

مقایسه تجربی پاسخ آشکارسازی و دزیمتری میکرو/نانو کامپوزیت پلی وینیل الکل - اکسید تنگستن به پرتوهای گاما و نوترون

شهریار ملکی^{۱*}، سیدمهدی هاشمی دیزجی^۱، فرهود ضیائی^۱، فریده کاظمی^۲ و سیدمحمدامین حسینی^۳

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، البرز، ایران.
^۲ گروه مهندسی هسته‌ای (پرتوپزشکی)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ارسنجان، ارسنجان، فارس، ایران.
^۳ مرکز تحقیقات حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز و غیر یون‌ساز، دانشگاه علوم پزشکی شیراز، شیراز، فارس، ایران.
^{*} البرز، کرج، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کد پستی: ۳۱۴۸۵-۴۹۸

پست الکترونیکی: smaleki@aeoi.org.ir

چکیده

اخیراً نانوکامپوزیت‌های پلیمری به منظور آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای گاما مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما به علت دارا بودن سطح مقطع جذب فوتونی پایین، حساسیت‌پذیری کمی نسبت به پرتوهای گاما نشان می‌دهند. به منظور غلبه بر این مشکل، ذرات اکسید فلزی با عدد اتمی بالا به ماتریس پلیمری افزوده می‌گردند. بدین منظور در این کار تجربی ذرات اکسید تنگستن (WO_3) به دو شکل نانو و میکرو در ماتریس پلی وینیل-الکل (PVA) با درصد وزنی ۲۰ wt% پخش شدند. در ساخت کامپوزیت (WO_3 -PVA (۲۰ wt%)) از روش محلولی بهره‌گیری شد. آزمون FESEM به منظور بررسی ریخت‌شناسی کامپوزیت مذکور صورت گرفت که بر پخش نانو/میکرو ذرات اکسید تنگستن در بستر پلیمری صحنه‌گذاری نمود. بازده کوانتومی تضعیف فوتون‌های گاما مربوط به چشمه ^{60}Co برای کامپوزیت مذکور با استفاده از کد MCNP محاسبه شد که همخوانی قابل قبولی با نتایج XCOM نشان داد. از جمله عوامل مؤثر در پاسخ آشکارسازی و دزیمتری این دسته کامپوزیت‌ها، تغییر جریان الکتریکی کامپوزیت در اثر جذب پرتو است. جریان تاریک و جریان تابشی نانو/میکرو کامپوزیت اکسید تنگستن-پلی وینیل‌الکل تحت پرتودهی گاما و نوترون به ترتیب مربوط به چشمه‌های ^{60}Co و $^{241}Am-Be$ توسط الکترومتر به روش دو پروبی در ولتاژهای ۱۰۰ و ۴۰۰ ولت اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری نشان داد که حساسیت‌پذیری نانوکامپوزیت نسبت به پرتوهای گاما بهتر از میکروکامپوزیت مذکور است. همچنین نسبت علامت به نوفه برای نمونه نانوکامپوزیت تحت پرتودهی گاما در محدوده آهنگ دز ۱۳۸-۹۰ mGy/min به صورت خطی از ۵ تا ۴۰ افزایش یافت در حالی که کامپوزیت مذکور پاسخ قابل ملاحظه‌ای به پرتوهای نوترون نشان نداد.

کلیدواژه‌گان: پلی وینیل‌الکل، اکسید تنگستن، میکرو، نانو، آشکارسازی و دزیمتری.

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های پلیمری با توجه به قابلیت به‌کارگیری در حفاظت‌سازی، آشکارسازی و دزیمتری تابش‌های یون‌ساز، توجه محققین علوم هسته‌ای را به خود معطوف ساخته است [۱-۱۳]. این گونه مواد دارای مزایای فراوانی مانند سبکی، انعطاف‌پذیری، سهولت در فرآوری، دارا بودن چگالی معادل بافت و هزینه نسبتاً پایین هستند. آشکارسازها و دزیمترهای تابشی به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: فعال و غیر فعال. اکثر سیستم‌های رایج در زمینه آشکارسازی و دزیمتری تابش‌های یون‌ساز مانند فیلم دزیمترها و مواد ترمولومینسانس معمولاً با چندین نقایص همراه هستند از جمله ناتوانی در تولید علامت هم‌زمان، پیچیدگی در تولید، گران‌بودن، حساسیت پایین برای تابش‌های ذرات غیرباردار و محدودیت‌های مربوط به حجیم‌بودن سیستم. بدین منظور برای رفع این نقایص و ساخت یک سیستم آشکارسازی یا دزیمتری فعال که در صورت تجاوز از حد بحرانی آهنگ دز آستانه، سیستم هشداردهنده صوتی/تصویری شروع به کار کند، استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری یک گزینه مناسب تلقی می‌گردد. از جمله عوامل مؤثر در پاسخ آشکارسازی کامپوزیت‌های پلیمری، تغییر جریان الکتریکی کامپوزیت در اثر جذب پرتو است.

