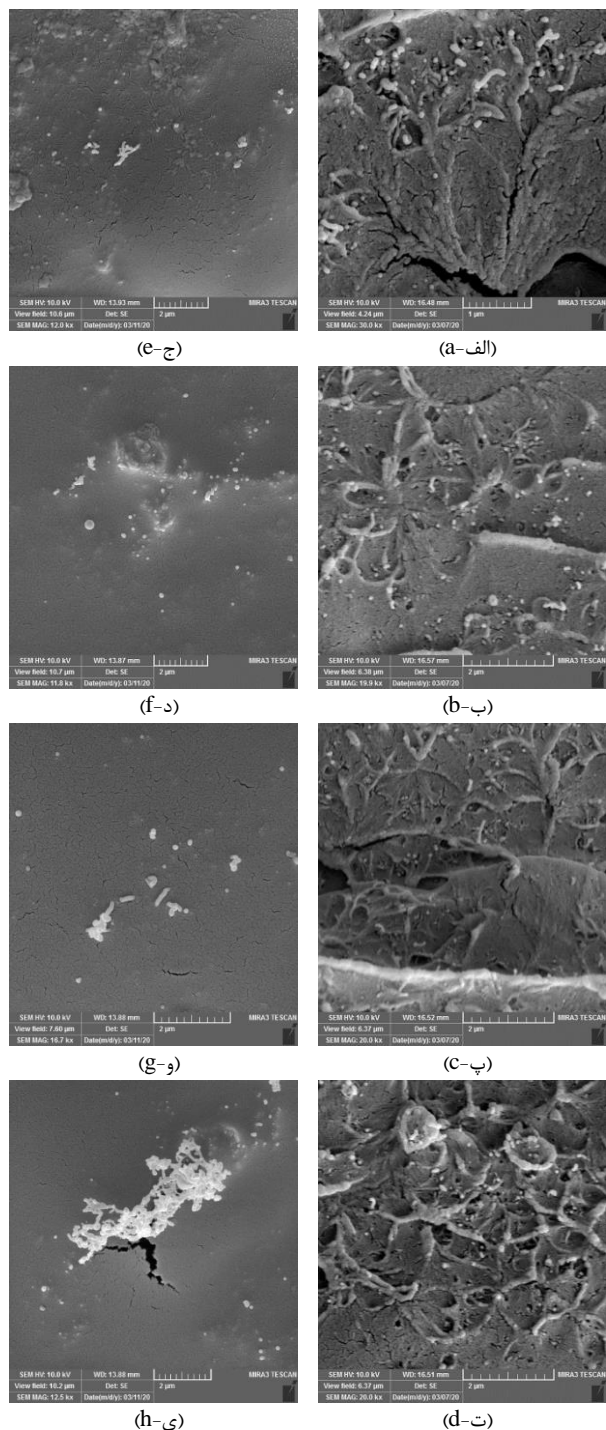
اخیراً، الزامات مذکور سبب شده است تا نانوکامپوزیت‌های پایه پلیمری به دلایلی مانند سبکی وزن، استحکام مطلوب مکانیکی، حرارتی و سایشی در این عرصه مورد توجه قرار گیرند [6-8]. در این میان نانولوله‌های کربنی، به عنوان پرکننده، به دلیل خصوصیات ویژه آن‌ها، توجه‌های فراوانی را به خود جلب کرده‌اند [9, 10]. شاید مهم‌ترین برجستگی ویژه نانولوله‌های کربنی در مقایسه با سایر نانوذرات مشابه را بتوان به نسبت وجهی بسیار بالای آن‌ها نسبت داد [11-14]. نانولوله‌های کربنی به دلیل نیروی واندروالسی قوی که در سطح آن‌ها وجود دارد، تشکیل بندل‌ها و کلوخه‌هایی را می‌دهند [15, 16] که برای بهره‌مندی از ویژگی‌های آن‌ها باید پخش و جداسازی گردند [15, 17]. توجه به ایرادات ساختاری، نسبت وجهی، پخش و جداسازی از کلوخه‌ها، توزیع و راستاگیری و درصد حجمی حضور نانولوله‌ها فاکتورهای مهمی هستند که تأثیر بسیار فزاینده‌ای بر راندمان عایق‌سازی الکترومغناطیسی نانوکامپوزیت‌های تهیه شده از این الیاف می‌گذارند [18].

در منابع علمی گزارش‌های متعددی وجود دارند که در آن‌ها به اهمیت حفاظت از طول و ساختار اولیه نانولوله‌ها در هنگام تولید نانوکامپوزیت‌ها، جهت افزایش جذب و بازتاب امواج الکترومغناطیسی اشاره شده است [19, 20]. روش‌های رایج پخش و جداسازی نانولوله‌ها نظیر استفاده از امواج التراسونیک و یا روش‌های اختلاط ذوبی-مکانیکی، علی‌رغم تمام مزایا، به دلیل اعمال تنش‌های برشی بسیار بالا سبب می‌گردند تا ایرادات ساختاری نانولوله‌ها افزایش یابد و مهم‌تر از آن با شکست طول نانولوله‌ها، برجسته‌ترین ویژگی آن‌ها یعنی نسبت وجهی را به شدت کاهش می‌دهد [21-23]. بنابراین، برای بهبود عملکرد عایق‌سازی نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی در مقابل امواج الکترومغناطیسی، لازم است که روش‌های نوینی برای پخش و جدایش آن‌ها ابداع گردد.

اخیراً روشی الکترومکانیکی<sup>2</sup> برای پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی ارائه شده است که در آن کلوخه‌ها و بندل‌ها در یک محیط سیال تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی متغیرالجهت قرار می‌گیرند [24]. راستاگیری اجباری و چرخش به سوی امتداد میدان بندل‌ها و کلوخه‌ها تحت اثر نیروی دی‌الکتروفورسیس سبب می‌گردد تا تنش‌های هیدرودینامیکی کوچکی از جانب سیال به پیکره آن‌ها اعمال شود [24, 25]. اگر جهت این تنش‌ها به واسطه تغییر جهت میدان الکتریکی به طور متناوب تغییر یابد، نتیجه آن غلبه بر نیروی واندروالسی بین نانولوله‌ها و باز شدن درهم‌تنیدگی آن‌ها در سایه

2 Electro-mechanically Dispersion Technique

1 Comite' International Special des Perturbations Radioelectriques



**Fig. 1** FE-SEM micrographs of the nanocomposite samples, prepared by EMDT and Ultrasonic probe. Figures (a) to (d) and (e) to (h) relates to the samples produced by EMDT and ultrasonic probes, respectively. Concentration of CNTs in figures are: (a) and (e) 0.2, (b) and (f) 0.4, (c) and (g) 0.6, (d) and (h) 1% wt.%.

