

معرفی نانو کامپوزیت‌های پلیمری نوین با قابلیت به کارگیری در حفاظ سازی پرتوهای یونساز

شهریار ملکی^{*}، آرمین مسیبی

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

مراکز تشخیصی معمولاً برای حفاظت پرتویی افراد از روپوش‌های سربی (اپرون) استفاده می‌شود. استفاده از اپرون سربی به علت عدد اتمی بالا، گزینه مناسبی برای تضعیف پرتوهای ایکس و گاما به شمار رفته و به طور مرسوم به کارگیری می‌شود؛ اما به علت سستی بودن سرب و عوارض جذب آن در بدن انسان شامل: کم خونی، اختلالات عصبی و آسیب های مغزی، غیر قابل بازیافت بودن و اثرات مخرب زیستی آن بر محیط زیست، همچنین بروز عوارضی نظیر کمردرد و آرتروز در پرتوکاران، باعث شده تا پژوهشگران بر روی طراحی و ساخت حفاظ‌هایی عاری از سرب^۱ و جایگزینی آنها با فلزاتی مانند اکسید تنگستن و اکسید بیسموت متمرکز شوند. از این رو در این مقاله، استفاده از مواد نوظهور نانو کامپوزیت پلیمری با قابلیت بکارگیری در حفاظ سازی پرتویی مطرح شده است.

۲. حفاظ سازی نانو کامپوزیت های پلیمری

افزایش تقاضا برای رادیولوژی تشخیصی نظیر ماموگرافی و پزشکی هسته‌ای در سال‌های اخیر و توجه به مخاطرات احتمالی پرتوهای یونساز برای سلامت بیمار و کادر بیمارستانی، ضرورت طراحی و ساخت حفاظ‌هایی مناسب و سبک را مستلزم می‌سازد و باعث شده تا پژوهشگران بر روی طراحی و ساخت حفاظ‌هایی عاری از سرب^۲ و جایگزینی آنها با فلزاتی مانند اکسید تنگستن و اکسید بیسموت متمرکز شوند [۱۰-۱۶]. در مقاله اخیر که توسط مهرآرا و همکاران در انتشارات معتبر نیچر به چاپ رسیده، ویژگی‌های حفاظ سازی ماده جدید نانو کامپوزیت پلی کربنات/اکسید بیسموت به صورت تجربی در ناحیه انرژی مورد استفاده در پزشکی هسته‌ای بررسی شد [۱۷].

جدیداً بر طبق اصل حفاظتی ALARA^۳، می‌توان پرتوگیری افراد مرتبط با پرتو را از طریق روش‌های مختلفی از جمله کاهش زمان پرتوگیری، افزایش فاصله از چشمه پرتویی، استفاده از حفاظ مناسب و کنترل آلودگی به حداقل رساند [۱۸]. به طور معمول به منظور کاهش پرتوگیری بیمار، کارکنان و عموم، از حفاظ‌های پرتویی استفاده می‌شود. شرایط استفاده از حفاظ پرتویی، نوع آن، ضخامت و مکان آن برای یک کاربرد خاص، تابعی از پارامترهای مختلف نظیر انرژی فوتون، شدت پرتو و هندسه‌ی چشمه پرتویی، نرخ پرتوگیری در مکان‌های مختلف و سایر عوامل است [۱۸]؛ بنابراین به منظور طراحی و ساخت حفاظی مناسب در یک انرژی خاص، بایستی محاسباتی دقیق با در نظر گرفتن احتمال اندرکنش فوتون با ماده از طریق مکانیسم‌های مختلف شامل: اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید جفت انجام داد. در فلوروسکوپی، رادیوگرافی و ماموگرافی، مطالعه نخست در زمینه کاهش سرب در اپرون‌ها به مطالعه هوبرت و همکاران در سال ۱۹۹۳ از طریق نصف کردن مقدار سرب بکار رفته در اپرون‌ها انجام شد [۱۹]. در ادامه مارتینز و همکاران در سال ۲۰۰۱، لزوم جایگزینی سرب با فلزات دیگر را بررسی نمودند و