نویسندگان در کارهای قبلی آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای گاما در کامپوزیت‌های پلیمری حاوی نانولوله کربن و گرافن را مطالعه نمودند [۱۴-۱۸]. همچنین ویژگی‌های دزیمتری کامپوزیت پلی متیل متاکریلات اخیراً توسط نویسندگان به روش المان محدود شبیه‌سازی شده است [۲۴]. یک آشکارساز تابشی باید دارای ویژگی‌هایی باشد از جمله: دارا بودن جریان تاریک^۱ پایین (جریان در غیاب تابش)، خطی

بودن پاسخ آشکارساز، تحرک‌پذیری بالای حامل‌های بار و توان توقف بالا برای پرتوهای یون‌ساز. کامپوزیت‌های پلیمری به علت دارا بودن سطح مقطع جذب فوتونی پایین، حساسیت-پذیری کمی نسبت به پرتوهای گاما نشان می‌دهند. این مشکل را می‌توان از طریق افزودن ذرات اکسید فلزی سنگین با عدد اتمی بالا به ماتریس پلیمری بر طرف نمود. در واقع ذرات اکسید فلزی سنگین به علت در بر داشتن ضریب تضعیف خطی بالاتر برای پرتوهای گاما از طریق اثر فوتوالکتریک گزینه مناسبی برای افزایش حساسیت‌پذیری کامپوزیت‌های مذکور به عنوان آشکارساز و دزیمتر به شمار می‌روند. در این میان نانو ذرات اکسید فلزی به علت دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا و سطح مقطع اندرکنشی فوق العاده با فوتون‌ها نسبت به میکروذرات ضریب تضعیف بالاتری دارند. پژوهشگرانی در سراسر دنیا روی موضوع آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری کار کرده‌اند. اثر نانو ذرات اکسید بیسموت (Bi_2O_3) بر حساسیت‌پذیری آشکارسازهای اشعه ایکس با استفاده از پلیمر نیم‌رسانای PTAA مطالعه شده است [۹]. آشکارسازی الکترون و ذرات آلفا با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹، ۲۰]. در زمینه آشکارسازی نوترون با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری نیز چندین کار پژوهشی صورت گرفته است [۷، ۲۱، ۲۲].

در این کار تجربی اکسید تنگستن (WO_3) با چگالی $7/16 \text{g/cm}^3$ (تنگستن با اعداد اتمی ۷۴) به عنوان ماده پرکننده و پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به این دلیل که ماده‌ای غیرسمی، زیست سازگار و محلول در آب است، به عنوان زمینه پلیمری کامپوزیت انتخاب شد. بدین منظور پاسخ آشکارسازی کامپوزیت PVA- WO_3 (۲۰ wt%) برای پرتوهای گاما و

^۱ Dark current

برای پرتودهی نوترون استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری جریان الکتریکی نمونه‌ها مطابق شکل ۳ از دستگاه الکترومتر مدل Supermax Standard Imaging واقع در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه سازمان انرژی اتمی کرج استفاده گردید.

۳. نتایج

توانایی یک ماده مشخص در تضعیف پرتوهای ایکس یا گاما بازده کوانتومی تضعیف^۱ (QE) نامیده شده و توسط معادله زیر بیان می‌شود [۲۳]:

$$QE = \left(1 - e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho x} \right) 100\% \quad (1)$$

که $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ ضریب تضعیف خطی ماده بوده که از طریق پایگاه-های داده مربوط به تضعیف فوتون یا از طریق محاسبات مونت کارلو در دسترس است، که در آن ρ و x به ترتیب چگالی و ضخامت ماده است.