شکل 1 میکروگراف‌های FE-SEM نمونه‌های نانوکامپوزیتی تهیه شده به روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک. تصاویر (الف) تا (ت) و (ج) تا (ی) به ترتیب مربوط به نمونه‌های تولید شده به روش الکترومکانیکی و پروب التراسونیک می‌باشند. غلظت نانولوله‌های کربنی در تصاویر (الف) و (ج) 0.2، (ب) و (د) 0.4، (پ) و (و) 0.6 و (ت) و (ی) 1٪ وزنی است.

اتیلیک 99.6٪ منعقد شده [28, 29] و پس از شستشو و خشک کردن در دمای °C 60 آماده قالب‌گیری شد. لازم به توضیح است روند تولید الیاف نانوکامپوزیتی برای هر یک از درصدهای وزنی چندین مرتبه تکرار شد، تا الیاف نانوکامپوزیتی به مقدار 1 g از هر درصد وزنی برای قالب‌گیری تهیه شود. فرایند قالب‌گیری فشاری نمونه‌ها توسط قالبی با حفره‌هایی به ابعاد 1×30×10 mm در دمای °C 200 و فشار 50 bar به مدت یک ساعت انجام شد. پس از قالب‌گیری، عملیات خنک‌کاری با حفظ فشار قالب‌گیری تا رسیدن به دمای محیط با تزریق آب به سیستم خنک‌کاری ادامه یافت.

بررسی مورفولوژی و ساختار نانوکامپوزیتی نمونه‌ها نیز با بکارگیری دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی (FE-SEM) <sup>1</sup> مدل TESCAN MIRA3 انجام شد. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها توسط مولتی‌متر Agilent 3458A با روش چهارپین یا کلونین کانکشن انجام شد [30]. برای تعیین خصوصیات الکترومغناطیسی، نخست نمونه‌ها با ابعاد 22.8×10×1 mm مطابق با استاندارد اندازه حفره موجبرها توسط فرایند برش لیزری با دقت برش داده شد. سپس نمونه‌های حاصل توسط دستگاه VNA <sup>2</sup> مدل HP 8510 ساخت کشور آمریکا در محدوده فرکانسی 8-12 GHz مورد آنالیز و ارزیابی قرار گرفت. همچنین طیف‌نگاری رامان جهت تعیین آسیب‌های ساختاری وارده از سوی روش پخش بر نانولوله‌های کربنی، بر روی نمونه‌هایی با غلظت آستانه رسانش (برای هر دو گروه از روش تهیه توسط الکترومکانیکی و التراسونیک) با استفاده از دستگاه Jobin Yvon S-3000 با لیزر تحریک کننده 514.5 nm انجام شد. همچنین منحنی ولتاژ-جریان این دو نمونه به کمک منبع تغذیه JPS30-2D و مولتی‌متر Agilent 3458A تعیین شد.

### 3- بحث و نتایج

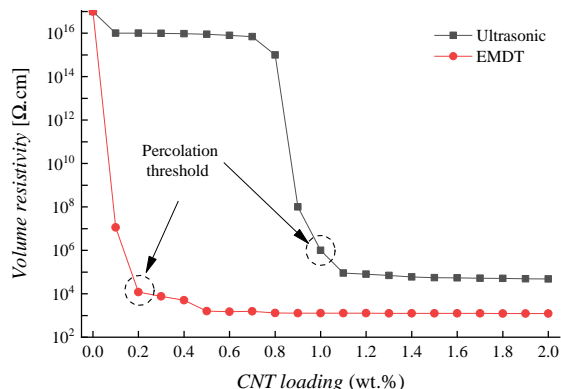
#### 3-1- مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری

تصاویر تهیه شده توسط FE-SEM برای چندین نمونه در شکل 1 آورده شده است. تصاویر (الف) تا (ت) این شکل مربوط به نمونه‌های تولید شده توسط فرایند الکترومکانیکی است. همانطوریکه در این تصاویر کاملاً مشهود است در 0.2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی شبکه‌ای از آن‌ها در درون ساختار نانوکامپوزیت شکل گرفته است که این شبکه می‌تواند عهده‌دار انتقال الکترون‌ها باشد. تصاویر (الف) تا (ت) در شکل 1 نیز تأثیر افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی برای این دسته از نمونه‌ها را نشان می‌دهند. بر اساس این میکروگراف‌ها، افزایش غلظت از 0.2٪ (شکل 3 الف) تا 1٪ (شکل 3 ت) تراکم شبکه‌ی شکل گرفته از نانولوله‌های کربنی را افزایش داده است.

تصاویر (ج) تا (ی) شکل 1 نیز مربوط به نمونه‌های است که پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی توسط روش پروب التراسونیک انجام شده است. این تصاویر همچنین تأثیر افزایش غلظت نانولوله‌های کربنی را نشان می‌دهند. همانطوریکه در این تصاویر به وضوح مشخص است تا غلظت 0.8٪ شبکه‌ای از نانولوله‌ها ایجاد نشده است و در نمونه 1٪ وزنی، شبکه‌ای با تراکم اندک از نانولوله‌ها ایجاد شده است که می‌تواند منجر به کاهش مقاومت الکتریکی پلیمر زمینه گردد. علت اصلی تفاوت در ساختارهای ایجاد شده می‌تواند به طول نانولوله‌ها نسبت داده شود. با توجه به اثرات مخرب امواج التراسونیک، به نظر می‌رسد جداسازی با این روش با شکست طول نانولوله‌ها [31-34] و در نتیجه با تقلیل نسبت وجهی، شکل‌گیری شبکه‌ی نانولوله‌ها را به غلظت‌های بالاتر موکول می‌کند [35-37].

