

مطالعه اثر توزیع فاز سخت بر رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن به عنوان دزیتمتر پرتو با بهره‌گیری از روش مونت کارلو

فائزه سلیمی احمدآباد^۱، شهریار ملکی^۲ و فرهود ضیائی^{۲*}

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

^۲پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

* تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶

پست الکترونیکی: fziaie@aeoi.org.ir

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی اثر توزیع نانولوله کربن در رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر-نانولوله کربن به عنوان پاسخ دزیتمتری این سیستم است. از این رو رسانندگی الکتریکی این کامپوزیت در توزیع‌های متفاوت شامل هم‌خط، هم‌گن و کلوخه‌ای در حالات دو و سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و با داده‌های تجربی سایر مقالات مقایسه و اعتبارسنجی گردید. برای توزیع نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری در حالت سه بعدی از روش مونت کارلو و رهیافت حجم مستثنی بهره‌گیری شد. نتایج شبیه‌سازی در سه بعد نشان داد که رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن وابسته به زاویه پراکنش نانولوله‌ها در بستر پلیمری است. نتایج این شبیه‌سازی نشان داد که هر چه درجه کلوخه‌ای شدن کامپوزیت پلیمر-نانولوله کربن بیشتر باشد، رسانندگی الکتریکی آن کاهش شدیدتری می‌یابد. به عبارتی دیگر با گذار از حالت کلوخه‌ای به همگنی، رسانندگی الکتریکی کامپوزیت مذکور افزایش می‌یابد.

کلید واژگان: نانوکامپوزیت پلیمری، رسانندگی الکتریکی، مونت کارلو، دزیتمتری.

۱. مقدمه

ذخیره‌کننده انرژی، باتری‌ها، حسگرها و دزیتمترهای تابشی است [۳-۹]. زمانی که مقدار کسر حجمی یا وزنی CNT در بستر پلیمری از یک حد بحرانی تجاوز کند، رسانندگی الکتریکی کامپوزیت دفعاتاً افزایش می‌یابد که این مقدار بحرانی را آستانه گذر الکتریکی^۱ (EPT) می‌نامند. در پژوهش‌های پیشین مؤلفین، با توجه به ویژگی‌های الکتریکی منحصر به فرد نانولوله‌های کربنی در افزایش چندمرتب‌ه‌ای رسانندگی الکتریکی

پس از کشف نانولوله‌های کربن (CNT) توسط ایجیما [۱]، به منظور ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمر/CNT، آجایان اولین شخصی بود که نانولوله‌های کربنی را در بستر پلیمری به کار گرفت. آجایان نشان داد که ویژگی‌های مطلوب کامپوزیت‌های پلیمر/CNT باپخش و خطی کردن نانولوله‌ها در ماتریس‌های پلیمری می‌تواند محقق شود [۲]. نانوکامپوزیت پلیمر/CNT دارای کاربردهای فراوانی در زمینه حفاظت‌سازی امواج الکترومغناطیس، کاربردهای آنتی‌الکترواستاتیک، ابزارهای

^۱ Electrical Percolation Threshold

پلیمر- نانولوله کربن، نتایج شبیه‌سازی بر مبنای روش کالریمتری نشان داد که بیشترین حساسیت پذیری و پاسخ دز در این دسته کامپوزیت‌ها مربوط به ناحیه EPT است. در تعیین مقدار EPT در کامپوزیت‌های پلیمر- نانولوله کربن، عوامل مختلفی دخیل‌اند؛ از جمله نسبت ابعادی نانولوله‌ها (نسبت طول به قطر)، درجه بلورینگی پلیمر و نحوه پراکنش نانولوله‌ها [۹].

در کار پژوهشی حاضر با توجه به اهمیت توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری و تأثیر متقابل آن بر مقدار EPT و ویژگی‌های دزیمتری کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن، وابستگی رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلی استایرن/نانولوله کربن (PS/CNT) به توزیع نانولوله‌های کربنی با در نظر گرفتن درجات کلوخه‌های^۱ مختلف شبیه‌سازی شد.