(ب)

(الف)

شکل (۱): نمایی از کامپوزیت‌های (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در دو حالت (الف) میکرو و (ب) نانو و لایه‌نشانی چسب نقره روی آن‌ها.

نوترون به ترتیب مربوط به چشمه‌های ⁶⁰Co و ²⁴¹Am-Be مورد بررسی قرار گرفت.

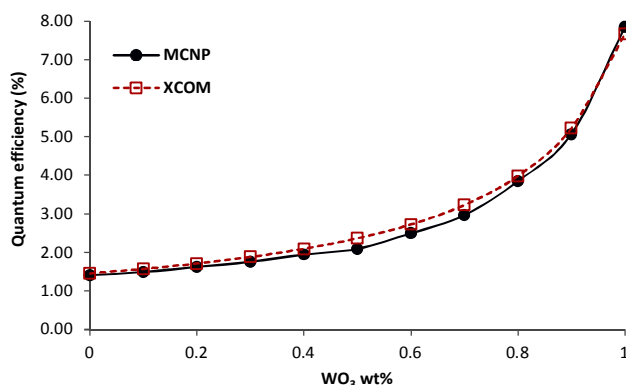
۲. روش کار

به منظور ساخت کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ پلی-وینیل‌الکل (PVA) از پتروشیمی تولید داخل تهیه شد. میکروذرات WO₃ با اندازه کمتر از ۲۰ μm و به رنگ زرد کم‌رنگ و نانوذرات WO₃ با اندازه بین ۲۰۰-۶۰ nm با رنگ سبز کم‌رنگ هر دو به صورت پودر از شرکت سیگما آلد ریچ تهیه شدند. آب مقطر به‌عنوان حلال PVA استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری رسانندگی الکتریکی کامپوزیت مذکور، چسب نقره آمریکایی Chemtronics تهیه گردید. به منظور ساخت کامپوزیت PVA-WO₃ در ابتدا پلیمر PVA در آب مقطر به کمک هم‌زن مغناطیسی در دمای ۸۰°C حل شده، هم-زمان در ظرف دیگری پودر WO₃ در آب مقطر توسط حمام اولتراسونیک به مدت یک ساعت در فرکانس ۴۰ kHz فراصوت‌دهی شد، تا اینکه پودر مذکور کاملاً در آب پخش گردید. در نهایت این دو ظرف با یکدیگر مخلوط شده، درون قالب سیلیکون ریخته شده، سپس در آن ۹۰°C به مدت یک شبانه‌روز قرار گرفت تا حلال کاملاً خارج گردید. در نهایت کامپوزیت‌های مذکور در حالت میکرو و نانو به ترتیب با ضخامت‌های ۲/۶۳ و ۲/۱۲ میلی‌متر مطابق شکل ۱ تشکیل شد که پس از لایه‌نشانی با چسب نقره آماده استفاده گردید. نمایی از سیستم‌های پرتودهی گاما و نوترون در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور پرتودهی گاما از چشمه Picker V9 بهره‌گیری شد که در ¹SSD، ۸۰ cm آهنگ دز پرتوهای گاما برابر ۷۸ mGy/min است. همچنین از چشمه ²⁴¹Am-Be با متوسط انرژی نوترون‌های خروجی ۵ MeV و اکتیویته ۵ Ci

² Quantum Efficiency

¹ Source to Surface Distance

در شکل ۵ برای کامپوزیت PVA-WO₃ بازده کوانتومی با محاسبه ضریب تضعیف خطی با استفاده از کد MCNP و XCOM از طریق جایگذاری در رابطه ۱ بدست آمده‌اند. محاسبات QE برای کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ نشان می‌دهد که مقدار بازده کوانتومی برای پرتوهای گامای ⁶⁰Co با انرژی متوسط ۱/۲۵ MeV در حدود ۱/۷٪ است. از شکل ۵ پیداست که بازده کوانتومی برای کامپوزیت PVA-WO₃ به درصد وزنی ذرات WO₃ وابسته بوده و با افزایش درصد وزنی ذرات مذکور افزایش می‌یابد.



