



بررسی تجربی پاسخ آشکارسازی ماده نانوکامپوزیت پلی کربنات/نانو اکسید بیسموت به پرتوهای بتای چشمه استاندارد استرانسیوم-۹۰

سید موسی صفدری^۱، شهریار ملکی^{۲*}، صدیقه کاشیان^۲، مرتضی اکبری^۱

۱. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران - ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۳۱۴۸۵-۴۹۸، کرج - ایران

چکیده:

در این پژوهش تجربی، ماده نانوکامپوزیت پلی کربنات/نانو اکسید بیسموت (PC/Bi₂O₃) با درصد وزنی 50 wt% به روش محلولی در ابعاد 4 cm×4 cm و ضخامت 1 mm تهیه شد. آزمون SEM از پخش همگن نانو ذرات Bi₂O₃ در بستر پلی کربنات حکایت داشت. در ادامه الکترودهایی از جنس مس با استفاده از چسب نقره در سطوح بالا و پایین نمونه ساخته شد. سپس نمونه مذکور تحت پرتودهی چشمه استاندارد بتازای استرانسیوم-90 (⁹⁰Sr) در فواصل مختلف در هوا قرار گرفت. در اثر پرتودهی نمونه، مقدار تغییرات جریان الکتریکی عبوری از نمونه توسط الکترومتر در ولتاژ 400 V و در بازه‌های زمانی 15 ثانیه‌ای ثبت و تکرارپذیری آن چهار بار بررسی شد. نمودار I-V در ولتاژهای مختلف در محدوده 100-1000 V در SSD=30 cm ترسیم شد که به صورت خطی و بدون اشباع گزارش گردید. نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ آشکارسازی این ماده به پرتوهای بتای ⁹⁰Sr در محدوده آهنگ دز 1-2.3 mSv/h با ضریب همبستگی 0.99~R² به صورت خطی است.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز، نانوکامپوزیت پلی کربنات/نانو اکسید بیسموت، پرتوهای بتا، چشمه استرانسیوم-90، خطی بودن

Experimental investigation of detection response of polycarbonate/Nano Bismuth Oxide nanocomposite to Strontium-90 beta ray standard source

Seyed Musa Safdari¹, Shahryar Malekie^{2*}, Sedigheh Kashian², Morteza Akbari¹

1. Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.BOX: 31485-498, Karaj, Iran.

Abstract:

In this experimental research, Polycarbonate/Nano Bismuth Oxide nanocomposite (PC/Bi₂O₃) material at 50 wt% of the inclusions with dimensions of 4 cm×4 cm and thickness of 1 mm was prepared using the solution method. SEM test showed a uniform dispersion of Bi₂O₃ nanoparticles into the PC matrix. Then, copper electrodes were inserted on the upper and lower surfaces of the sample using the silver paste. The sample was then irradiated with a Strontium-90 (⁹⁰Sr) beta emitter standard source at various distances in air. Due to the irradiation of the sample, the electric current variation passing through the sample was recorded by the electrometer at a voltage of 400 V at time intervals of 15 seconds and its repeatability was controlled four times. I-V plots were reported at different voltages in the range of 100-1000 V at SSD = 30 cm, which were reported linearly without saturation. The results of this study showed that the detection response of this material to ⁹⁰Sr beta rays in the dose rate ranging from 1-2.3 mSv/h with a correlation coefficient of R²~0.99 was linear.

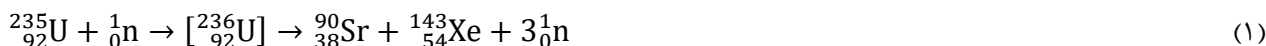
Keywords: Detector, Polycarbonate/Nano Bismuth Oxide nanocomposite, Beta rays, Strontium-90 Source, Linearity

