



تضعیف گامای پرنرژی ثانویه‌ی میدان نوترونی با بهره‌گیری از یک حفاظ کامپوزیتی تقویت شده‌ی بدون سرب

روح‌اله عادل^۱، سیدپژمان شیرمردی^{*۱،۲}، سیدجواد احمدی^۳، سعیده مزینانی^۴

۱. مجتمع پژوهشی ایران مرکزی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۳۸۹-۸۹۱۷۵، یزد - ایران

۲. پژوهشکده‌ی کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

۳. پژوهشکده‌ی چرخه‌ی سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران - ایران

۴. پژوهشکده‌ی نانو فناوری، دانشگاه امیرکبیر، صندوق پستی: ۴۴۱۳-۱۵۸۷۵، تهران - ایران

چکیده: رزین اپوکسی، پلی‌مری گرماسخت است که علاوه بر مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا، به دلیل قابلیت کاربری پیوسته در برابر تابش‌های نوترون و گاما، بسیار مورد توجه صنعت هسته‌ای قرار گرفته است. در حفاظ‌سازی یک میدان نوترونی، تولید فوتون‌های پرنرژی گاما باید در نظر گرفته شود. به منظور تضعیف این فوتون‌ها، از عناصری با عدد اتمی بالا در بستر پلی‌مری استفاده می‌شود. به دلیل مشکلات زیادی که حفاظ‌های سربی دارند، پژوهش‌ها به سمت حفاظ‌های بدون سرب سوق پیدا کرده است. در این پژوهش با استفاده از روش مونت کارلو، قدرت تضعیف فوتون‌های ثانویه‌ی یک حفاظ پلی‌مری بر پایه‌ی رزین اپوکسی تقویت شده با ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی از ریزذرات اکسید تنگستن و اکسید سرب بدون حضور جاذب نوترونی مطالعه شد. نتایج نشان می‌دهد در شرایط یکسان درصد وزنی، حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با تنگستن می‌تواند قدرت حفاظ‌سازی بهتری حاصل نماید. افزایش بیش‌تر درصد وزنی ماده‌ی تقویت‌کننده، ضمن افزایش وزن حفاظ کامپوزیتی، از قدرت حفاظ می‌کاهد.

کلیدواژه‌ها: میدان نوترونی، گامای ثانویه‌ی پرنرژی، اپوکسی، سرب، تنگستن، مونت کارلو

High Energetic Gamma Attenuating from a Neutron Field Using a Lead Free Reinforced Composite

R. Adeli¹, S.P. Shirmardi^{*1,2}, S.J. Ahmadi³, S. Mazinani⁴

1. Central Iran Research Complex, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 89175-389, Yazd - Iran
2. Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran
3. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
4. Nanotechnology Research Institute, Amirkabir University, P.O.Box: 15875-4413, Tehran - Iran

Abstract: Epoxy resin as a thermoset polymer has a suitable thermal resistance with high mechanical properties. In addition, the resin exhibits good continuum presentation for both neutron and gamma beams. Consequently, it is the primary concern in the nuclear industry. In a neutron shielding, energetic secondary gamma products are unavoidable. For attenuating these gamma rays, the elements with high atomic number in the polymeric matrix are inevitably used. Because of various problems of lead shield, studies are inclined to the lead free shielding. In this investigation and, by using Monte Carlo method, the ability of secondary gamma attenuating was studied on a polymeric shielding based on reinforced epoxy with different weight percentages of 5, 10 and 20 of tungsten oxide and lead oxide without any neutron poisons. The results show that by the same weight percentage, the reinforced composite shield with tungsten oxide could afford better shielding performance. The more increase in the weight percentage of the reinforced material, in addition to an increase in the weight of the shield, reduce the ability of shielding performance.

Keywords: Neutron field, High energetic secondary gamma, Epoxy, Lead, Tungsten, Monte Carlo

*email: pshirmardi@aeoi.org.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۲/۱۰ - تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۲/۲۴



۱. مقدمه

نوترون یکی از مهم‌ترین اجزای هسته است که کاربردهای فراوانی در حوزه‌های مختلفی از جمله تصویربرداری نوترونی، درمان به وسیله‌ی گیراندازی نوترون توسط بور^(۱) (BNCT) و ایجاد شکافت القایی دارد. این ذرات هسته‌ای مهم، می‌توانند مانند پرتو گاما و یا ذرات بتا به طور ناخواسته محیط را آلوده کنند. به همین دلیل، امروزه حفاظ‌سازی تابش‌های مستقیم و غیرمستقیم یوننده، چالشی اساسی در حوزه‌هایی هم‌چون شتاب‌دهنده‌ها، هوافضا، پزشکی هسته‌ای و به طور خاص در صنعت هسته‌ای به شمار می‌آیند [۱، ۲]. برای مثال، حفاظ‌سازی نوترون‌های تولید شده از سوخت‌های مصرفی [۳] و یا شتاب‌دهنده‌ها [۴] نمونه‌هایی از این چالش‌ها هستند.