شکل (۵): بازده کوانتومی نظری تضعیف نمونه کامپوزیتی (۲۰ wt%) PVA-WO₃ با ضخامت ۰/۲ cm برای پرتوهای گامای ⁶⁰Co با انرژی متوسط ۱/۲۵ MeV با استفاده از داده‌های XCOM و MCNP [۲۳].

از رابطه ۱ پیداست که با افزایش ضخامت کامپوزیت و درصد وزنی ذرات پرکننده، مقدار QE افزایش می‌یابد. در شرایطی که مقدار QE ثابت باشد، برای ضخامت‌های کم، درصد وزنی ذرات پرکننده باید بالا باشد تا به یک QE معقول برای انرژی مشخصی از تابش ایکس یا گاما دست یافت. پیشنهاد می‌شود به منظور افزایش درصد بازدهی کوانتومی QE از درصد‌های وزنی بالاتر ذرات اکسید تنگستن یا حتی اکسیدهای فلزی سنگین‌تر مانند Bi₂O₃ استفاده گردد. پس از ساخت کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در دو حالت میکرو و نانو، به منظور اطمینان از ساختار ماده و نحوه پخش



(ب)

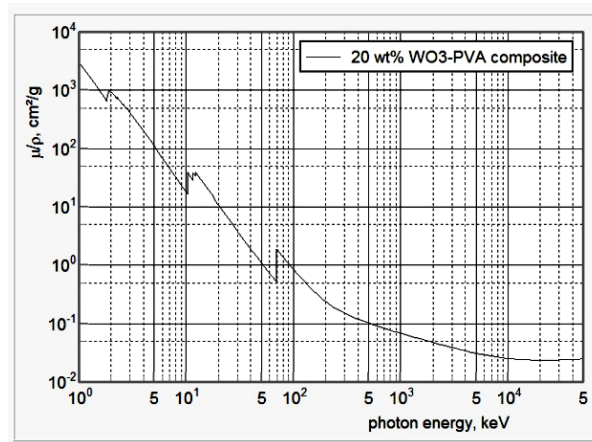
(الف)

شکل (۲): سیستم‌های پرتوهای (الف) گاما (Picker V9) (ب) نوترون ²⁴¹Am-Be.



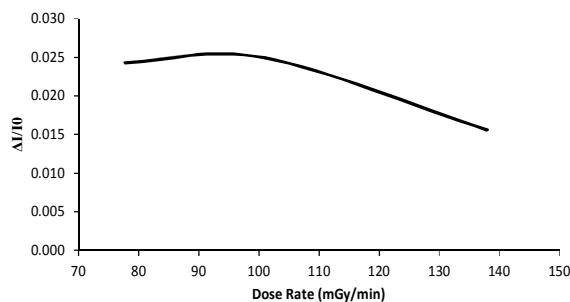
شکل (۳): نمایی از دستگاه الکترومتر به منظور اندازه‌گیری جریان الکتریکی نمونه‌ها.

در شکل ۴ مقدار ضریب تضعیف خطی کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در انرژی‌های مختلف فوتون با استفاده از داده‌های XCOM به تصویر کشیده شده است. همان‌طوری که از این شکل پیداست، با افزایش انرژی فوتون‌های فرودی بر ماده کامپوزیتی فوق، مقدار ضریب تضعیف خطی کاهش پیدا می‌کند.

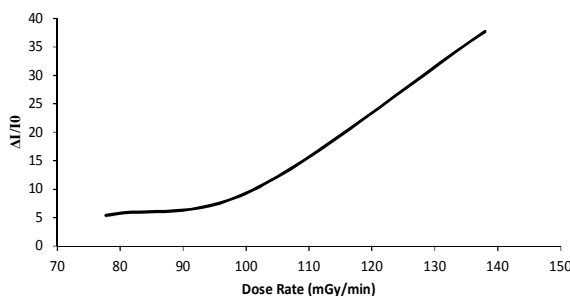


شکل (۴): ضریب تضعیف خطی کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در انرژی‌های مختلف فوتون با استفاده از داده‌های XCOM [۲۳].