۲. روش انجام محاسبات

بر اساس مدل هسته-نرم ارائه شده توسط اونیز [۱۱]، نانولوله‌های کربن به صورت ذراتی در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. با فرض مستقیم بودن نانولوله‌های کربن و پخش کاملاً تصادفی آن‌ها در بستر پلیمری، مکان آن‌ها در فضای سه‌بعدی به صورت زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$\begin{cases} x_i^1 \\ y_i^1 \\ z_i^1 \end{cases} = \begin{cases} x_i^0 \\ y_i^0 \\ z_i^0 \end{cases} + I_i \begin{cases} \sin \theta_i \cos \beta_i \\ \sin \theta_i \sin \beta_i \\ \cos \theta_i \end{cases} \quad (1)$$

که اندیس i مربوط به i -امین نانولوله، (x_i^0, y_i^0, z_i^0) و (x_i^1, y_i^1, z_i^1) به ترتیب مختصات مربوط به نقاط ابتدایی و انتهایی نانولوله بوده و I_i طول نانولوله است. مقادیر (x_i^0, y_i^0, z_i^0) به گونه‌ای به صورت تصادفی شبیه‌سازی شده‌اند که مراکز نانولوله‌ها در چارچوب مختصات تعریف شده برای کامپوزیت قرار داشته باشند. در این کار محاسباتی مقدار I_i

پلیمرها، ایده استفاده از نانوکامپوزیت پلی اتیلن-نانولوله کربن (PE-CNT) به عنوان یک دزیمتر فعال مطرح گردید. در آن کار شبیه‌سازی رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PE-CNT در درصدهای وزنی مختلف با استفاده از نرم‌افزار COMSOL، آستانه گذر برآورد شد و با معادله متقارن بروگمن مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از نرم‌افزار مذکور به منظور ارزیابی رسانندگی الکتریکی مؤثر کامپوزیت با هدف دزیمتری امکان‌پذیر است [۱۰]. روش کار این دسته از دزیمترها بدین صورت بوده که کامپوزیت پلیمر-نانولوله کربن در غیاب تابش‌های یونساز نظیر گاما، دارای یک جریان تاریک (I_0) بوده که در اثر پرتو دهی و تولید بارهای الکتریکی و گردآوری این بارها تحت یک ولتاژ مناسب، مقدار جریان الکتریکی (I) عبوری از کامپوزیت افزایش می‌یابد. با کالیبراسیون مقدار جریان قرائت شده با چشمه‌های استاندارد می‌توان به مقدار آهنگ دز چشمه‌های نامعلوم پی برد.

در پژوهشی دیگر یک روش دوبعدی تعمیم یافته به عنوان یک روش جدید برای محاسبه آستانه گذر معرفی شد و پاسخ دزیمتر کامپوزیتی PE-CNT در گستره دز صفر تا 1500 mGy محاسبه گردید [۹]. در محاسبات دزیمتری از روش کالریمتری بر مبنای رابطه $D = C_p \Delta T$ بهره‌گیری شد که در آن دمایی معادل ΔT به کل کامپوزیت با ظرفیت گرمایی C_p اعمال شده، که با توجه به کسر وزنی نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری، مقدار دز جذبی (D) مربوطه مشخص شده و همچنین آهنگ دز از رابطه $\dot{D} = C_p \frac{\partial T}{\partial t}$ با تقریب $\frac{\Delta T}{\Delta t} \cong \frac{\partial T}{\partial t}$ برای مدت دو دقیقه به دست آمد. به منظور برآورد تغییر نسبی جریان $(I - I_0)/I_0$ در اثر جذب پرتو در دزهای مختلف (بر اساس روابط کالریمتری) از نرم افزار COMSOL بهره‌گیری شد [۹]. کارهای پیشین تمامی شبیه‌سازی‌ها با فرض توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی در ماتریس پلیمری صورت پذیرفته است. در مورد کامپوزیت

¹ Agglomeration

به منظور بررسی رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS/CNT در حالت سه‌بعدی ابتدا مکعبی به ابعاد $L_x = L_z = 10\mu\text{m}$ و $L_y = 500\text{nm}$ از جنس پلیمر در نظر گرفته شد که در آن طول نانولوله‌ها (L) برابر 200 nm و قطر آن‌ها (D) برابر 20 nm است، بنابراین نسبت ابعادی (L/D) نانولوله‌ها ثابت و برابر ۱۰ در نظر گرفته شد. سپس به روش المان محدود^۴ به یافتن رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS/CNT در کسرهای وزنی مختلف و در زوایای پراکندگی مختلف نانولوله‌های کربن پرداخته شد. بدین منظور تعداد ۱۰۰ استوانه به عنوان نانولوله در نظر گرفته شد. در این مدل چهار ناحیه کلوخه ای مطابق شکل ۳ تعریف گردید.