1 Field Emission Scanning Electron Microscope  
2 Vector Network Analyzer

شکل 3 نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مشهود است که آستانه رسانایی برای نمونه‌های تولید شده با روش الکترومکانیکی در غلظت 0.2 درصد وزنی روی داده است در حالی که این پدیده برای نمونه‌های دسته تراسونیک در غلظت تقریبی 1٪ وزنی اتفاق افتاده است. بر اساس یافته‌های مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان این نتایج کاملاً قابل پیش‌بینی و توضیح است. در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی دو مکانیزم غالب بر کاهش مقاومت الکتریکی وجود دارد: (الف) برخورد مستقیم نانولوله‌های کربنی و تشکیل شبکه‌ای به هم پیوسته از آن‌ها که می‌تواند عمل انتقال الکترون را انجام دهد [17، 43]. (ب) پدیده تونل‌زنی ذره‌ای که اگر نانولوله‌های کربنی به هم بسیار نزدیک شوند بدون برخورد مستقیم نیز امکان انتقال الکترون با تونل‌زنی فراهم می‌گردد [17، 44]. هر دو پدیده تحت تأثیر دو فاکتور غلظت و طول نانولوله‌هاست [17، 45، 46]. با افزایش غلظت، تراکم توزیع نانوذرات در زمینه نارسا بیشتر شده و احتمال شکل‌گیری شبکه رسانا زیاد می‌شود [47]. در مقابل طول بودن نانولوله‌ها کمک می‌کند که فاصله بین آن‌ها کمتر شده و به واسطه آن پدیده تونل‌زنی تقویت شود [48-50]. البته افزایش غلظت نیز می‌تواند با کاهش فواصل بین ذرات رسانا نقشی مشابه را ایفا نماید ولی فزونی یافتن بیش از حد غلظت، موجب تشکیل شبکه رسانا شده که نتیجه آن کم‌رنگ گشتن اثر پدیده تونل‌زنی خواهد بود. در مورد یافته کنونی در نمونه‌های فرایند الکترومکانیکی، که در غلظت 0.2٪ آستانه رسانش رخ داده است، به نظر می‌رسد عدم شکست طول نانولوله‌ها با کاهش فاصله بین آن‌ها پدیده تونل‌زنی را تقویت کرده است و بدین طریق آستانه رسانایی در غلظت کمتری روی داده است [17].



**Fig. 3** The influence of CNTs concentration and dispersion method on the electrical resistivity of PMMA/CNTs nanocomposites

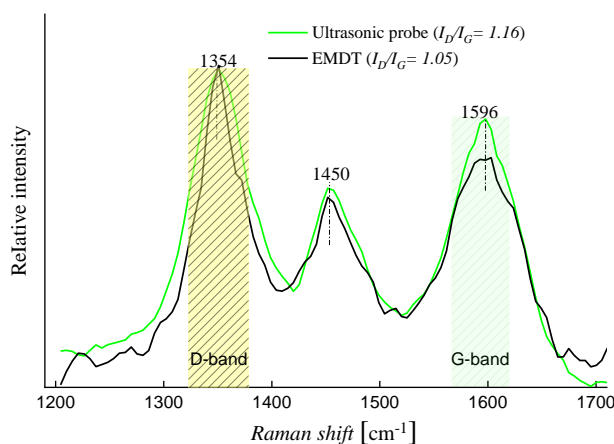
شکل 3 تأثیر غلظت نانولوله‌های کربنی و روش پخش و جداسازی آن‌ها بر مقاومت الکتریکی نانوکامپوزیت PMMA/CNTs

منحنی ولتاژ-جریان نمونه‌ها با غلظت آستانه رسانایی در شکل 4 آورده شده است که می‌تواند این فرضیه را به طور عملی اثبات نماید [17]. در شکل 4 مشاهده می‌شود، نمونه تراسونیک، رفتاری کاملاً خطی از خود نشان می‌دهد. این شکل از منحنی ولتاژ-جریان در مواد فلزی رخ می‌دهد که اثبات شده در نانوکامپوزیت‌های حاوی نانولوله‌های کربنی، نمودار خطی تنها در صورت تشکیل شبکه رسانا ایجاد می‌شود [17]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه 1٪ وزنی تهیه شده با تراسونیک به دلیل بالا بودن غلظت وزنی رسانش با مکانیزم تشکیل شبکه اتفاق افتاده است. در مورد نمونه تولید شده با روش الکترومکانیکی تا ولتاژ 10 V شاهد رفتار خطی بوده ولی در اختلاف پتانسیل‌های بالاتر از آن منحنی به شکل نمایی در حال صعود است. بر اساس مراجع

با توجه به اینکه، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی تنها به بخشی از سطوح نمونه‌ها دسترسی دارد، فرضیه فوق در وابستگی شکل‌گیری شبکه به طول، می‌تواند به کمک یافته‌های طیف‌نگاری رامان اثبات گردد.

شکل 2، طیف رامان مربوط به دو نمونه نانوکامپوزیت حاوی 1٪ وزنی نانولوله‌های کربنی، تولید شده با دو روش متفاوت پروب تراسونیک و الکترومکانیکی را نشان می‌دهد. طیف‌نگاری رامان روشی پذیرفته شده برای شناسایی آسیب‌های ساختاری بر روی نانولوله‌هاست [38-40]. بر اساس شکل 2، سه پیک مشخصه برای هر نمونه در طیف رامان دیده می‌شود. پیک در عدد موجی  $1450 \text{ cm}^{-1}$  به زمینه PMMA مربوط است، ولی دو پیک در حوالی  $1354 \text{ cm}^{-1}$  و  $1596 \text{ cm}^{-1}$  به ترتیب تحت عناوین G-peak و D-peak نام‌گذاری می‌شوند که منابع پیک D را به کربن آمورف و یا بی‌نظمی‌های اتمی نسبت می‌دهند [41].