مطابق جدول ۱ مقدار هدایت الکتریکی نانو کامپوزیت مذکور حدوداً یک-سوم این مقدار برای نمونه میکروست. این مطلب نشان می‌دهد که جریان تاریک یعنی جریان در غیاب پرتو برای نمونه نانو کم‌تر از نمونه میکرو بوده که برای آشکارسازی پرتوهای یون‌ساز مناسب‌تر است. یکی از مهم‌ترین فاکتورهایی که یک ماده برای آشکارسازی تابش‌های یون‌ساز باید دارا باشد، نسبت علامت به نوفه بالاست. بدین منظور نسبت علامت به نوفه یعنی نسبت جریان تابشی^۱ به جریان تاریک $\Delta I/I_0 = (I - I_0)/I_0$ برای کامپوزیت WO₃-PVA در دو حالت میکرو و نانو در محدوده آهنگ دز ۷۸-۱۳۸ mGy/min برای پرتوهای گامای چشمه ⁶⁰Co اندازه‌گیری شد. در واقع $\Delta I/I_0$ بیانگر مفهومی است که نشان می‌دهد تغییرات جریان در اثر پرتودهی یا همان جریان تابشی چند برابر جریان تاریک (I_0) است. در شکل‌های ۷ و ۸ نمودار $\Delta I/I_0$ بر حسب آهنگ دز برای نمونه‌های میکرو و نانو به تصویر کشیده شده است.

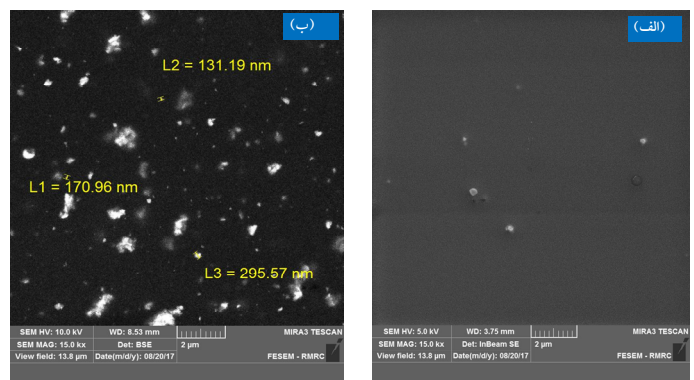


شکل (۷): تغییر جریان بر حسب آهنگ دز تابشی برای نمونه Micro ۲۰ wt% WO₃-PVA



شکل (۸): تغییر جریان بر حسب آهنگ دز تابشی برای نمونه Nano ۲۰ wt% WO₃-PVA

ذرات پرکننده اکسید تنگستن در بستر پلیمری، مطابق شکل ۶ از آزمون FESEM بهره‌گیری شد. شکل ۶-الف میکروذرات اکسید تنگستن را در بستر PVA به تصویر می‌کشاند، به نظر می‌رسد ابعاد ذرات اکسید تنگستن کم‌تر از میکرومتر باشد، البته در گواهی مربوط به ماده تهیه شده از شرکت تجاری، اندازه ذرات میکرو کم‌تر از ۲۰ μm قید گردیده بود. این احتمال وجود دارد که در اثر فراصوت دهی در حمام اولتراسونیک، اندازه ذرات اندکی کاهش یافته باشند، کما اینکه در مورد کاهش طول نانو لوله‌های کربنی به واسطه فراصوت دهی نیز گزارشاتی وجود دارد [۲۵]. پس از مرحله ساخت کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃، مقاومت و هدایت الکتریکی آن در دو حالت میکرو و نانو ذرات اکسید تنگستن توسط دستگاه Insulator Tester اندازه‌گیری شد که در جدول ۱ ذکر گردیده است.



شکل (۶): آنالیز FESEM برای نمونه (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در دو حالت الف) میکرو و ب) نانو (سایز ذرات اکسید تنگستن نمایش داده شده است).

جدول (۱): مقاومت و هدایت الکتریکی کامپوزیت (۲۰ wt%) PVA-WO₃ در دو حالت نانو و میکرو ذرات اکسید تنگستن.