Email: smaleki@aeoi.org.ir

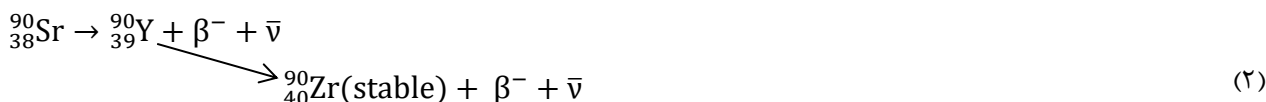
۱. مقدمه

نانوکامپوزیت های پلیمری به خاطر سبکی، سهولت در فراوری و هزینه نسبتاً پایین، از طریق افزودن موادی که دارای سطح مقطع جذب بالایی برای پرتوهای یون ساز هستند، این ویژگی را دارند تا بتوانند در سیستم‌های آشکارسازی بکار روند. از جمله عوامل مؤثر در پاسخ آشکارسازی مواد نانوکامپوزیت، تغییر جریان الکتریکی در اثر جذب پرتو است. در سالهای اخیر، ویژگی‌های آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای گاما با استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری در داخل و خارج از کشور بررسی شده است [۹-۱۱]. در زمینه آشکارسازی پرتوهای بتا، معمولاً از سوسوزن های مایع بدین منظور استفاده می‌شود. هدف اصلی از انجام این پژوهش، طراحی و ساخت یک آشکارساز حالت جامد بتا به منظور اندازه‌گیری مقدار آهنگ دز چشمه‌های بتا با صورت برخط است. ماده به کار گرفته شده در نوع خود جدید بوده و از نانوکامپوزیت پلی کربنات/نانو اکسید بیسموت ($PC-Bi_2O_3$) استفاده شده است. دلیل انتخاب پلی کربنات به عنوان بستر پلیمری این است که PC اساساً یک پلیمر آمورف است که انتظار می‌رود فصل مشترک مناسب‌تری با نانو ذرات اکسید بیسموت برقرار نماید، به این دلیل که نواحی بلوری پلیمر اغلب نانوذرات را پس زده، لذا نانوذرات مذکور در نواحی آمورف پخش می‌شوند. به طور کلی یک پلیمر از دیدگاه ساختار مولکولی از دو فاز بلوری و آمورف تشکیل شده است. در فاز بلوری، بلورها یا کریستال‌ها به صورت زنجیره‌های پلیمری منظمی تحت عنوان لاملا^۱ به طول 20-60 nm و با فاصله 0.736 nm از یکدیگر قرار گرفته‌اند [۱۰]. از آنجا که در این پروژه از افزودنی Bi_2O_3 با قطر بین 90-210 nm استفاده شده است، بنابراین احتمال ورود نانو ذرات Bi_2O_3 به ناحیه بلوری پلیمر بسیار ضعیف بوده و این ذرات به جای گیری در بخش آمورف تمایل داشته و از طریق فرآیند هسته‌سازی^۲ مقدار بلورینگی پلیمر را افزایش می‌دهند؛ بنابراین احتمال افزایش بلورینگی پلی کربنات به واسطه افزودن نانو ذرات Bi_2O_3 به آن تقویت می‌شود؛ ضمن اینکه مواد پلاستیکی سبک نظیر پلیمرها، با توجه به برد نسبتاً کم پرتوهای بتا در مقایسه با پرتوهای گاما، جاذب بسیار خوبی برای پرتوهای بتا هستند.

چشمه بتازای ^{90}Sr در راکتور از طریق واکنش شکافت هسته‌ای ^{235}U تولید می‌شود [۱۱]:



مکانیسم واپاشی چشمه بتازای ^{90}Sr به صورت زیر است:



چشمه بتازای ^{90}Sr با نیمه عمر 28.78 سال به ^{90}Y واپاشی می‌شود که انرژی ذرات بتای آن برابر 546.2 keV است؛ در ادامه ^{90}Y که گسیلنده بتا و گاما است (طیف آن در چشمه ^{90}Sr ظاهر می‌شود)، با نیمه عمر 64 ساعت به ^{90}Zr تبدیل می‌شود که انرژی ذرات بتای آن برابر 2.28 MeV است. گسیل فوتون گاما از واپاشی ^{90}Y به ندرت رخ داده و می‌توان به صورت طبیعی از آن صرف‌نظر نمود. بنابراین رادیونوکلیدهای مذکور با توجه به نیمه عمرشان، با یکدیگر به تعادل می‌رسند. حساسیت پذیری^۳ یا به عبارتی کمترین آهنگ دز قابل آشکارسازی ($MDDR^4$) برای پرتوهای بتا در این دسته کامپوزیتها از طریق کنترل درصد وزنی نانو ذرات اکسید بیسموت در بستر پلیمری قابل تغییر است. عوامل مختلفی بر پاسخ آشکارساز مذکور تأثیرگذار هستند؛ از جمله درصد بلورینگی بستر پلیمری، درصد وزنی نانو ذرات اکسید فلزی، ضخامت نانوکامپوزیت و سایر عوامل. همچنین پخش همگن نانو ذرات اکسید فلزی در بستر پلیمر، تأثیر به سزایی در ویژگی‌های آشکارسازی ماده نانوکامپوزیت پلیمری دارد.