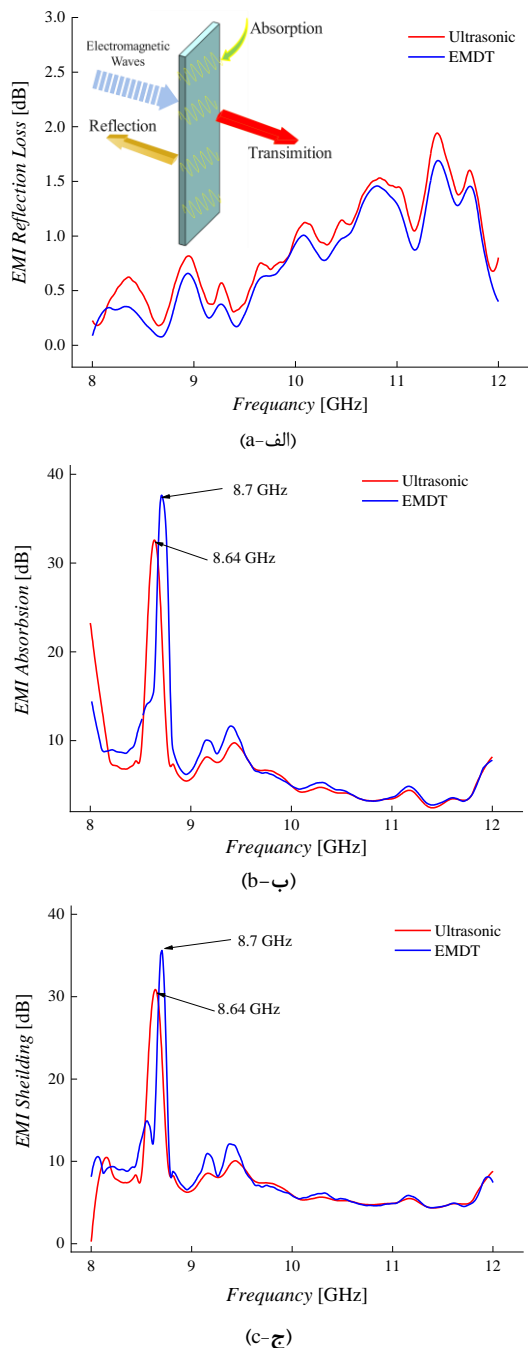
تناسب شدت پیک D به G ( $I_D/I_G$ ) معیاری مطمئن برای تشخیص عیوب ساختاری نانولوله‌هاست که نسبت بزرگ‌تر به معنی آسیب بیشتر در ساختار است [38، 40]. مقایسه این نسبت برای دو نمونه با مواد اولیه مشابه و فرایندهای تولید متفاوت، به تأثیر آن فرایند بر طول نانولوله‌ها نیز نسبت داده می‌شود که مقادیر بزرگ‌تر نشانگر طول باقی ماندن نانولوله‌هاست. این تناسب در مورد نمونه‌های الکترومکانیکی و تراسونیک به ترتیب 1.05 و 1.16 به دست آمده است. در فرایند تراسونیک میزان تنش‌های برشی اعمالی به نانولوله‌ها و کلوخه‌های آن‌ها حتی تا 100 MPa نیز می‌رسد [42]. این سطح از تنش، در نقاطی از نانولوله‌ها که دچار نابجایی‌های اتمی هستند آسیب‌ساز بوده و می‌تواند از آن نقاط نانولوله‌ها را بشکند [25]. در مقابل اثبات شده است که فرایند الکترومکانیکی با عملکرد بر مبنای خستگی مکانیکی چرخه بالا، در تنش‌های بسیار ناچیز عمل پخش و جدایش را انجام می‌دهد و از طول نانولوله‌ها حفاظت می‌نماید [24]. با تفسیر هم‌زمان یافته‌های مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های تولید شده به کمک روش الکترومکانیکی به دلیل عدم شکست طول نانولوله‌ها، شبکه رسانا در غلظت‌های اندک شکل گرفته است در حالی که در نمونه‌های تراسونیک شده این شبکه در غلظت‌های بالاتر ایجاد شده است.



**Fig. 2** Raman spectrum of the nanocomposite samples with the CNTs concentration of 1 wt.%, produced by EMDT and Ultrasonic

شکل 2 طیف رامان نمونه‌های نانوکامپوزیتی با غلظت 1٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی، تولید شده با دو فرایند الکترومکانیکی و تراسونیک

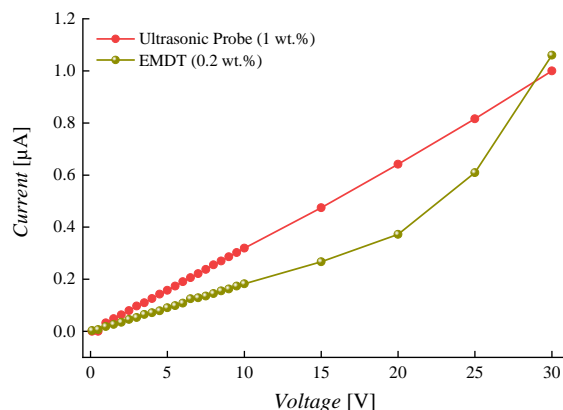
طول نانولوله‌ها بکاهند [15, 23]. به نظر می‌رسد توانایی حفاظت از طول اولیه توسط روش پخش و جدایش الکترومکانیکی توانسته است با تشکیل شبکه‌های متراکم از نانولوله‌ها، شرایط را برای جذب بیشتر امواج الکترومغناطیسی فراهم آورد.



**Fig. 5** The behavior of the prepared samples by EMDT and Ultrasonic versus electromagnetic waves. (a) Reflection, (b) Absorption and (c) Total electromagnetic shielding. Weight percentage of the prepared samples by EMDT and Ultrasonic samples is 0.2 and 1%, respectively.

شکل 5 رفتار نمونه‌های تهیه شده با روش‌های الکترومکانیکی و التراسونیک با غلظت آستانه رسانایی در مقابل امواج الکترومغناطیسی. (الف) بازتاب، (ب) جذب و (ج) عایق‌سازی کل در برابر امواج الکترومغناطیسی. درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در نمونه‌های تولید شده به روش الکترومکانیکی و التراسونیک به ترتیب برابر با 0.2 و 1٪ وزنی می‌باشد.