نمونه	R (MΩ)	σ (S/m)
۲۰ wt% Nano WO ₃ -PVA	۲۳۰۰	$1/38 \times 10^{-8}$
۲۰ wt% Micro WO ₃ -PVA	۸۰۰	$3/97 \times 10^{-8}$

¹ Photocurrent

به وضوح پیدا است که پاسخ آشکارسازی نانوکامپوزیت به پرتوهای گاما بهتر از نمونه میکرو است. دلیل اشباع پاسخ دز در نمونه میکرو را چنین می‌توان توجیه نمود که در واقع نانو ذرات WO_3 به خاطر در بر داشتن نسبت سطح به حجم بالاتر در مقایسه با میکروذرات مشابه و همچنین افزایش میزان برخورد ها و پراکندگی بیشتر فوتون‌ها، سطح مقطع جذب فوتونی بیشتری داشته و نسبت علامت به نوفه بالاتری را نشان می‌دهد که این موضوع در مورد اشباع پاسخ دز میکرو ذرات اکسید تنگستن قابل توجیه است [۲۶]. در ادامه بار الکتریکی نمونه کامپوزیتی ابتدا در غیاب نوترون و سپس در حضور نوترون‌های چشمه $^{241}Am-Be$ (نوترون‌های حرارتی و سریع) در دمای اتاق در ولتاژ $400 V$ به روش دو پروبی با الکترومتر در بازه‌های زمانی ۱۵ ثانیه‌ای قرائت گردید که به منظور کندی سازی نوترون، از فانتوم آب نیز بهره‌گیری شد. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، اندازه‌گیری‌ها سه بار تکرار شد. مقدار بار الکتریکی در غیاب نوترون برابر $1/755 \mu C$ اندازه‌گیری شد، سپس کامپوزیت مذکور با فانتوم آب و بدون آن تحت پرتودهی نوترون در فواصل $30 cm$ و $100 cm$ از چشمه نوترون قرار گرفت که در تنظیم فواصل از باریکه لیزر استفاده شد.

نتایج اندازه‌گیری نشان داد که کامپوزیت مذکور پاسخ قابل ملاحظه‌ای به نوترون نمایش نمی‌دهد. دلیل این امر می‌تواند به خاطر دز بسیار پایین چشمه نوترون مورد استفاده و حساسیت کم آشکارساز پلیمر-نانو لوله‌کربن برای پرتوهای نوترون باشد. این نکته که کامپوزیت مذکور به پرتوهای نوترون پاسخ قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهد، می‌تواند در میدان‌های مخلوط گاما-نوترون کاربرد داشته باشد، بدین صورت که با آشکارساز دیگری که به نوترون حساس باشد به طور هم‌زمان در یک سیستم اندازه‌گیری قرار گیرد.

به‌منظور آشکارسازی پرتوهای نوترون، خصوصاً نوترون-های حرارتی، باید از سایر مواد دارای سطح مقطع جذب نوترونی بالا نظیر 3He ، 6Li ، ^{10}B ، ^{113}Cd ، ^{135}Xe و ^{157}Gd در کامپوزیت استفاده نمود. همچنین حضور یک ماده جاذب مثل آب یا پلیمرهایی نظیر پلی اتیلن برای کندکردن نوترون‌های سریع و تبدیل آن‌ها به نوترون‌های حرارتی مورد نیاز است که ضخامت آن از طریق شبیه‌سازی مونت کارلو قابل محاسبه است. مطالعاتی در این زمینه توسط نویسندگان در حال انجام است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این کار تجربی کامپوزیت $PVA-WO_3$ (۲۰ wt%) به منظور آشکارسازی و دزیمتری هم‌زمان پرتوهای گامای مربوط به چشمه ^{60}Co و نوترون‌های چشمه $^{241}Am-Be$ به روش محلولی ساخته شد. نحوه پخش نانو/میکرو ذرات اکسید تنگستن در بستر پلی‌وینیل‌الکل بر پخش همگن نانو/میکرو ذرات مذکور در ماتریس پلیمری دلالت داشت. در مورد پرتودهی گاما نسبت علامت به نوفه در ولتاژ $100 V$ برای نمونه‌های میکرو و نانو در محدوده آهنگ دز $78-138 mGy/min$ اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که نسبت علامت به نوفه در نانوکامپوزیت مذکور تحت پرتودهی گاما در محدوده آهنگ دز $90-138 mGy/min$ به صورت خطی از ۵ تا ۴۰ افزایش می‌یابد، در حالی که میکرو کامپوزیت مذکور در شرایط یاد شده پاسخ ضعیفی داشته و اشباع می‌گردد. با توجه به اینکه آزمون‌های نوعی اولیه این آشکارساز در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کرج (SSDL) صورت گرفته و برای آهنگ‌های دز (یا SSD های مختلف) محدوده آهنگ دزهای مربوط به رادیوتراپی یعنی چند ده میلی‌گری بر دقیقه، رفتار آن به صورت خطی بوده و لذا در یک SSD ثابت که آهنگ دز ثابت است، مقدار دز را می‌توان به صورت حاصل‌ضرب آهنگ