¹ Lamella

^۲ Nucleation

³ Sensitivity

⁴ Minimum Detectable Dose Rate

در پژوهش حاضر، بررسی پاسخ آشکارسازی ماده PC/Bi_2O_3 به پرتوهای بتای چشمه استاندارد ^{90}Sr از طریق اندازه‌گیری تغییر جریان الکتریکی عبوری از نمونه نانوکامپوزیت در حال پرتوگیری به صورت برخط و همچنین بررسی نحوه پخش و اندازه نانوذرات در بستر پلی کربنات از طریق آزمون SEM انجام شده است.

۲. روش کار

ابتدا ماده پلی کربنات از پتروشیمی خوزستان تهیه شد. در ادامه ذرات Bi_2O_3 با قطر 90-210 nm از شرکت Sigma-Aldrich تهیه شد. حلال شیمیایی دی کلرومتان از شرکت مرک آلمان خریداری شد. چسب نقره تولید داخل نیز به منظور ساخت الکتروود بر نمونه های نانوکامپوزیت تهیه شد. قالب فولادی به ابعاد $80 \times 80 \text{ mm}^2$ و ضخامت 1 mm برای ساخت آشکارساز تهیه شد. به منظور ساخت نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 با درصد وزنی 50 wt%، از روش محلولی بهره‌گیری شد. بدین منظور در ابتدا مقدار مشخصی نانو ذرات Bi_2O_3 به شکل پودر زرد درون حلال دی کلرومتان ریخته شد و در حمام اولتراسونیک به مدت یک ساعت فراصوت دهی^۵ شد. سپس مقدار مشخص از پلی کربنات درون 30 ml حلال دی کلرومتان بر روی دستگاه همزن مغناطیسی به مدت یک ساعت در دمای $50^\circ C$ قرار گرفت. روی آن با فویل آلومینیوم پوشانده شد تا از تبخیر حلال در دمای بالا جلوگیری شود که این عمل باعث حل شدن پلیمر داخل حلال می‌شود. سپس دو محلول با یکدیگر ترکیب شده و به مدت 30 دقیقه مجدداً با استفاده از حمام اولتراسونیک تحت فراصوت دهی قرار گرفت. در پایان، نمونه ها درون قالب سیلیکون ریخته شده و بعد از 24 ساعت خشک شدن. پس از خشک شدن نمونه‌ها، تحت پرس داغ^۶ قرار گرفت. روش کامل ساخت نمونه های پلی کربنات/نانو اکسید بیسموت در پژوهش قبلی توسط نویسندگان توصیف شده است [۱۲].

در این کار تجربی به منظور پرتو دهی نانوکامپوزیت $PC-Bi_2O_3$ با پرتوهای بتا، از چشمه مرجع ^{90}Sr با اکتیویته اولیه 50 mCi موجود در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه ایران-کرج ($^{7}SSDL$)، مطابق جدول ۱ در فواصل مختلف استفاده گردید و برای اندازه‌گیری بار الکتریکی در حین پرتو دهی در بازه‌های زمانی 15 Sec از الکترومتر مدل Supermax Standard Imaging بهره‌گیری شد. شایان ذکر است که به منظور اندازه‌گیری بار الکتریکی با استفاده از الکترومتر، هر اندازه‌گیری چهار بار تکرار شد.