چکیده: حفاظ سازی پرتوهای یونساز از جمله زمینه‌های پژوهشی و کاربردی بسیار مهم در صنعت هسته‌ای به شمار می‌رود. در سال‌های اخیر نانو کامپوزیت‌های پلیمری به خاطر داشتن ویژگی‌های فیزیکی نظیر خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و اپتیکی خارق‌العاده، توجه پژوهشگران را در بکارگیری این مواد نوظهور در حفاظ سازی پرتوهای یونساز به عنوان مواد عاری از سرب، به خود معطوف نموده است. نانوذرات اکسید فلزی سنگین نظیر اکسید تنگستن، اکسید بیسموت و ... به خاطر دارا بودن نسبت سطح به حجم بالا از طریق افزودن به بسترهای پلیمری در کسرهای وزنی مخصوص، می‌توانند عملکرد حفاظ‌های پرتویی مذکور در گستره وسیعی از انرژی را بهبود بخشند. در این مقاله به معرفی نانو کامپوزیت‌های پلیمری نوین و کاربرد آنها در حفاظ سازی پرتوهای یونساز پرداخته شده است.

کلیدواژه‌ها: حفاظ سازی، مواد عاری از سرب، نانو کامپوزیت پلیمری، نانو اکسید تنگستن، نانو اکسید بیسموت.

Introducing novel polymer nanocomposites with potential applications in ionizing radiation shielding

Abstract: Shielding of ionizing radiation is one of the most important fields of research and application in the nuclear industry. In recent years, polymer nanocomposites due to their extraordinary mechanical, thermal, electrical, and optical properties have attracted the attention of researchers in using these emerging materials in radiation shields as lead-free materials. Heavy metal oxide nanoparticles including Tungsten Oxide, Bismuth Oxide, and etc. due to their high surface-to-volume ratio by adding to the polymer matrices at the specific weight fractions can improve the performance of radiation shields at the extensive energies. In this paper, novel polymer nanocomposites and their applications in ionizing radiation shields are exhibited.

Keywords: Shielding, Lead-Free Materials, Polymer Nanocomposite, Nano Tungsten Oxide, Nano Bismuth Oxide

۱. مقدمه

نانو کامپوزیت‌های پلیمری دارای کاربردهای گسترده‌ای در سلول‌های خورشیدی، سیستم‌های آنتی‌استاتیک، حفاظ سازی امواج الکترومغناطیس و پرتوهای یونساز، سنسورهای پیرو الکتریک، سنسورهای پرتویی و دزیمتری هستند [۹-۱]. حفاظ سازی پرتوهای یونساز از جمله زمینه‌های پژوهشی و کاربردی بسیار مهم در صنعت هسته‌ای به شمار می‌رود. در

Lead-free	۱
Lead-free	۲
As Low As Reasonably Achievable	۳



ضخامت ماده جاذب، I شدت پرتوهای عبوری از ماده جاذب، B مقدار ضریب انباشت^۳ ماده که برای هندسه خوب و حذف پرتوهای پراکنده شده مقدار آن برابر یک در نظر گرفته می‌شود ($B=1$) و μ ضریب تضعیف ماده بر حسب cm^{-1} است [۲۷]:

$$\mu(\text{cm}^{-1}) = \frac{\ln(I_0/I)}{x(\text{cm})} \quad (2)$$

۳. شبیه‌سازی و محاسبات حفاظ‌سازی

از کد MCNP بر مبنای روش مونت کارلو به منظور شبیه‌سازی ویژگی‌های حفاظ‌سازی کامپوزیت پلیمر/نانو ذرات اکسید فلزی سنگین بهره‌گیری می‌شود. به‌طور نمونه مقدار ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت پلی اتیلن/اکسید تنگستن (PE/WO_3) در کسرهای وزنی مختلف ۵، ۸، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ wt % در انرژی‌های مختلف ناحیه ماموگرافی یعنی ۱۵، ۲۰، ۲۵ KeV محاسبه شد. بدین منظور، یک محیط یکنواخت به ضخامت‌های مختلف با چگالی مؤثر برای کامپوزیت‌های مذکور در کسرهای وزنی مختلف در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که در پژوهش‌های پیشین مطابق شکل ۱ از دستور Lat به منظور شبکه بندی و پخش میکرو/نانو ذرات در بستر پلیمری استفاده شد [۲۱]. ابتدا در غیاب ماده کامپوزیتی، با استفاده از تالی F_p ، مقدار شار اولیه ذرات I_0 در سلول مربوط به آشکارساز CsI قرائت شد و سپس در حضور ماده کامپوزیتی، مقدار I قرائت گردید. در ادامه ضریب تضعیف خطی کامپوزیت مذکور (μ/p) در ضخامت‌های ۱-۴ mm در انرژی‌های مختلف ۱۵، ۲۰، ۲۵ KeV محاسبه گردید. در محاسبه ضریب تضعیف فوتون‌ها از شرایط هندسی خوب بهره‌گیری شد و با در نظر گرفتن تالی $F_p - E_p$ در واقع از پراکندگی فوتون‌ها صرف‌نظر گردید؛ به عبارتی مقدار ضرایب انباشت برابر یک در نظر گرفته شد. در این شبیه‌سازی، چشمه پرتویی به صورت نقطه‌ای و تک انرژی در نظر گرفته شد و فاصله چشمه تا آشکار ۲ cm منظور گردید. همچنین از یک کولیماتور سربی به قطر داخلی ۳ cm و قطر خارجی ۱۰ cm با ارتفاع ۱۵ cm بهره‌گیری شد. در پژوهش اخیر از پلی اتیلن با فرمول شیمیایی $(C_2H_4)_n$ دارای چگالی به 0.93 g/cm^3 عنوان ماده اصلی زمینه و از اکسید تنگستن WO_3 با چگالی 7.16 g/cm^3 به عنوان پُرکننده یا فاز تقویتی^۴ استفاده گردید [۲۷]. در شکل‌های ۲ و ۳ محاسبات مربوط به ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت مذکور در انرژی‌های مختلف به تصویر کشیده شده است. نتایج شبیه‌سازی با کد MCNP از طریق نرم افزار XMuDat اعتبارسنجی گردید. شایان ذکر است که این نرم‌افزار برای محاسبه ضریب تضعیف جرمی یک عنصر یا کامپوزیت در انرژی‌های مختلف فوتون قابلیت به کارگیری دارد.

با مد نظر قرار دادن سمیت و عوارض سرب برای محیط زیست، مطالعاتی بر مواد جایگزین از جمله پلی اتیلن، تنگستن و بیسموت انجام دادند [۱۹]. بررسی ویژگی‌های نانو و میکرو کامپوزیت اپوکسی/اکسید تنگستن در میزان تضعیف پرتوهای ایکس در محدوده انرژی ۴۰-۱۰ KeV در کسرهای وزنی مختلف از پُرکننده‌ها توسط نور ازمان و همکاران بررسی شد [۲۰]. در تحقیقی دیگر ملکی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از کد MCNPX، ضریب تضعیف جرمی نانو کامپوزیت اپوکسی E/۴۴ اکسید تنگستن را برای انرژی‌های مختلف گاما در محدوده انرژی ۱۲۵۰-۸۰ KeV محاسبه نمودند که با کار تجربی دیگران همخوانی خوبی نشان داد [۲۱]. در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۱۱ که توسط آقامیری و همکاران انجام شد، طراحی و ساخت حفاظ‌های مورد استفاده در تضعیف ایکس و گاما با استفاده از کامپوزیت پلیمر/تنگستن/قلع انجام گرفت [۲۲]. آن‌ها ضمن محاسبه چگالی کامپوزیت ساخته شده در کسرهای وزنی مختلف، مقدار HVL را با دو روش محاسبه نمودند و علاوه بر خواص تضعیف مطلوب آن در کاربردهای تشخیصی، به استحکام مکانیکی بالای آن نیز اشاره نمودند. باقری و همکاران در سال ۲۰۱۷ در پژوهشی بر روی بررسی حفاظ تابش گاما از شیشه حاوی باریوم/بیسموت/بور و سیلیکات برای چشمه‌های ^{60}Co و ^{137}Cs استفاده کردند و با استفاده از کد MCNP۴C و برنامه XCOM، ضرایب تضعیف را محاسبه و نتایج را با داده‌های تجربی مقایسه نمودند [۲۳]. نتایج نشان دهنده انطباق مناسبی برای هر سه روش بود و همچنین نمونه شیشه‌ای با چگالی 4.21 g/cm^3 از سایر نمونه‌های ساخته شده حفاظ مناسب‌تری برای تابش‌های گاما معرفی گردید. در تحقیقی دیگر که توسط عادل و همکاران انجام شد، مطالعات مربوط به تضعیف گامای پرنرژی ثانویه میدان نوترونی با بهره‌گیری از یک حفاظ کامپوزیتی تقویت شده‌ی عاری از سرب انجام شد [۲۴]. مهرآرا و همکاران، ویژگی‌های حفاظ‌سازی نانو کامپوزیت پلی کربنات/اکسید بیسموت در برابر پرتوهای گامای چشمه $^{99\text{m}}\text{Tc}$ در حوزه پزشکی هسته‌ای را مورد مطالعه قرار دادند [۲۵]. به طور ویژه انرژی دستگاه‌های ماموگرافی معمولاً در محدوده ۲۰-۳۰ KeV بوده که در آن انرژی میانگین فوتون‌های تولیدی برابر ۲۰ KeV است [۲۶]. در حفاظ‌سازی، محاسبه ضریب تضعیف جرمی^۱ یک ماده در مقابل فوتون‌هایی با انرژی مشخص از اهمیت بالایی برخوردار است. اگر اندازه‌گیری ضریب تضعیف فوتون‌های پرنرژی در شرایط هندسی خوب^۲، یعنی با استفاده از یک باریکه تابشی باریک و کاملاً موازی انجام شود و اطلاعات حاصل به صورت نیمه لگاریتمی بر حسب ضخامت ماده جاذب رسم شود، در صورت تک انرژی بودن فوتون، یک خط مستقیم حاصل خواهد شد که در واقع شیب این خط بیانگر مقدار ضریب تضعیف ماده است [۲۷]. منحنی تضعیف باریکه پرتو عبارتست از:

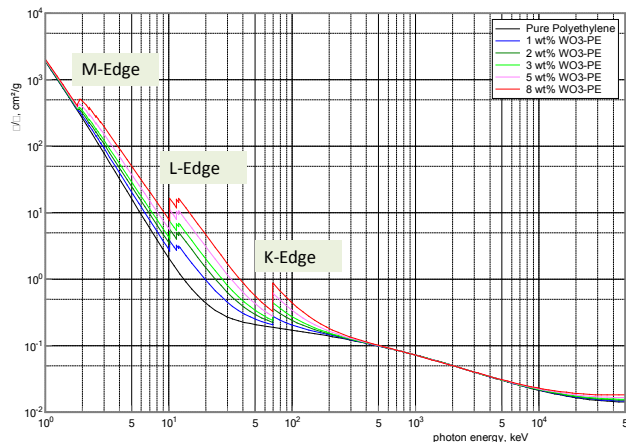
$$\frac{I}{I_0} = \text{Bexp}(-\mu x) \quad (1)$$

که در آن I_0 شدت پرتوهای ورودی در غیاب ماده جاذب، x

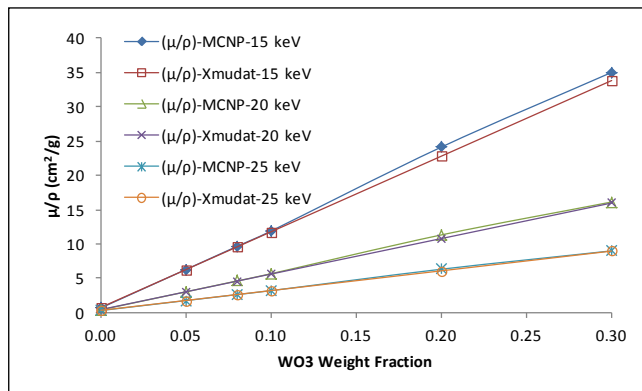




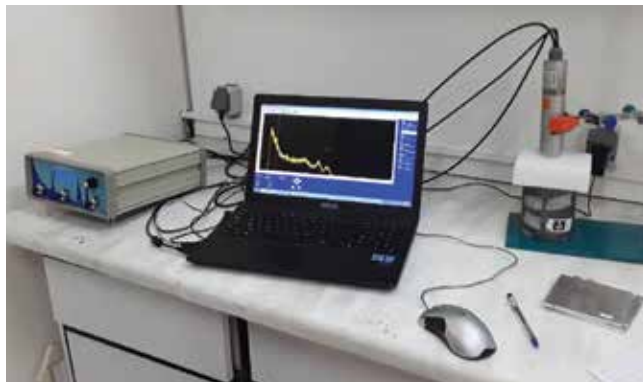
تشخیصی و سطح درمانی به کار گرفته شوند.