عدم پاسخ قابل ملاحظه این کامپوزیت به پرتوهای نوترونی تأثیرگذار باشد. حساسیت ضعیف نانو کامپوزیت پلیمری مذکور به نوترون‌ها را می‌توان از طریق افزودن مواد دارای سطح مقطع جذب نوترونی بالا به کامپوزیت مذکور مرتفع نمود.

پیشنهاد می‌گردد در پژوهش‌های آتی به منظور آشکارسازی پرتوهای نوترون، خصوصاً نوترون‌های حرارتی، سایر مواد دارای سطح مقطع جذب نوترونی بالا نظیر ^{10}B ، ^6Li ، ^3He ، ^{113}Cd ، ^{135}Xe و ^{157}Gd در کامپوزیت مذکور استفاده گردد. این نتایج نشان داد که افزودن نانوذرات با عدد اتمی بالا به ماتریس پلیمری می‌تواند از طریق افزایش بازده کوانتومی جذب تابش‌های ایکس و گاما منجر به افزایش حساسیت-پذیری و افزایش نسبت علامت به نوفه در سیستم‌های آشکارسازی و دزیمتر مبتنی بر نانو کامپوزیت‌های پلیمری-اکسید فلزی گردد.

دز در زمان پرتودهی گزارش نمود. در واقع نانو کامپوزیت پلیمر-نانولوله کربن یک دزیمتر فردی نیست که مقدار دز را به صورت تجمعی گزارش نماید، بلکه به نوعی یک دزیمتر محیطی بوده که آهنگ دز را در سطح رادیوتراپی (mGy/min) اندازه‌گیری می‌کند، شایان ذکر است که به منظور افزایش حساسیت دزیمتر یا به نوعی اندازه‌گیری آهنگ‌های دز پایین‌تر، بایستی پارامترهای مختلفی را بررسی نمود، از جمله: نوع نانو ذره، درصد وزنی نانو ذرات افزوده شده به بستر پلیمر، ضخامت نانو کامپوزیت، مقدار ولتاژ اعمالی، بلورینگی بستر پلیمری و سایر عوامل مرتبط. همچنین نتایج پرتودهی نوترون بر کامپوزیت‌های مذکور نشان داد که این کامپوزیت‌ها به پرتوهای نوترون پاسخ قابل ملاحظه‌ای نشان نمی‌دهند که این امر می‌تواند به پارامترهای مختلفی بستگی داشته باشد، از جمله اکتیویته ضعیف چشمه نوترونی مورد استفاده که می‌تواند در

۵. مراجع

- [1] O. Korostynska, K. Arshak, D. Morris, A. Arshak and E. Jafer. Radiation-induced changes in the electrical properties of carbon filled PVDF thick films. *Materials Science and Engineering: B*, 141 (2007) 115–120.
- [2] F. Salimi-Ahmadabad, S. Malekie and F. Ziaie. The investigation of reinforcement phase distribution on electrical conductivity of Polymer-Carbon nanotube composite as radiation dosimeter: A Monte Carlo Method. *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement*, 4 (2016) 49–55.
- [3] S. Feizi, S. Malekie, R. Rahighi, A. Tayyebi and F. Ziaie. Evaluation of dosimetric characteristics of graphene oxide/PVC nanocomposite for gamma radiation applications. *fact*, 105 (2017) 161–170.
- [4] S. Malekie and N. Hajiloo. Comparative Study of Micro and Nano Size $\text{WO}_3/\text{E44}$ Epoxy Composite as Gamma Radiation Shielding Using MCNP and Experiment. *Chinese Physics Letters*, 34 (2017) 108102.
- [5] T. Özdemir, A. Güngör and İ. Reyhancan. Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide: Mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests. *Radiation Physics and Chemistry*, 131 (2017) 7–12.
- [6] A. Mosayebi, S. Malekie and F. Ziaie. A feasibility study of polystyrene/CNT nano-composite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes. *Journal of Instrumentation*, 12 (2017) P05012.
- [7] C. Tan, R. James, B. Dong, M.S. Driver, J.A. Kelber, G. Downing and L.R. Cao. Characterization of a boron carbide-based polymer neutron sensor. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 803 (2015) 82–88.
- [8] S. Kyatsandra and R. Wilkins. Total Ionizing Dose X-ray Radiation Effects on MWCNT/PMMA Thin Film Composites. *Nanotechnology, IEEE Transactions on*, 14 (2015) 152–158.