معتبر، منحنی‌وار بودن نمودار ولتاژ-جریان حاکی از غالب بودن پدیده تونل‌زنی است [17, 48]. در اختلاف پتانسیل‌های اندک چون لازم برای تونل‌زنی وجود ندارد، تنها شبکه‌ی نانولوله‌ها عهده‌دار هدایت الکتریکی است. با توجه به اینکه، تراکم شبکه به دلیل غلظت پایین بسیار کم است، جریان انتقالی نیز ناچیز است. با تشدید اختلاف پتانسیل و تقویت میدان الکتریکی، امکان انتقال با تونل‌زنی فراهم می‌گردد [48] و با توجه به فاصله کم نانولوله‌ها از همدیگر، تحت‌الشعاع عدم شکستن آن‌ها در فرایند جداسازی الکترومکانیکی، انتقال به واسطه تونل‌زنی انجام می‌گردد.



**Fig. 4** Voltage-Current curves of nanocomposite samples, produced by EMDT and Ultrasonic methods

شکل 4 منحنی ولتاژ-جریان نمونه‌های نانو کامپوزیتی تولید شده با روش الکترومکانیکی و التراسونیک

شکل 5 نمودارهای حاصل از ارزیابی رفتار نمونه‌های تولید شده با روش التراسونیک و الکترومکانیکی را در غلظت آستانه رسانش، در مقابل امواج الکترومغناطیسی نشان می‌دهند. با برخورد موج الکترومغناطیسی به یک ماده سه پدیده بازتاب، عبور و یا جذب می‌تواند روی دهد [5]. عایق بودن در مقابل امواج الکترومغناطیسی بر اساس تعاریف مراجع به مجموع پدیده‌های جذب و بازتاب، نسبت داده می‌شود [1]. شکل 5 (الف) میزان بازتاب امواج الکترومغناطیسی را به طور جداگانه برای هر نمونه نشان می‌دهد. همانطوریکه در این نمودار مشهود است میزان امواج بازتاب شده از هر دو نمونه در محدوده فرکانسی مطالعه شده، اندک و در حدود 0.1 تا 2 dB است. حداکثر موج بازتابی در فرکانس 11.4 GHz برای هر دو نمونه اتفاق افتاده است. نمودار مقدار جذب امواج توسط نمونه‌ها نیز در شکل 5 (ب) قابل مشاهده است. بر این اساس، برخلاف بازتاب، میزان جذب نمونه‌ها بسیار قابل توجه بوده و در محدوده فرکانسی تحت مطالعه در حدود 5 تا 38 dB از امواج تابش داده شده، جذب شده است. این نتیجه توسط مراجع مختلف نیز قبلاً تأیید گردیده است [51]. اما نکته قابل توجه عملکرد خیره‌کننده نمونه تولید شده به روش الکترومکانیکی در مقایسه با نمونه التراسونیک است. این نمونه با جذب 38 dB در فرکانس 7.8 GHz، علی‌رغم آنکه غلظتش تنها 20٪ نمونه التراسونیک است، در حدود 21٪، مقدار جذب بیشتری را ارائه می‌دهد. قبلاً تأثیر طولی بودن نانولوله‌ها در بهبود جذب امواج الکترومغناطیسی نیز گزارش گردیده است [19] ولی در عمل روشی برای حفاظت ساختار نانولوله‌ها پیشنهاد نشده است. در این راستا صرفاً پژوهشگران کوشیده‌اند تا با تحت کنترل درآوردن روش‌های موجود، نظیر پخش و جداسازی نانولوله‌ها به کمک فرایندهای ذوبی-اختلاطی و همچنین استفاده از امواج التراسونیک از تأثیرات نامطلوب آن‌ها در شکستن

آستانه رسانایی در نانوکامپوزیت‌های تولید شده به روش الکترومکانیکی در غلظت 0.2٪ وزنی از نانولوله‌های کربنی رخ داد، در حالی که برای نمونه‌های تولیدی با پروب تراسونیک در 1٪ رسانش قابل توجه مشاهده شد. این کاهش 80 درصدی در مصرف نانولوله‌ها جهت رسیدن به آستانه رسانایی، بر اساس مطالعات میکروسکوپی و طیف‌نگاری رامان، به دلیل عدم شکست طول نانولوله‌ها در فرایند جداسازی الکترومکانیکی و متعاقباً شکل‌گیری شبکه‌ای متراکم و رسانا از آن‌ها در درون ساختار نانوکامپوزیت حاصل شده است.

همچنین نمونه تولید شده با روش الکترومکانیکی در آستانه رسانایی (0.2٪ وزنی) عایق‌سازی 38 dB در برابر امواج الکترومغناطیسی را از خود نشان داد که در مقایسه با نمونه تهیه شده با پروب تراسونیک (1٪ وزنی) در حدود 16٪ بیشتر است. البته مقایسه میزان جذب نمونه تولید شده به روش الکترومکانیکی با موارد مشابه گزارش شده، نشان می‌دهد این روش از نظر کاهش هم‌زمان غلظت و بهبود عایق‌سازی بسیار مؤثرتر است، به نحوی که علی‌رغم کاهش 25 برابری غلظت کارآمدی عایق از 25 به 38 dB ارتقا یافته است.

در جمع‌بندی کلی، پروسه پخش و جداسازی الکترومکانیکی، روشی بسیار کارآمد در تولید عایق‌های جاذب امواج الکترومغناطیسی با راندمان بالا تشخیص داده شد که به دلیل کاهش 80 درصدی مصرف نانولوله‌های کربنی در مقایسه با روش تراسونیک قادر است، قیمت تمام شده این عایق‌ها را به طور چشمگیری تقلیل دهد.