به منظور برآورد مقدار کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری در حالت سه‌بعدی، پارامتر δ (درجه همگنی) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\delta = \frac{V_{\text{agg}}}{V_{1/4}} \quad (۴)$$

که در آن V_{agg} حجم یک کره کلوخه‌ای است مشتمل بر مراکز بیش از ۹۵٪ نانولوله‌ها و $V_{1/4}$ عبارتست از یک-چهارم حجم کل مکعب سه‌بعدی.

هر چه درجه کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری بیشتر باشد، یا به عبارتی δ خیلی کوچک باشد، مقدار آستانه گذر مربوط به کامپوزیت پلیمر-نانولوله‌کربن به سمت مقادیر بیشتر سوق می‌یابد [۱۵].

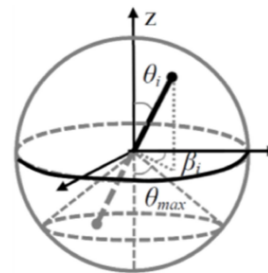
در شکل ۳ محور اصلی نانولوله‌ها (Z) که توزیع زاویه‌ای حول آن تعریف می‌شود، در دو حالت پیش‌فرض موازی و عمود بر صفحات هادی مولد میدان الکتریکی عرضی در نظر گرفته می‌شود.

ثابت در نظر گرفته شده است. مطابق شکل ۱ زوایای سمتی و قطبی نانولوله (β_i, θ_i) به طور یکنواخت در بازه‌های زیر توزیع شده‌اند:

$$\beta_i = 2\pi \times \text{rand} \quad (۲)$$

$$\theta_i = \begin{cases} \pi - 2\theta_{\text{max}} + \frac{2\theta_{\text{max}}}{\pi} \cos^{-1}(2 \times \text{rand} - 1) & 0 \leq \text{rand} < 0.5 \\ \frac{2\theta_{\text{max}}}{\pi} \cos^{-1}(2 \times \text{rand} - 1) & 0.5 \leq \text{rand} \leq 1 \end{cases} \quad (۳)$$

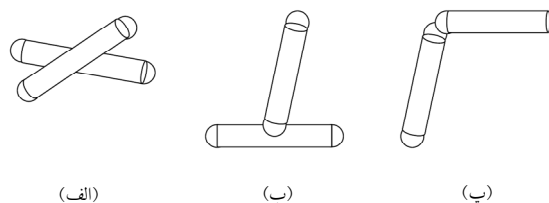
که در آن‌ها، rand عدد تصادفی متعلق به بازه $[0,1]$ و θ_{max} بیشینه زاویه هم‌خط بودن نانولوله است که به منظور توصیف درجه هم‌خط بودن آن در بستر پلیمری به کار گرفته می‌شود. بر این اساس مسأله دوبعدی را می‌توان حالت خاصی از مسأله سه‌بعدی در نظر گرفت که در آن فرض شده نانولوله‌ها در صفحه YZ قرار داشته و زاویه سمتی برابر $\beta = \pi/2$ و با توجه به تقارن سمتی زاویه قطبی در بازه $0 \leq \theta_i \leq \pi/2$ قرار دارد.



شکل (۱): پیکربندی نانولوله در فضای سه‌بعدی [۸].

۱.۲. نانولوله‌های کربن در فضای سه‌بعدی

به منظور پخش نانولوله‌ها در بستر پلیمر مطابق شکل ۲، سه حالت پهلو به پهلو^۱، پهلو به انتها^۲ و انتها به انتها^۳ در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): (الف) پهلو به پهلو، (ب) پهلو به انتها و (پ) انتها به انتها.