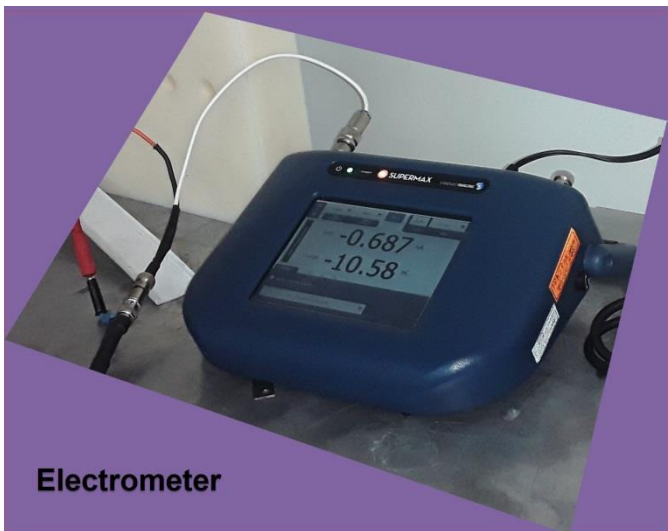
جدول ۱: فاصله چشمه ^{90}Sr تا سطح نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 و آهنگ دز متناظر با آن

SSD (cm)	Dose Rate (mSv/h)
30	3.215
35	2.362
40	1.808
45	1.429
50	1.157
55	0.981

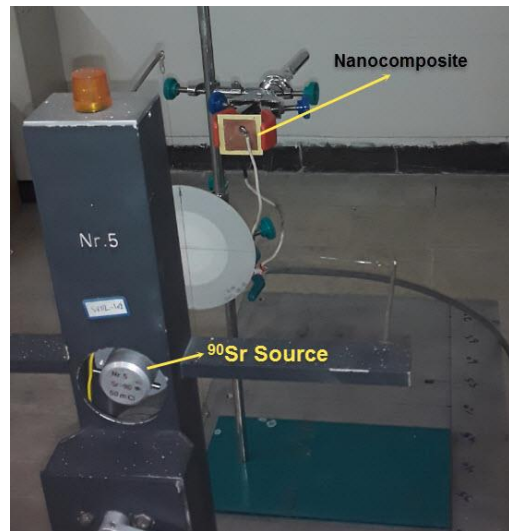
⁵ Ultra-sonication

⁶ Hot press

⁷ Secondary Standard Dosimetry Laboratory



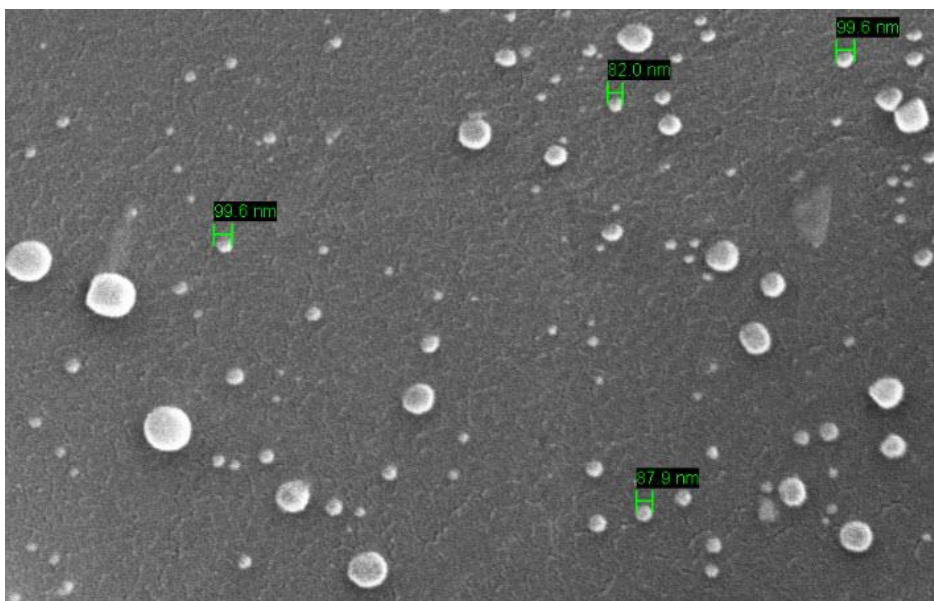
Electrometer



شکل ۱. نمایی از چیدمان اندازه‌گیری جریان الکتریکی عبوری از نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 با استفاده از الکترومتر.