#### 5- مراجع

- [1] Arjmand, M., Apperley, T., Okoniewski, M. and Sundararaj, U., "Comparative Study of Electromagnetic Interference Shielding Properties of Injection Molded Versus Compression Molded Multi-Walled Carbon Nanotube/Polystyrene Composites," Carbon, Vol. 50, No. 14, pp. 5126-5134, 2012.
- [2] Mirmohammadi, S. A., Sadjadi, S., Didehban, K., Yarahmadi, E. and Bahri-Laleh, N., "Synthesis of Polyaniline/Zinc-Cobalt Ferrite Nanocomposites and Their Use in the Preparation of Radar Absorber Coatings," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 1, pp. 761-767, 2020.
- [3] Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, H. D. and Jones, R., "Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Carbon Nanofiber/Lcp Composites," Composites Part A: applied science and manufacturing, Vol. 36, No. 5, pp. 691-697, 2005.
- [4] Huang, J. C., "Emi Shielding Plastics: A Review," Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute, Vol. 14, No. 2, pp. 137-150, 1995.
- [5] Arjmand, M., "Electrical Conductivity, Electromagnetic Interference Shielding and Dielectric Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Polymer Composites," PhD Thesis, University of Calgary, Canada, 2014.
- [6] Arjmand, M., Mahmoodi, M., Gelves, G. A., Park, S. and Sunderaraj, U., "Electrical and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Flow-Induced Oriented Carbon Nanotubes in Polycarbonate," Carbon, Vol. 49, No. 11, pp. 3430-3440, 2011.
- [7] Mahmoodi, M., Arjmand, M., Sundararaj, U. and Park, S., "The Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding of Injection Molded Multi-Walled Carbon Nanotube/Polystyrene Composites," Carbon, Vol. 50, No. 4, pp. 1455-1464, 2012.
- [8] Agalari, M., Heidari, F., Shelesh-Nezhad, K. and Navid, T., "Experimental Study on the Mechanical Properties, Morphology and Fluidity of Abs/Pbt/Cnt Nanocomposites," Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 4, pp. 1189-1196, 2021.
- [9] Aghajari, E., Morady, S., Navid Famili, M., Zakiyan, S. and Golbang, A., "Responses of Polystyrene/Mwcnt Nanocomposites to Electromagnetic Waves and the Effect of Nanotubes Dispersion," Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian), Vol. 27, pp. 193-201, 2014.