¹ Side to Side

² Side to End

³ End to End

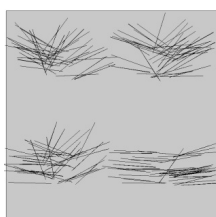
⁴ Finite Element Method

جدول (۱): نمایش پارامتر δ برای شعاع‌های مختلف کلوخه‌ای دوبعدی

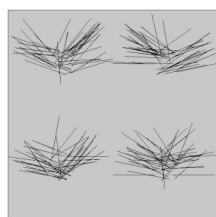
پارامتر δ	شعاع ناحیه کلوخه‌ای (R)
۰/۰۴۵	۰/۳ L
۰/۰۸۰	۰/۴ L
۰/۱۲	۰/۵ L
۰/۱۹	۰/۶۲۵ L
۰/۲۵	۰/۷۱ L
۰/۵۰	L
۰/۸۵	۱/۳ L
۱/۰۰	۱/۴۱ L

جدول (۲): مشخصات فیزیکی مواد در این شبیه‌سازی [۱۳]

ماده	چگالی (g/cm ³)	ثابت دی‌الکتریک (ϵ)	رسانندگی الکتریکی (S/m)
SWCNT	۱/۵	۲۰۰	۱۰ ^۵
PS	۱/۰۵	۲/۶	۱۰ ^{-۱۶}



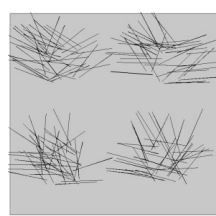
$\delta = 0.080$



$\delta = 0.045$



$\delta = 0.19$



$\delta = 0.12$



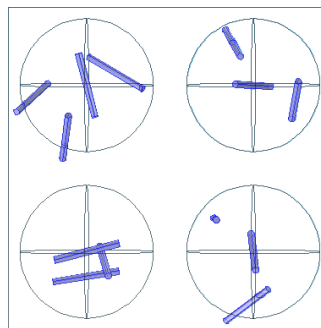
$\delta = 1.00$



$\delta = 0.85$

شکل (۴): نمایشی از درجات کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربن در

کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن در شبیه‌سازی دوبعدی.



شکل (۳): نمایشی از نواحی کروی کلوخه‌ای در داخل مکعب در حالات مختلف.

۲.۲. نانولوله‌های کربن در فضای دوبعدی

نانولوله‌ها به صورت مستطیل‌هایی با طول $L = 2 \mu\text{m}$ ، قطر $D = 2 \text{ nm}$ و نسبت ابعادی (طول به قطر) $L/D = 1000$ در نظر گرفته شده‌اند. سپس به روش المان محدود به یافتن رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS-CNT در کسرهای وزنی و در درجات کلوخه‌ای مختلف نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری پرداخته شد. بدین منظور تعداد ۱۶۰ مستطیل به عنوان نانولوله شبیه‌سازی شد. در این مدل چهار ناحیه کلوخه‌ای مطابق شکل ۳ در نظر گرفته شده است.

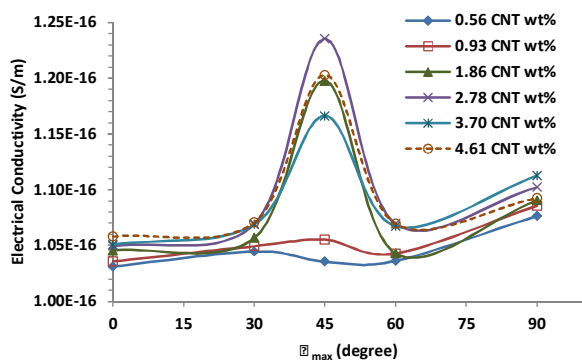
به منظور برآورد مقدار کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری در حالت دوبعدی، پارامتر δ (درجه همگنی) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$\delta = \frac{S_{\text{agg}}}{S_{1/4}} \quad (5)$$