۳. نتایج و بحث

همانطوری که از شکل ۲ پیداست، نمایی از آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری SEM برای نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 50 wt% به تصویر کشیده شده است. همانطوری که از این شکل پیداست، اثری از کلوخگی^۸ یا تجمع نانوذرات اکسید بیسموت در بستر پلی‌کربنات مشاهده نمی‌شود و می‌توان گفت که روش محلولی و استفاده از سیستم اولتراسونیک با فرکانس 40 kHz و توان 60 W روشی مفید در توزیع یکنواخت نانوذرات اکسید بیسموت در بستر پلی‌کربنات است.



شکل ۲. نمایی از آزمون SEM روی نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 50 wt%

مطابق شکل ۳، مقدار جریان تابشی^۹ ($\Delta I = I - I_0$) نمونه نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 در مقابل پرتوهای بتای چشمه ^{90}Sr در آهنگ‌های دز مختلف و در ولتاژ 400 V نمایش داده شده است. جریان تابشی در واقع، اختلاف جریان الکتریکی عبوری از نمونه نانوکامپوزیت در غیاب پرتو (I_0) و در حین پرتودهی (I) است. همان طوری که قبلاً ذکر شد، پاسخ آشکارسازی این ماده نانوکامپوزیت به صورت اندازه‌گیری

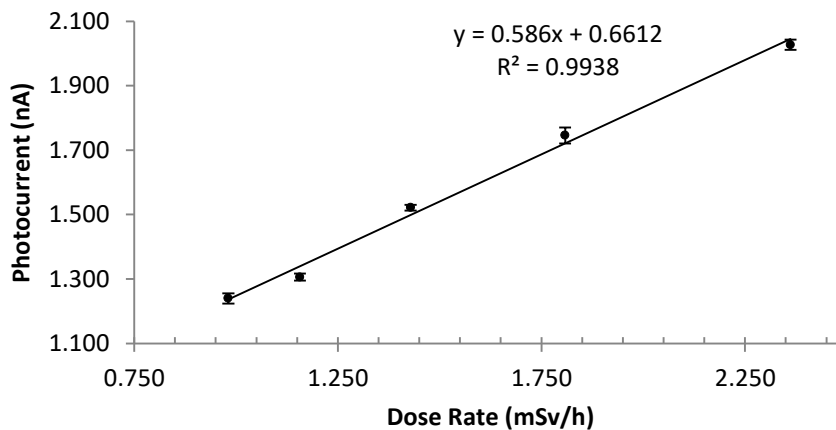
^۸ Agglomeration

^۹ Photocurrent

مقدار کمیت جریان تابشی است. همانطوری که از شکل ۳ پیداست، پاسخ این آشکارساز در محدوده آهنگ دز 0.981-3.215 mSv/h با ضریب همبستگی $R^2=0.9938$ به صورت خطی است.

یکی از کمیت های بسیار مهم در تعیین حساسیت پذیری یک آشکارساز، نسبت سیگنال به نویز^{۱۰} است $(\frac{\Delta I}{I_0})$. این نسبت از طریق تقسیم جریان تابشی به مقدار جریان تاریک^{۱۱} بدست می آید. از شکل ۴، نسبت سیگنال به نویز نمونه نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 در مقابل پرتوهای بتای چشمه ^{90}Sr در آهنگ های دز مختلف تحت ولتاژ 400 V نمایش داده شده است. همانطوری که از شکل ۴ پیداست، در آهنگ دز 0.981 mSv/h نسبت سیگنال به نویز برابر 146 می باشد؛ این یعنی مقدار جریان الکتریکی عبوری از نمونه در حین پرتو دهی، نسبت به جریان تاریک، 146 برابر و حدود 1.24 nA می باشد. شایان ذکر است که مقدار جریان تاریک نمونه مذکور در ولتاژ 400 V به طور میانگین برابر 8 pA می باشد. با افزایش آهنگ دز، نسبت سیگنال به نویز نمونه نانوکامپوزیت به صورت خطی افزایش می یابد تا اینکه در آهنگ دز این نسبت 3.215 mSv/h برابر 269 می باشد؛ مقدار عدم قطعیت در اندازه گیری نسبت سیگنال به نویز برابر 1.5% است. به نظر می رسد حساسیت این آشکارساز برای آهنگ های دز بیشتر از 1 mSv/h مناسب بوده و برای مقادیر کمتر از این آهنگ دز، حساسیت آن اندکی کاهش می یابد؛ لذا کمیت MDDR برای این آشکارساز بتا می تواند از ~ 1 mSv/h به بالا باشد.