مقایسه میزان جذب نمونه تولید شده به روش الکترومکانیکی با موارد مشابه نشان می‌دهد که این روش از منظر کاهش هم‌زمان غلظت و افزایش کارآمدی عایق بسیار مؤثرتر است، به نحوی که علی‌رغم کاهش 2500٪ غلظت، کارآمدی عایق از 25 dB به 38 dB ارتقا یافته است [51]. این یافته نوید می‌دهد تا امکان تولید عایق‌های جاذب الکترومغناطیسی با درصد‌های پایین نانولوله‌های کربنی در صورت بکارگیری روش تولید الکترومکانیکی قابل دستیابی بوده که نتیجه آن کاهش چشمگیر هزینه به دلیل پایین بودن غلظت نانولوله‌های کربنی مصرفی است. شکل 5 (ج) نیز مجموع محافظت نمونه‌ها در برابر تابش امواج الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه میزان بازتابش امواج در هر دو نمونه‌ی بررسی شده اندک بود، در مجموع محافظت نیز، نقش پر رنگ جذب بسیار به چشم می‌خورد به نحوی که نمودارها بسیار مشابه با پدیده جذب است. بهترین عملکرد برای نمونه‌های الکترومکانیکی و تراسونیک به ترتیب مربوط به فرکانس‌های 7.8 و 8.64 GHz با عایق‌سازی 30 و 36 dB است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد روش تولید الکترومکانیکی در عایق‌سازی در حدود 16٪ بیشتر از تراسونیک است در حالی که غلظت نانولوله‌های کربنی در آن در حدود 80٪ کمتر است. علت این یافته می‌تواند با ماهیت فیزیکی عایق‌سازی توسط نانوکامپوزیت‌ها توجیه شود [5]. ارتباط مستقیم محافظت در برابر پرتوهای الکترومغناطیسی به دو مکانیسم مربوط می‌شود: اولاً افت اهمی و نانولوله‌های رسانای منفرد را می‌توان به عنوان یک مقاومت بازدارنده در برابر بارهای مهاجر در نظر گرفت. ترکیب نانولوله‌های رسانا و زمینه پلیمری بین آن‌ها را می‌توان به عنوان یک نانو-خازن در نظر گرفت. از این رو، می‌توان ادعا کرد که ساختار یک نانوکامپوزیت متشکل از تعداد بی‌شماری مقاومت و خازن است که به صورت سری یا موازی با یکدیگر ارتباط دارند. افزایش طول نانولوله‌ها منجر به تغییر ساختارهای مقاومت و خازن می‌شود که به ترتیب تلفات اهمی و افت پلاریزاسیون را به همراه دارد. در واقع، با افزایش طول، میزان برهمکنش بارهای مهاجر و دوقطبی‌های الکتریکی/مغناطیسی افزایش می‌یابد که این امر بشدت موج الکترومغناطیسی را تضعیف می‌کند [5]. ثانیاً با توجه به گزارش‌های مراجع قبلی، به نظر می‌رسد، حفاظت از نسبت وجهی نانولوله‌ها، کمک می‌کند تا ساختار شبکه‌ی شکل گرفته از آن‌ها، در هم تنیدگی بیشتری را ایجاد کرده و منجر به تشدید جریان‌های گردابی شود و به واسطه آن عایق‌سازی بیشتری را در مقابل امواج الکترومغناطیسی می‌توان ایجاد کرد [19]. بدیهی است در مقابل، خرد شدن طول نانولوله‌ها پدیده مشروح را تضعیف می‌نماید که در مورد نمونه تهیه شده با تراسونیک رخ داده است.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تلاش شد تا جاذب امواج الکترومغناطیسی نانوکامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی، با راندمان بالا و صرف هزینه کمتر تولید شود. برای این منظور، لازم بود تا ساختار اولیه نانولوله‌ها حفظ شود و از شکست آن‌ها جلوگیری به عمل آید. اخیراً روش الکترومکانیکی جدیدی بر مبنای استفاده از میدان‌های الکتریکی اغتشاشی، برای پخش و جداسازی نانولوله‌های کربنی در بسترهای مایع ابداع شده است که می‌تواند این هدف را برآورده سازد. در این راستا، در رویکردی مقایسه‌ای توانمندی فرایند نوین الکترومکانیکی با روش رایج پروب تراسونیک در تولید جاذب امواج الکترومغناطیسی بر پایه نانولوله‌های کربنی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- Nanotubes in One-Dimensional Polymer Fiber Structure," *Carbon*, Vol. 140, pp. 1-9, 2018.
- [27] Lahelin, M., Annala, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J. and Seppälä, J., "In Situ Polymerized Nanocomposites: Polystyrene/Cnt and Poly (Methyl Methacrylate)/Cnt Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 71, No. 6, pp. 900-907, 2011.
- [28] Du, F., Fischer, J. E. and Winey, K. I., "Coagulation Method for Preparing Single-Walled Carbon Nanotube/Poly (Methyl Methacrylate) Composites and Their Modulus, Electrical Conductivity, and Thermal Stability," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 41, No. 24, pp. 3333-3338, 2003.
- [29] Mazov, I., Kuznetsov, V., Moseenkov, S., Ishchenko, A., Rudina, N., Romanenko, A., Buryakov, T., Anikeeva, O., Macutkevicius, J. and Seliuta, D., "Structure and Electrophysical Properties of Multiwalled Carbon Nanotube/Polymethylmethacrylate Composites Prepared Via Coagulation Technique," *Nanoscience and Nanotechnology Letters*, Vol. 3, No. 1, pp. 18-23, 2011.
- [30] Ghavidel, A. K., Azdast, T., Shabgard, M., Navidfar, A. and Sadighikia, S., "Improving Electrical Conductivity of Poly Methyl Methacrylate by Utilization of Carbon Nanotube and Co<sub>2</sub> Laser," *Journal of applied polymer science*, Vol. 132, No. 42, 2015.
- [31] Duan, W. H., Wang, Q. and Collins, F., "Dispersion of Carbon Nanotubes with Sds Surfactants: A Study from a Binding Energy Perspective," *Chemical Science*, Vol. 2, No. 7, pp. 1407-1413, 2011.
- [32] Arrigo, R., Teresi, R., Gambarotti, C., Parisi, F., Lazzara, G. and Dintcheva, N. T., "Sonication-Induced Modification of Carbon Nanotubes: Effect on the Rheological and Thermo-Oxidative Behaviour of Polymer-Based Nanocomposites," *Materials*, Vol. 11, No. 3, pp. 383, 2018.
- [33] Xu, H., Abe, H., Naito, M., Fukumori, Y., Ichikawa, H., Endoh, S. and Hata, K., "Efficient Dispersing and Shortening of Super-Growth Carbon Nanotubes by Ultrasonic Treatment with Ceramic Balls and Surfactants," *Advanced Powder Technology*, Vol. 21, No. 5, pp. 551-555, 2010.
- [34] Zou, B., Chen, S. J., Korayem, A. H., Collins, F., Wang, C. M. and Duan, W. H., "Effect of Ultrasonication Energy on Engineering Properties of Carbon Nanotube Reinforced Cement Pastes," *Carbon*, Vol. 85, pp. 212-220, 2015.
- [35] Zare, Y., Rhee, K. Y. and Park, S. J., "Effects of Cnt Size, Network Fraction, and Interphase Thickness on the Tunneling Distance between Neighboring Carbon Nanotubes (Cnts) in Nanocomposites," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 86, pp. 53-60, 2020.
- [36] Li, J., Ma, P. C., Chow, W. S., To, C. K., Tang, B. Z. and Kim, J. K., "Correlations between Percolation Threshold, Dispersion State, and Aspect Ratio of Carbon Nanotubes," *Advanced Functional Materials*, Vol. 17, No. 16, pp. 3207-3215, 2007.
- [37] Qian, J., Pu, J. H., Zha, X. J., Bao, R. Y., Liu, Z. Y., Yang, M. B. and Yang, W., "Effect of Aspect Ratio of Multi-Wall Carbon Nanotubes on the Dispersion in Ethylene-A-Octene Block Copolymer and the Properties of the Nanocomposites," *Journal of Polymer Research*, Vol. 26, No. 12, pp. 1-11, 2019.
- [38] Datsyuk, V., Kalyva, M., Papagelis, K., Parthenios, J., Tasis, D., Siokou, A., Kallitsis, I. and Galiotis, C., "Chemical Oxidation of Multiwalled Carbon Nanotubes," *carbon*, Vol. 46, No. 6, pp. 833-840, 2008.
- [39] Chapkin, W. A., Wenderott, J. K., Green, P. F. and Taub, A. I., "Length Dependence of Electrostatically Induced Carbon Nanotube Alignment," *Carbon*, Vol. 131, pp. 275-282, 2018.
- [40] Wang, Y., Vasileva, D., Zustiak, S. P. and Kuljanishvili, I., "Raman Spectroscopy Enabled Investigation of Carbon Nanotubes Quality Upon Dispersion in Aqueous Environments," *Biointerphases*, Vol. 12, No. 1, pp. 011004, 2017.
- [41] Kuznetsov, V. L., Bokova-Sirosh, S. N., Moseenkov, S. I., Ishchenko, A. V., Krasnikov, D. V., Kazakova, M. A., Romanenko, A. I., Tkachev, E. N. and Obratsova, E. D., "Raman Spectra for Characterization of Defective Cvd Multi-Walled Carbon Nanotubes," *physica status solidi (b)*, Vol. 251, No. 12, pp. 2444-2450, 2014.
- [42] Huang, Y. Y. and Terentjev, E. M., "Dispersion of Carbon Nanotubes: Mixing, Sonication, Stabilization, and Composite Properties," *Polymers*, Vol. 4, No. 1, pp. 275-295, 2012.
- [10] Esmaili, P., Azdast, T., Doniavi, A., Hasanzadeh, R., Mamaghani, S. and Eungkee Lee, R., "Experimental Investigation of Mechanical Properties of Injected Polymeric Nanocomposites Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes According to Design of Experiments," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-74, 2015.
- [11] Wang, X., Jiang, Q., Xu, W., Cai, W., Inoue, Y. and Zhu, Y., "Effect of Carbon Nanotube Length on Thermal, Electrical and Mechanical Properties of Cnt/Bismaleimide Composites," *Carbon*, Vol. 53, pp. 145-152, 2013.
- [12] Guo, J., Liu, Y., Prada-Silvy, R., Tan, Y., Azad, S., Krause, B., Pötschke, P. and Grady, B. P., "Aspect Ratio Effects of Multi-Walled Carbon Nanotubes on Electrical, Mechanical, and Thermal Properties of Polycarbonate/Mwcnt Composites," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 52, No. 1, pp. 73-83, 2014.
- [13] Esbati, A. and Irani, S., "Multiscale Modeling of Fracture in Polymer Nanocomposite Reinforced by Intact and Functionalized Cnts," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 1, pp. 35-46, 2017.
- [14] Karimi, M., Ghajar, R. and Montazeri, A., "Investigation of Nanotubes' Length and Their Agglomeration Effects on the Elastoplastic Behavior of Polymer-Based Nanocomposites," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No. 2, pp. 229-240, 2017.
- [15] Kasaliwal, G. R., Pegel, S., Gödel, A., Pötschke, P. and Heinrich, G., "Analysis of Agglomerate Dispersion Mechanisms of Multiwalled Carbon Nanotubes During Melt Mixing in Polycarbonate," *Polymer*, Vol. 51, No. 12, pp. 2708-2720, 2010.
- [16] Rong, Q., Shao, C. and Bao, H., "Molecular Dynamics Study of the Interfacial Thermal Conductance of Multi-Walled Carbon Nanotubes and Van Der Waals Force Induced Deformation," *Journal of Applied Physics*, Vol. 121, No. 5, pp. 054302, 2017.
- [17] Hoseini, A. H. A., Arjmand, M., Sundararaj, U. and Trifkovic, M., "Significance of Interfacial Interaction and Agglomerates on Electrical Properties of Polymer-Carbon Nanotube Nanocomposites," *Materials & Design*, Vol. 125, pp. 126-134, 2017.
- [18] Hashemi, S. A., Mousavi, S. M., Arjmand, M., Yan, N. and Sundararaj, U., "Electrified Single-Walled Carbon Nanotube/Epoxy Nanocomposite Via Vacuum Shock Technique: Effect of Alignment on Electrical Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding," *Polymer Composites*, Vol. 39, No. S2, pp. E1139-E1148, 2018.
- [19] Singh, B., Saini, K., Choudhary, V., Teotia, S., Pande, S., Saini, P. and Mathur, R., "Effect of Length of Carbon Nanotubes on Electromagnetic Interference Shielding and Mechanical Properties of Their Reinforced Epoxy Composites," *Journal of nanoparticle research*, Vol. 16, No. 1, pp. 1-11, 2014.
- [20] Yuen, S. M., Ma, C. C. M., Chuang, C. Y., Yu, K. C., Wu, S. Y., Yang, C. C. and Wei, M. H., "Effect of Processing Method on the Shielding Effectiveness of Electromagnetic Interference of Mwcnt/Pmma Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 3-4, pp. 963-968, 2008.
- [21] Pötschke, P., Dudkin, S. M. and Alig, I., "Dielectric Spectroscopy on Melt Processed Polycarbonate—Multiwalled Carbon Nanotube Composites," *Polymer*, Vol. 44, No. 17, pp. 5023-5030, 2003.
- [22] Jiang, Y., Song, H. and Xu, R., "Research on the Dispersion of Carbon Nanotubes by Ultrasonic Oscillation, Surfactant and Centrifugation Respectively and Fiscal Policies for Its Industrial Development," *Ultrasonics sonochemistry*, Vol. 48, pp. 30-38, 2018.
- [23] Hilding, J., Grulke, E. A., George Zhang, Z. and Lockwood, F., "Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids," *Journal of dispersion science and technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-41, 2003.
- [24] Ghavidel, A. K., Zadshakoyan, M., Arjmand, M. and Kiani, G., "A Novel Electro-Mechanical Technique for Efficient Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquid Media," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 207, pp. 106633, 2021.
- [25] Ghavidel, A. K., Zadshakoyan, M. and Arjmand, M., "Mechanical Analysis of Aligned Carbon Nanotube Bundles under Electric Field," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 196, pp. 106289, 2021.
- [26] Yu, S., Wang, X., Xiang, H., Zhu, L., Tebyetekerwa, M. and Zhu, M., "Superior Piezoresistive Strain Sensing Behaviors of Carbon