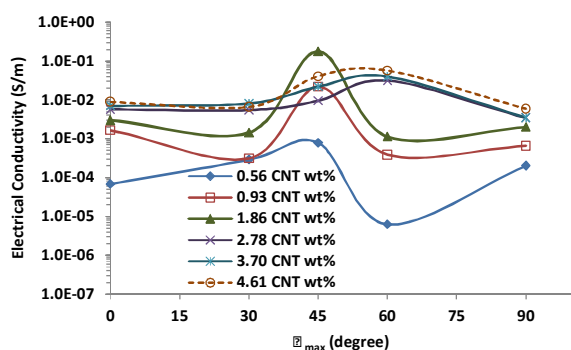
که S_{agg} مساحت یک ناحیه کلوخه‌ای و یک-چهارم مساحت کل بستر پلیمری مربعی به ابعاد $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ است. با توجه به رابطه (۵)، شعاع ناحیه دایره‌ای کلوخه‌ای (R) طبق جدول ۱- محاسبه شده و در شکل ۴ به همراه درجات مختلف کلوخه‌ای بودن نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری به تصویر کشیده شده است.

همچنین مشخصات فیزیکی نانولوله کربن و پلیمر در نظر گرفته شده در این شبیه‌سازی در جدول ۲ آمده است.

شود، مقدار رسانندگی الکتریکی کامپوزیت افزایش می‌یابد. افزایش مقدار رسانندگی کامپوزیت مذکور منجر به افزایش جریان تاریک دزیمترهای مذکور شده، که متعاقب آن سایر ویژگی‌های دزیمتری نظیر پاسخ دز متاثر از این موضوع خواهند شد. چون در کار تجربی، نحوه پخش نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری، بسته به روش ساخت کامپوزیت به عوامل مختلفی بستگی دارد، لذا به طور قطع نمی‌توان درجه کلوخه‌ای شدن آن‌ها را به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی تعیین نمود، لذا این مقایسه به طور کیفی صورت گرفته است.



(الف)

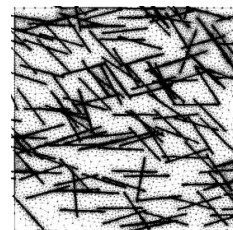


(ب)

شکل (۳): رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS-CNT در زوایا و کسرهای وزنی مختلف در حالات الف) موازی ب) عمودی.

در کار تجربی سانگ و همکاران، همانطور که از شکل ۷ دیده می‌شود، رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن برای دو حالت پخش همگن و ضعیف اندازه‌گیری شده است. به منظور استفاده از کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن به عنوان یک دزیمتر، کسر وزنی بهینه برای نانولوله‌های کربنی بایستی

همچنین نمایی از مش‌بندی میدان الکتریکی با استفاده از نرم‌افزار COMSOL در کامپوزیت به روش المان محدود در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است.



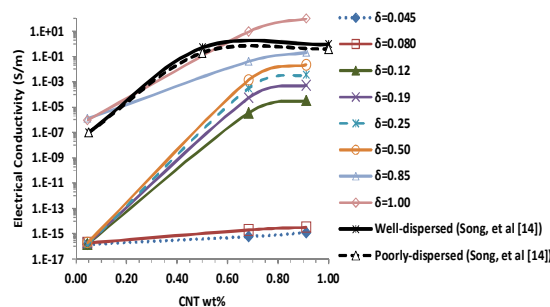
شکل (۵): نمایی از مش‌بندی دوبعدی برای کامپوزیت PS-CNT با استفاده از نرم‌افزار COMSOL.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۶ رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS-CNT در سه بعد، در زوایا و کسرهای وزنی مختلف از نانولوله‌های کربنی در دو حالت موازی و عمودی نشان داده شده است. از این شکل پیداست که در حالت موازی برای کسرهای وزنی پایین یعنی ۰/۵۶ wt% و ۰/۹۳ wt%، رسانندگی الکتریکی وابستگی چندانی به زاویه پخش نانو لوله‌ها نشان نمی‌دهد؛ اما برای سایر درصدهای وزنی، وابستگی زاویه‌ای شدیدتر شده به طوری که بیشترین تغییرات در $\theta_{max} = 45$ قابل مشاهده است. مطابق شکل ۷ رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS-CNT در دوبعد، بر حسب درصدهای وزنی مختلف برای درجات مختلف توزیع کلوخه‌ای شبیه‌سازی شده است و با کار تجربی سانگ و همکاران به صورت کمی مقایسه شده است [۱۴]. همانطوری که از این شکل پیداست، کمترین مقدار رسانندگی الکتریکی شبیه‌سازی شده برای کامپوزیت PS-CNT مربوط به $\delta = 0.045$ بوده و بیشترین مقدار رسانندگی الکتریکی کامپوزیت مذکور مربوط به حالت مرتبط با $\delta = 1.00$ است. می‌توان از شکل ۷ نتیجه گرفت که هر چه درجه کلوخه‌ای شدن یک کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن بیشتر باشد (δ کمتر)، رسانندگی الکتریکی آن کاهش شدیدتری پیدا می‌کند و بالعکس؛ یعنی هر چه از درجه کلوخه‌ای شدن یک نانولوله کاسته شده (δ بیشتر) و به میزان همگنی آن افزوده