شکل ۲. محاسبه ضریب تضعیف خطی (μ/ρ) کامپوزیت WO₃/PE در گستره وسیعی از انرژی فوتون‌ها و در کسرهای وزنی مختلف با استفاده از نرم افزار XMuDat.



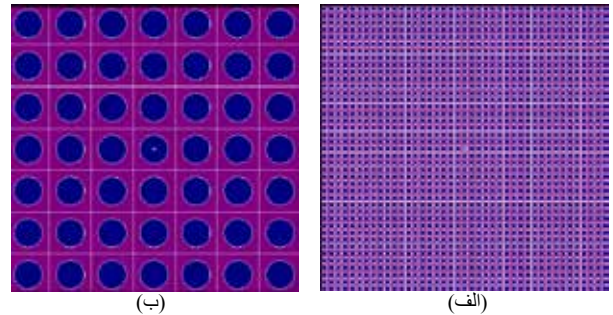
شکل ۳. مقایسه ضریب تضعیف خطی (μ/ρ) ماده کامپوزیتی WO₃/PE در کسرهای وزنی متفاوت و انرژی‌های مختلف با استفاده از کد MCNP و برنامه XMuDat.



شکل ۴. سیستم اندازه‌گیری ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های نانو کامپوزیت پلیمری در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کشور - کرج.

۵. نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که نانو کامپوزیت‌های پلیمری نوظهور از طریق افزودن نانو پُرکننده‌های اکسید فلزی سنگین نظیر اکسید تنگستن و اکسید بیسموت به بستر پلیمری قادرند تا از طریق افزایش کمیت ضریب تضعیف جرمی ماده نانو کامپوزیت و کاهش کمیات HVL و TVL در انرژی‌های پایین، به عنوان حفاظ‌های پرتوبی سبک‌تر و عاری از سرب در مراکز صنعتی و پزشکی هسته‌ای به کار گرفته شوند.



شکل ۵. نمایشی از شبکه بندی پُرکننده‌های (الف) نانوذرات با شعاع ۵۰ nm و (ب) میکرو ذرات با شعاع ۱ μm در بستر پلیمر با استفاده از دستور لیتس در کد MCNP [۲۱].

۴. ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت

پس از مطالعات اولیه و شبیه‌سازی ضریب تضعیف ماده نانو کامپوزیت با استفاده از کد MCNP و اعتبارسنجی با داده‌های XCOM، ساخت نمونه‌های نانو کامپوزیت با استفاده از روش محلولی در دستور کار قرار گرفت. بدین منظور گرانول‌های پلیمری از شرکت‌های پتروشیمی داخل تهیه شد. در ادامه نانوذرات اکسید بیسموت و اکسید تنگستن از شرکت سیگما آلدریچ و حلال‌های شیمیایی مختلفی نظیر دی‌کلرومتان و تولوئن از شرکت مرک آلمان تهیه شد. همچنین قالب‌های فولادی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱ cm و ضخامت ۱ mm به منظور ساخت حفاظ پرتوبی طراحی و ساخته شد. در ابتدا مقدار مشخصی نانوذره اکسید فلزی سنگین درون حلال ریخته شد و در دستگاه همزن اولتراسونیک پروب‌دار به مدت یک ساعت فراصوت دهی^۵ شد. سپس مقدار مشخص از پلیمر درون ۱۰ ml حلال بر روی دستگاه همزن مغناطیسی به مدت دو ساعت در دمای ۴۰°C قرار گرفت و 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. پس از حل کامل پلیمر و افزایش ویسکوزیته آن، محلول حاوی نانوذرات به آن افزوده شد [۱۷].