- [43] Mahmoodi, M., "Electrical, Thermal, and Machining Behaviour of Injection Moulded Polymeric Cnt Nanocomposites," PhD Thesis, University of Calgary, Canada, 2014.
- [44] Talamadupula, K. K. and Seidel, G. D., "Statistical Analysis of Effective Piezoresistivity of Carbon Nanotube Reinforced Polymer Nanocomposites from Electron Tunneling Effects," in Proceeding of 2259 .
- [45] Otaegi, I., Aranburu, N., Iturrondobeitia, M., Ibarretxe, J. and Guerrica-Echevarría, G., "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, Vol. 11, No. 12, pp. 2059, 2019.
- [46] Rahman, R. and Servati, P., "Effects of Inter-Tube Distance and Alignment on Tunnelling Resistance and Strain Sensitivity of Nanotube/Polymer Composite Films," Nanotechnology, Vol. 23, No. 5, pp. 055703, 2012.
- [47] Zare, Y. and Rhee, K. Y., "A Power Model to Predict the Electrical Conductivity of Cnt Reinforced Nanocomposites by Considering Interphase, Networks and Tunneling Condition," Composites Part B: Engineering, Vol. 155, pp. 11-18, 2018.
- [48] Doh, J., Park, S. I., Yang, Q. and Raghavan, N., "The Effect of Carbon Nanotube Chirality on the Electrical Conductivity of Polymer Nanocomposites Considering Tunneling Resistance," Nanotechnology, Vol. 30, No. 46, pp. 465701, 2019.
- [49] Bao, W., Meguid, S., Zhu, Z., Pan, Y. and Weng, G., "Effect of Carbon Nanotube Geometry Upon Tunneling Assisted Electrical Network in Nanocomposites," Journal of Applied Physics, Vol. 113, No. 23, pp. 234313, 2013.
- [50] Gau, C., Kuo, C.-Y. and Ko, H., "Electron Tunneling in Carbon Nanotube Composites," Nanotechnology, Vol. 20, No. 39, pp. 395705, 2009.
- [51] Soltani Alkuh, M., Navid Famili, M. H. and Moeini, M. H., "The Effect of Foaming Process on the Radar Absorbing Properties of Pmma/Mwcnt Composites," Iranian Journal of Polymer Science and Technology, Vol. 28, No. 3, pp. 195-189, 2015.