دزیمتری این دسته کامپوزیت‌ها، به ویژه برآورد مقدار کسر وزنی آستانه گذرنقش مهمی ایفا می‌کند. در حالت کلوخه‌ای در سه بعد، به خاطر اتصالات بیشتر نانولوله‌های کربنی با یکدیگر، با افزایش درجه کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربن در کامپوزیت PS-CNT، مقدار آستانه گذر افزایش یافت. نتایج شبیه‌سازی دوبعدی کامپوزیت مذکور برای درجات مختلف کلوخه‌ای بودن نانولوله‌های کربن در بستر پلیمری نشان داد که با افزایش درجه کلوخه‌ای شدن کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن، رسانندگی الکتریکی آن به شدت کاهش یافته و برعکس با کاسته شدن از درجه کلوخه‌ای شدن نانولوله‌ها، به میزان همگنی آن افزوده شده، مقدار رسانندگی الکتریکی کامپوزیت افزایش می‌یابد. چندین کار تجربی و محاسباتی چنین نتایجی را برای کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربن به دست آورده‌اند که بر شبیه‌سازی رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر/نانولوله کربن با اهداف دزیمتری در حالات مختلف توزیع کلوخه‌ای نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری به روش المان محدود صحنه‌گذاری می‌کنند. مینیمم رسانندگی الکتریکی کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن به منظور بکارگیری در دزیمتری مربوط به حالتی است که در آن درصد وزنی نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری معادل آستانه گذر الکتریکی یا EPT باشد. هر چه درجه کلوخه‌ای شدن نانولوله‌های کربنی در بستر پلیمری کمتر باشد، یا به عبارتی هر چه پخش نانولوله‌های کربنی در زمینه پلیمری یکنواخت‌تر و همگن‌تر باشد، حساسیت‌پذیری کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن در مقابل پرتوهای یونساز افزایش بیشتری یافته، سیگنال مؤثرتری از طریق گردآوری بار ناشی از یونیزاسیون کامپوزیت مذکور فراهم خواهد شد که برای دزیمتری مناسب‌تر خواهد بود.

در محدوده آستانه گذر الکتریکی (EPT) قرار داشته باشد [۱۶]. چون مقادیر کمتر از EPT منجر به انباشته شدن الکترون-حفره‌های ناشی از پرتودهی در کامپوزیت مذکور خواهد شد که متعاقب آن میدان الکتریکی داخلی مربوط به الکترون-حفره‌های حاصل از یونش تابش گاما افزایش یافته، باعث تضعیف میدان الکتریکی خارجی و به دنبال آن اشباع و کاهش جریان الکتریکی کامپوزیت مذکور خواهد شد. همچنین مقادیر بیشتر از EPT نیز به علت افزایش مقدار جریان تاریک، پاسخ دز (جریان تابشی) کمتری در مقایسه با ناحیه EPT نشان خواهد داد. بنابراین بسته به نوع پلیمر و نانولوله کربن، مقدار EPT برای کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن متفاوت خواهد بود. پیش‌بینی مقدار EPT برای کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن و مقایسه با نتایج تجربی سایر مقالات توسط نویسندگان این مقاله اخیراً انجام شده است [۱۷]. همچنین اثر بستر پلیمری روی ویژگی‌های دزیمتری کامپوزیت پلیمر- نانولوله کربن در سال ۲۰۱۶ توسط نویسندگان این مقاله بررسی شد [۱۸].