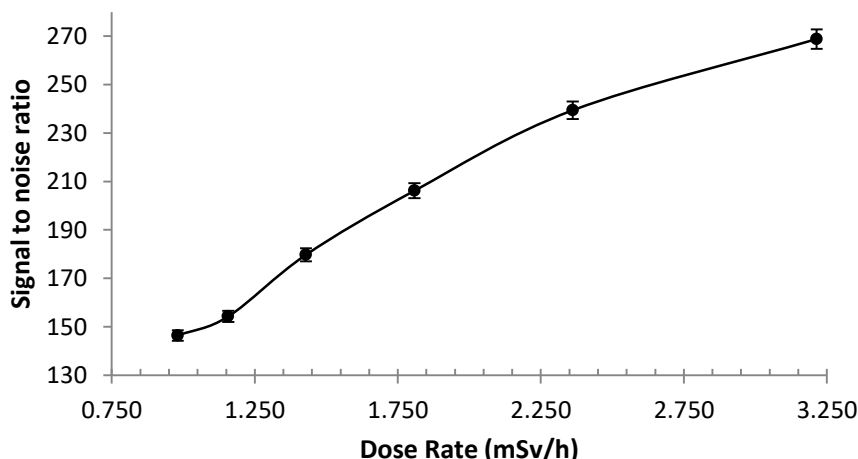
در شکل ۵، نمودار I-V نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 در مقابل پرتوهای بتای ^{90}Sr در فاصله 30 cm و آهنگ دز 3.215 mSv/h به تصویر کشیده شده است. همانطوری که از این شکل پیداست، نمودار I-V از ولتاژ 100-1000 V، با ضریب همبستگی $R^2=0.9985$ به صورت خطی است و هیچ گونه اشباعی در کار نیست. این نمودار نویدبخش اندازه گیری آهنگ های دز پایین تر از 1 mSv/h در ولتاژهای بالاتر است.



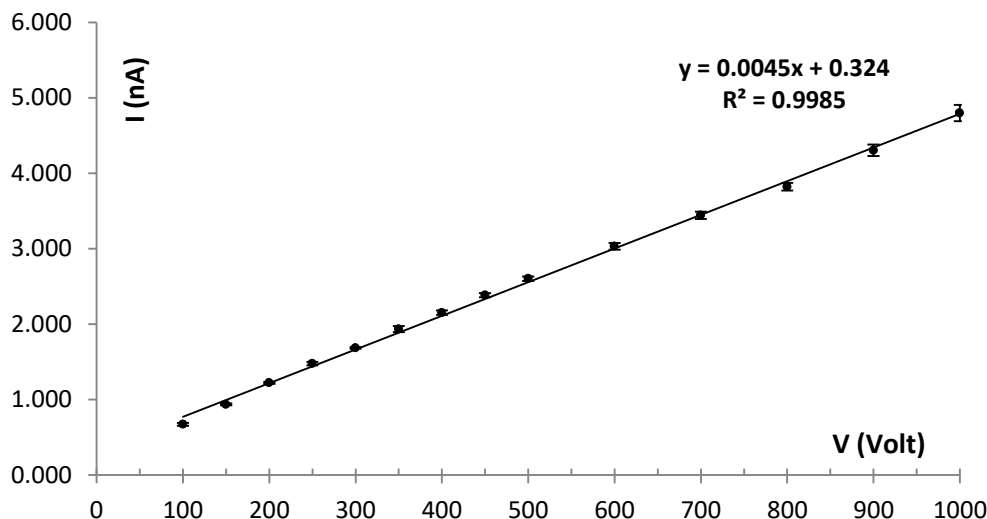
شکل ۳. پاسخ آشکارسازی ماده نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 به پرتوهای بتای چشمه ^{90}Sr .