همانطوری که در قسمت مقدمه ذکر شد، نانو کامپوزیت‌های پلیمری قابلیت به کارگیری در سیستم‌های آشکارسازی و دزیمتری پرتوهای یونساز را دارا هستند که بدین منظور پس از ساخت نمونه‌ها، از پوشش دهی چسب نقره بر سطوح نانو کامپوزیت به عنوان الکترود استفاده می‌شود.

۴-۱. اندازه‌گیری ضریب تضعیف

در شکل ۴ نمایشی از سیستم اندازه‌گیری ضریب تضعیف جرمی نمونه‌های نانو کامپوزیت با استفاده از آشکارساز CsI(Tl) به تصویر کشیده شده است. نتایج پژوهش‌های مربوطه نشان می‌دهد که با افزایش درصد وزنی پُرکننده‌های نانو اکسید فلزی سنگین در بستر پلیمر، به دلیل افزایش چگالی کامپوزیت، ضریب تضعیف ماده افزایش یافته و مقادیر مربوط به کمیات HVL و TVL نیز به طرز محسوسی کاهش می‌یابند؛ بنابراین نانو کامپوزیت‌های عاری از سرب مذکور می‌توانند به عنوان حفاظ‌هایی مناسب و عاری از سرب به منظور تضعیف فوتون‌ها و پرتوهای ایکس در انرژی‌های مختلف قابل کاربرد در نواحی ماموگرافی، رادیولوژی



13. Li, R., Gu, Y., Zhang, G., Yang, Z., Li, M., Zhang, Z., 2017. Radiation shielding property of structural polymer composite: Continuous basalt fiber reinforced epoxy matrix composite containing erbium oxide. *Composites Science and Technology*, 143, pp.67-74.

14. Tekin, H.O., Singh, V.P., Kara, U., Manic, T., Altunsoy, E.E., 2016. Investigation of Nanoparticle Effect on Radiation Shielding Property Using Monte Carlo Method. *Celal Bayar University Journal of Science*, 12, pp.195-199.

15. Shooli, H., Malekie, S., Hosseini, M.A., 2020. Preliminary studies on nanocomposites containing PA6/WO3 as X-ray and gamma-ray shields using the Monte Carlo method. 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020). Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.

16. Keshavarzi, M., Malekie, S., Hosseini, M.A., 2020. An overview of the radiation-protective properties of nanocomposites containing Iron Oxide and High Density Polyethylene in the presence of X- and Gamma-rays. 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020). Tarbiat Modares University. Tehran. Iran.

17. Mehrara, R., Malekie, S., Saleh Kotahi, S.M., Kashian, S., 2021. Introducing a novel low energy gamma ray shield utilizing Polycarbonate Bismuth Oxide composite, *Scientific Reports*, 11, PP.10614.

18. Bushberg, J.T., Boone, J.M., 2011. *The essential physics of medical imaging*. Lippincott Williams & Wilkins.

19. Kazemi, F., 2017. Study and design of Polyvinyl Alcohol-Tungsten oxide (PVA/WO3) as gamma radiation shielding. Department of Nuclear Engineering. Islamic Azad University. Arsanjan Branch.

20. Azman, N.N., Siddiqui, S., Low, I.M., 2013. Characterisation of micro-sized and nano-sized tungsten oxide-epoxy composites for radiation shielding of diagnostic X-rays. *Materials Science Engineering: C*, 33, pp.4952-4957.

21. Malekie, S., Hajiloo, N., 2017. Comparative Study of Micro and Nano Size WO3/E44 Epoxy Composite as Gamma Radiation Shielding Using MCNP and Experiment. *Chinese Physics Letter*, 34, p.108102.

22. Aghamiri, M., Mortazavi, S., Tayebi, M., Mosleh-Shirazi, M., Baharvand, H., Tavakkoli-Golpayegani, A., Zeinali-Rafsanjani, B., 2011. A novel design for production of efficient flexible lead-free shields against X-ray photons in diagnostic energy range. *Journal of Biomedical Physics and Engineering*, 1, pp.17-21.