شکل (۷): مقایسه رسانندگی الکتریکی کامپوزیت PS-CNT بر حسب درصد‌های وزنی مختلف برای درجات مختلف توزیع کلوخه‌ای.

۴. نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های پلیمر/نانولوله کربن قابلیت بکارگیری به عنوان دزیمتر را دارا هستند. به منظور دستیابی به این هدف، بایستی متذکر شد که نحوه پخش نانولوله‌ها، در تعیین ویژگی‌های

۵. مراجع

- [1] S. Iijima. Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354 (1991) 56-58.
- [2] P. Ajayan, O. Stephan, C. Colliex, and D. Trauth. Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite. *Science*, 265(1994)1212-1214.
- [3] K. Arbabi, M. M. Larijani, and M. Ramazanov. Evaluation of a new ionisation chamber fabricated with carbon nanotubes. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(2010) 222-227.
- [4] N. Yamamoto, R. Guzman de Villoria, and B. L. Wardle. Electrical and thermal property enhancement of fiber-reinforced polymer laminate composites through controlled implementation of multi-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 72 (2012) 2009-2015.
- [5] D. Moon, J. Obrzut, J. F. Douglas, T. Lam, K. K. Koziol, and K. B. Migler. Three dimensional cluster distributions in processed multi-wall carbon nanotube polymer composites. *Polymer*, 55 (2014) 3270-3277.
- [6] F. Puch and C. Hopmann. Morphology and tensile properties of unreinforced and short carbon fibre reinforced Nylon 6/multiwalled carbon nanotube-composites. *Polymer*, 55 (2014) 3015-3025.
- [7] D. Vennerberg, R. Hall, and M. R. Kessler. Supercritical carbon dioxide-assisted silanization of multi-walled carbon nanotubes and their effect on the thermo-mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Polymer*, 55 (2014) 4156-4163.
- [8] S. Gong, Z. H. Zhu, and S. A. Meguid. Anisotropic electrical conductivity of polymer composites with aligned carbon nanotubes. *Polymer*, 56 (2015) 498-506.
- [9] S. Malekie and F. Ziaie. Study on a novel dosimeter based on polyethylene-carbon nanotube composite. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 791 (2015) 1-5.
- [10] [۱۰] ملکی، شهریار. ضیائی، فرهود. مطالعه خواص الکتریکی یک دزیتر جدید بر پایه نانو کامپوزیت پلیمر-نانو لوله کربن. *مجله سنجش و ایمنی پرتو*، جلد ۲، شماره ۳، (۱۳۹۳) ۲۰-۱۷.
- [11] Z. Ounaies, C. Park, K. E. Wise, E. J. Siochi, and J. S. Harrison. Electrical properties of single wall carbon nanotube reinforced polyimide composites. *Composites Science and Technology*, 63 (2003) 1637-1646.
- [12] N. Hu, Z. Masuda, C. Yan, G. Yamamoto, H. Fukunaga, and T. Hashida. The electrical properties of polymer nanocomposites with carbon nanotube fillers. *Nanotechnology*, 19 (2008) 215701.
- [13] J. E. Mark. *Physical Properties of Polymers Handbook*. Ohio, Springer, 2007.
- [14] Y. S. Song and J. R. Youn. Influence of dispersion states of carbon nanotubes on physical properties of epoxy nanocomposites. *Carbon*, 43 (2005) 1378-1385.
- [15] Alamusi, N. Hu, H. Fukunaga, S. Atobe, Y. Liu, J. Li. Piezoresistive Strain Sensors Made from Carbon Nanotubes Based Polymer Nanocomposites. *Sensors*, 11 (2011) 10691.
- [16] S. Malekie, F. Ziaie, S. Feizi, A. Esmali. Dosimetry characteristics of HDPE-SWCNT nanocomposite for real time application. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 833 (2016) 127-133.
- [17] S. Malekie, F. Ziaie. A two-dimensional simulation to predict the electrical behavior of carbon nanotube/polymer composites. *Journal of Polymer Engineering*, (2016).
- [18] S. Malekie, F. Ziaie, A. Esmali. Study on dosimetry characteristics of polymer-CNT nanocomposites: Effect of polymer matrix. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 816 (2016) 101-105.