¹⁰ Signal to noise ratio

¹¹ Dark current



شکل ۴. نسبت سیگنال به نویز برای پاسخ آشکارسازی نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 به پرتوهای بتای چشمه ^{90}Sr .



شکل ۵. نمودار I-V ماده نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 در مقابل پرتوهای بتای چشمه ^{90}Sr در فاصله 30 cm و آهنگ 3.215 mSv/h.

با توجه به اینکه چندین درصد وزنی از صفر تا ۵۰ درصد وزنی نمونه نانوکامپوزیت PC/Bi_2O_3 ساخته شده بود؛ بیشترین درصد وزنی (50wt%) برای این پژوهش انتخاب شد؛ به این علت که احتمالاً به واسطه تراکم بیشتر نانوذرات اکسید بیسموت، احتمال رخ دادن پدیده‌های فوتوالکتریک و پراکندگی کامپتون در نانوکامپوزیت افزایش می‌یابد. البته پاسخ آشکارسازی سایر درصد‌های وزنی نیز بایستی بررسی شود که این مهم در حال انجام است. همچنین اثرات کلوخگی نانوذرات در کسرهای وزنی بالا و ضخامت نانوکامپوزیت بر پاسخ آشکارساز بایستی بررسی شود. در بررسی ضخامت بایستی برد الکترون‌ها در ماده نانوکامپوزیت را در نظر گرفت و اینکه ضخامت بایستی به گونه‌ای باشد که حتی الامکان تعادل الکترونی در ماده نانوکامپوزیت برقرار باشد. در مورد فاصله (SSD)، مطابق شکل ۱ این فواصل برای چیدمان مورد نظر لحاظ شد. در مورد انتخاب ولتاژ 400V بایستی گفت این ولتاژ در ناحیه ولتاژ کاری سیستم‌های آشکارسازی و دزیمتری گایگر بوده و تهیه آن در آینده به سهولت صورت خواهد گرفت. اما همانطوری که از شکل ۵ پیداست، پاسخ آشکارساز تا 1000V نیز به صورت خطی افزایش یافته و اشباع نشده است؛ بنابراین احتمالاً بتوان در ولتاژهای کاری

بالتر از 1000V بتوان به آشکارسازی پرتوهای یونساز در ناحیه حفاظتی از مرتبه چند ده میکروسیورت بر ساعت پرداخت.

در ادامه از برنامه ESTAR، توان توقفی و برد الکترونیهای 546 keV و 2.28 MeV در ماده کامپوزیتی $\text{Bi}_2\text{O}_3/\text{PC}$ در کسرهای وزنی صفر و 50wt% محاسبه شد. به نظر می‌رسد درصد وزنی اکسید بیسموت بتواند بر کمیت‌های برد و توان توقفی الکترونیها در ماده آشکارساز تاثیر گذار باشد. محاسبات نشان داد که مقدار برد الکترونیهای 546 keV در نمونه 50wt% حدوداً برابر 1.2 mm و در پلی‌کربنات خالص برابر 1.7 mm تخمین زده شد. برای الکترونیهای 2.28 MeV، برد الکترونیها در این مواد به طور تقریبی حدود چهار برابر مقادیر فوق می‌باشد. به نظر می‌رسد، ضخامت 1 mm برای این آشکارساز، برای اندازه‌گیری بتای 546 keV مناسب باشد، چون این ضخامت از مرتبه برد الکترونیها در این ماده است؛ اما بازدهی نسبتاً ضعیفی برای آشکارسازی الکترونیهای با انرژی 2.28 MeV خواهد داشت. به هر حال افزایش ضخامت ماده به منظور بالاتر بردن راندمان آشکارساز امکان پذیر است، اما در ضخامتهای بالاتر، میدان الکتریکی اعمالی کاهش خواهد یافت و عملاً یکنواختی خود را از دست خواهد داد؛ بنابراین مقدار حساسیت آشکارساز پایین خواهد آمد. انتخاب ضخامت بهینه ماده آشکارسازی از موضوعات اساسی است که در تحقیقات آتی بدان پرداخته خواهد شد.