- [9] A. Intaniwet, C.A. Mills, M. Shkunov, P.J. Sellin and J.L. Keddie. Heavy metallic oxide nanoparticles for enhanced sensitivity in semiconducting polymer x-ray detectors. *Nanotechnology*, 23 (2012) 235502.
- [10] J. Lobez and Timothy M. Swager. Radiation Detection: Resistivity Responses in Functional Poly(Olefin Sulfone)/Carbon Nanotube Composites. *Angewandte Chemie International Edition*, 49.1 (2010) 95–98.
- [11] F.A. Boroumand, M. Zhu, A.B. Dalton, J.L. Keddie and P.J. Sellin. Direct x-ray detection with conjugated polymer devices. *Applied Physics Letters*, 91 (2007).
- [12] M.S. Saavedra. Novel Organic Based Nano-composite Detector Films: The Making and Testing of CNT Doped Poly(acrylate) Thin Films on Ceramic Chip Substrates. Department of Physics, University of Surrey, Guildford, Surrey, (2005) 37.
- [13] L. Ran, G. Yizhuo, W. Yidong, Y. Zhongjia, L. Min and Z. Zuoguang. Effect of particle size on gamma radiation shielding property of gadolinium oxide dispersed epoxy resin matrix composite. *Materials Research Express*, 4 (2017) 035035.
- [14] S. Malekie, F. Ziaie, S. Feizi and A. Esmaeli. 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.
- [15] S. Malekie and F. Ziaie. A two-dimensional simulation to predict the electrical behavior of carbon nanotube/polymer composites. *Journal of Polymer Engineering*, 37(2016) 205–210.
- [16] S. Malekie, F. Ziaie and A. Esmaeli. 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.
- [17] 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.
- [18] F. Ziaie and S. Malekie. Study of electrical properties of a novel dosimeter based on polymer-carbon nanotube nano-composite. *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement*, 2 (2014) 17–20.
- [19] P. Beckerle and H. Ströbele. Charged particle detection in organic semiconductors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 449 (2000) 302–31.
- [20] D. Natali and M. Sampietro. Detectors based on organic materials: status and perspectives. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 512 (2003) 419–426.
- [21] N. Hong. An Exploration of Neutron Detection in Semiconducting Boron Carbide. Theses, Dissertations, and Student Research: Department of Physics and Astronomy, University of Nebraska - Lincoln, (2012).
- [22] C. Kimblin, Contributors, K. Miller, B. Vogel, B. Quam, H. McHugh, G. Anthony, S. Jones and M. Grover. STL-20 : Conducting Polymers for Neutron Detection Principal Investigator. DOE/NV/25946--330.
- [23] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker and K. Olsen, "XCOM Photon Cross Sections Database," (1998).
- [۲۴] ملکی، شهریار. ضیائی، فرهود. مجتهدزاده لاریجانی، مجید. شبیه‌سازی یک دزیمر جدید بر پایه ویژگی‌های الکتریکی کامپوزیت پلی متیل متاکریلات-نانولوله‌کربن. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*. شماره ۷۹، (۱۳۹۶) ۶۲–۵۳.
- [25] Y. Wang, J. Wu and F. Wei. A treatment method to give separated multi-walled carbon nanotubes with high purity, high crystallization and a large aspect ratio. *Carbon*, 41 (2003) 2939–2948.
- [26] S. Nambiar and J.T. Yeow. Polymer-composite materials for radiation protection, *ACS applied materials & interfaces*, 4 (2012) 5717–5726.