23. Bagheri, R., Moghaddam, A.K., Yousefnia, H., 2017. Gamma ray shielding study of barium-bismuth-borosilicate glasses as transparent shielding materials using MCNP-4C code, XCOM program, and available experimental data. *Nuclear Engineering and Technology*, 49, pp.216-223.

24. Shirmardi, S.P., Adeli, R., Ahmadi, S.J., Mazinani, S., 2016. High Energetic Gamma Attenuating from a Neutron Field Using a Lead Free Reinforced Composite. *Nuclear Science and Technology*, 75, pp.22-29.

25. Mehrara, R., Malekie, S., Saleh kotahi, S.M., Kashian, S., 2019. Study of the shielding properties of the Polycarbonate-Bismuth Oxide nanocomposite against the gamma rays of ^{99m}Tc source for medical applications, Iranian annual physics conference. Tabriz University. Tabriz. Iran (In Persian).

26. Low, I.M., Azman, N., 2020. *Polymer Composites and Nanocomposites for X-Rays Shielding*. Springer.

27. Cember, H., 1983. *Introduction to health physics*, Pergamon Press.

سپاسگزاری

از همکاری صمیمانه پژوهشگران و اعضای هیأت علمی پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای-پژوهشکده کاربرد پرتوها، دانشگاه علوم پزشکی شیراز و شرکت پارس ایزوتوپ در آزمایشگاه SSDL تقدیر و سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

1. Malekie, S., Ziaie, F., Naeini, M.A., 2016. Simulation of polycarbonate-CNT nanocomposite dosimeter based on electrical characteristics. *Kerntechnik*, 81, pp.647-650.
2. Mosayebi, A., Malekie, S., Ziaie, F., 2017. A feasibility study of polystyrene/CNT nano-composite as a dosimeter for diagnostic and therapeutic purposes. *Journal of Instrumentation*, 12, p.P05012.
3. Malekie, S., Ziaie, F., 2015. 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, pp.1-5.
4. Malekie, S., Ziaie, F., Esmaeli, A., 2016. 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, pp.101-105.
5. Malekie, S., Ziaie, F., 2017. A two-dimensional simulation to predict the electrical behavior of carbon nanotube/polymer composites. *Journal of Polymer Engineering*, 37, pp.205-210.
6. Malekie, S., Ziaie, F., Feizi, S., Esmaeli, A., 2016. 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, pp.127-133.
7. Mosayebi, A., Malekie, S., Rahimi, A., Ziaie, F., 2019. Experimental study on polystyrene-MWCNT nanocomposite as a radiation dosimeter. *Radiation Physics and Chemistry*, 164, p.108362.
8. Mosayebi, A., Malekie, S., Ziaie, F., Ataee Naeini, M., 2019. Experimental investigation of dosimetry response of nanocomposite of polystyrene-multiwall carbon nanotube in gamma radiation field. *Iranian Journal of Radiation Safety and Measurement*, 7, pp.21-26.
9. Vatankhah, A.R., Hosseini, M.A., Malekie, S., 2019. The characterization of gamma-irradiated carbon-nanostructured materials carried out using a multi-analytical approach including Raman spectroscopy. *Applied Surface Science*, 488, pp.671-680.
10. Abiz, A., Malekie, S., Hosseini, M.A., 2019. Investigating radiation shielding properties of the nanocomposites including high density polyethylene and nano-oxide tungsten, in: Tel, E., Sarpun, I.H., Ozdogan, H., Sekerci M. (Eds.) 5th International Conference on Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology (TESNAT). Amasya University. Amasya. Turkey. p.32.
11. Dubey, K., Chaudhari, C., Suman, S., Raje, N., Mondal, R., Grover, V., Murali, S., Bhardwaj, Y., Varshney, L., 2016. Synthesis of flexible polymeric shielding materials for soft gamma rays: Physico-mechanical and attenuation characteristics of radiation cross-linked polydimethylsiloxane/Bi2O3 composites. *Polymer Composites*, 37, pp.756-762.
12. Kazemi, F., Malekie, S., Hosseini, M.A., 2019. A Monte Carlo Study on the Shielding Properties of a Novel Polyvinyl Alcohol (PVA)/WO3 Composite, Against Gamma Rays, Using the MCNPX Code. *Journal of Biomedical Physics Engineering*, 9, p.465.