۵. نتیجه‌گیری

در این کار تجربی، ماده نانوکامپوزیت $\text{PC}/\text{Bi}_2\text{O}_3$ با درصد وزنی 50 wt% به روش محلولی ساخته شد. آزمون SEM نشان داد در بستر پلی‌کربنات که نانو ذرات Bi_2O_3 به صورت یکنواخت پخش شده اند. سپس الکترودهای مسی در دو سوی نمونه قرار داده شد و نمونه تحت پرتودهی چشمه استاندارد ^{90}Sr در فواصل مختلف در هوا قرار گرفت. در اثر پرتودهی نمونه، مقدار تغییرات جریان الکتریکی عبوری از نمونه توسط الکترومتر در ولتاژ 400 V ثبت شد. نمودار I-V در ولتاژهای مختلف در محدوده 100-1000 V در $\text{SSD}=30$ cm حاکی از خطی بودن تا 1000V بود. نتایج این پژوهش نشان داد که پاسخ آشکارسازی این ماده به پرتوهای بتای ^{90}Sr در محدوده آهنگ دز 1-2.3 mSv/h با ضریب همبستگی $R^2 \sim 0.99$ به صورت خطی است. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که در ولتاژهای بالاتر از 1 kV با استفاده از این نانوکامپوزیت می‌توان به اندازه گیری آهنگ‌های دز در سطح حفاظتی و از مرتبه $\mu\text{Sv/h}$ امیدوار بود.

۶. تشکر و قدردانی

از سرکار خانم روزین مهرآرا و آقای دکتر سید محسن صالح کوتاهی به خاطر پژوهشهای پیشین در تهیه نمونه‌ها و انجام آنالیز SEM قدردانی می‌شود.

۶. مراجع

- [1] A. Mosayebi, S. Malekie, F. Ziaie, A feasibility study of polystyrene/CNT nano-composite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes, *Journal of Instrumentation*, 12 (2017) P05012.
- [2] S. Malekie, 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] S. Malekie, F. Ziaie, M.A. Naeni, Simulation of polycarbonate-CNT nanocomposite dosimeter based on electrical characteristics, *Kerntechnik*, 81 (2016) 647-650.



- [6] A. Mosayebi, S. Malekie, A. Rahimi, F. Ziaie, Experimental study on polystyrene-MWCNT nanocomposite as a radiation dosimeter, *Radiat. Phys. Chem.*, (2019) 108362.
- [7] O. Korostynska, K. Arshak, D. Morris, A. Arshak, E. Jafer, Radiation-induced changes in the electrical properties of carbon filled PVDF thick films, *Materials Science and Engineering: B*, 141 (2007) 115-120.
- [8] 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, pp. 37.
- [9] A. Intaniwet, C.A. Mills, M. Shkunov, P.J. Sellin, J.L. Keddie, Heavy metallic oxide nanoparticles for enhanced sensitivity in semiconducting polymer x-ray detectors, *Nanot*, 23 (2012) 235502.
- [10] A Osswald, Tim A., and Juan P. Hernández-Ortiz. "Polymer processing." *Modeling and Simulation*. Munich: Hanser (2006): 1-651.
- [11] L'Annunziata, Michael F. "Radiation physics and radionuclide decay." In *Handbook of Radioactivity Analysis*, pp. 1-162. Academic Press, 2012.p 78-79.
۱۲. روزین مهرآرا، شهریار ملکی، سید محسن صالح کوتاهی، صدیقه کاشیان، "مطالعه‌ی ویژگی‌های حفاظ‌سازی نانوکامپوزیت پلی-کربنات اکسید بیسموت برای پرتوهای گامای ^{99m}Tc در حوزه پزشکی"، کنفرانس فیزیک ایران، تبریز، دانشگاه تبریز، شهریور ۱۳۹۸.