در سال‌های اخیر، استفاده از کامپوزیت‌ها در بحث حفاظ‌سازی تابش‌های هسته‌ای بسیار اهمیت یافته است [۵، ۶، ۷]. به دلیل ویژگی‌هایی که کامپوزیت‌ها در اختیار مهندسی قرار داده‌اند، استفاده از افزودنی‌های آلی و یا معدنی به سیستم‌های پلی‌مری بسیار رایج شده است [۸، ۹]. در این میان، استفاده از رزین‌های گرماسخت اپوکسی به دلیل خواص خوب مکانیکی و ترمودینامیکی [۱۰]، به شکل یک ماده‌ی ساختاری در کاربردهای تابشی و ایمنی هسته‌ای مطرح شده‌اند [۶]. معمولاً موادی که به عنوان حفاظ استفاده می‌شوند، باید در برابر خوردگی و شرایط دمایی بالا، مقاوم باشند، ضمن این‌که با داشتن مقاومت تابشی بالا، قابلیت استفاده‌ی پیوسته و طولانی مدت را نیز داشته باشند. هم‌چنین به صرفه بودن هزینه‌ی تولید حفاظ، به ویژه در حجم‌های بزرگ، پارامتر مهمی به شمار می‌آید که کامپوزیت‌ها آن را به خوبی پوشش داده‌اند.

۲. حفاظ‌سازی گامای ثانویه‌ی یک میدان نوترونی

حضور یک میدان نوترونی مسلماً با طیفی از فوتون‌های ثانویه همراه خواهد بود. سرچشمه‌ی این فوتون‌ها را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

P۱: پراکندگی ناکشسان^(۲) نوترون‌های سریع با عناصر سنگین باعث تولید گامای ثانویه می‌شود.

P۲: در ناحیه‌ی نوترون‌های حرارتی، پرتوزسازی نوترونی عناصر موجود در ماده‌ی حفاظ نیز باعث گسیل گاما می‌شود.

P۳: حفاظ‌سازی یک میدان نوترونی به وسیله‌ی برخی از جاذب‌های نوترونی^(۳) مانند کادمیم، خود نیز عامل ایجاد گسیل فوتون‌های پرنرژی است که خطرات تابشی ناخواسته‌ای را ایجاد خواهد کرد.

P۴: در برهم‌کنش تمامی فوتون‌های ثانویه‌ی ایجاد شده با ماده‌ی حفاظ طی فرایندهای فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج و یا حتی در صورت حضور طیف ذرات بتای پاره‌های شکافت، الکترون‌های ثانویه‌ی پرنرژی ایجاد می‌شوند که در کنار هسته‌های سنگین، تابش‌های ترمزی تولید خواهند نمود.

فرایند تضعیف نوترون‌های سریع کمی دشوار است. باریکه‌ی نوترون‌های سریع با مواد سبک‌تر بیش‌تر از طریق پراکندگی کشسان^(۴) و با مواد سنگین‌تر از طریق پراکندگی ناکشسان، کند می‌شوند و به انرژی‌های حرارتی می‌رسند که در پراکندگی دوم، طیفی از فوتون‌های گاما نیز ایجاد می‌شود. بر همین اساس، روند حفاظ‌سازی نوترونی را می‌توان در سه مرحله بیان کرد:

(۱) کندسازی نوترون‌های سریع، (۲) گیراندازی نوترون‌های حرارتی (۳) تضعیف تابش‌های گامای موجود.

باریکه‌ی نوترون‌های سریع پس از کند شدن توسط جاذب نوترونی، در همان جا جذب می‌شوند و فوتون‌های گامای ثانویه‌ی حاصل از برهم‌کنش نوترون، توسط عناصر سنگین تضعیف می‌شوند. در انرژی‌های بالای نوترونی، پراکندگی کشسان محتمل‌ترین حالت است. طبق رابطه‌ی ۱، در برخورد نوترون با هسته‌ی یک اتم (حفاظ)، به هر میزان که جرم هسته (M) سبک‌تر باشد، کسر (f) بیش‌تری از انرژی نوترون فرودی جذب حفاظ می‌شود [۱۱]

$$f = \frac{2M}{(M+1)^2} \quad (1)$$

از آن‌جا که در پراکندگی ناکشسان، طیفی از فوتون‌های گامای ثانویه ایجاد می‌شود، در صورت امکان ترجیح داده می‌شود که کندسازی با پراکندگی کشسان و با استفاده از مواد سبک‌تر انجام شود. در این میان، هیدروژن اتمی است که کم‌ترین جرم اتمی را دارد. بنابراین موادی سبک، مانند پلی‌مر که از غلظت هیدروژنی مطلوبی برخوردارند، به منظور حفاظ‌سازی نوترون‌ها بسیار مؤثرند. زیرا نوترون‌های سریع در اثر



هندسی مناسب، می‌توان با صرف نظر کردن از مؤلفه‌ی انباشت، تضعیف باریکه‌ای از پرتوهای گاما را از رابطه‌ی زیر به دست آورد

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (3)$$

در این جا I_0 شدت پرتو گاما در ضخامت صفر ماده‌ی جاذب، I شدت پرتو گاما پس از عبور از ضخامت x در جاذب و μ ضریب تضعیف خطی ماده است. اگر μ بر چگالی ماده‌ی هدف تقسیم شود، آن را ضریب تضعیف جرمی کل، μ_m می‌نامند که در شرایط برابر، مقایسه‌ی قدرت حفاظت‌سازی مواد متفاوت را ممکن می‌سازد. رابطه‌ی بین ضرایب تضعیف خطی و جرمی به صورت زیر است

$$\mu_m (\text{m}^2 / \text{kg}) = \frac{\mu (\text{m}^{-1})}{\rho (\text{kg} / \text{m}^3)} \quad (4)$$

در حالی که در فوتون‌های با انرژی پایین، پدیده‌ی فوتوالکتریک غالب است، در انرژی‌های بین ۰/۷۵ تا ۵ MeV، پدیده‌ی غالب کامپتون خواهد بود [۱۱]. در محدوده‌ی انرژی پدیده‌ی فوتوالکتریک، ماده‌ی جاذب با عدد اتمی بالاتر، کارآمدتر است و مقدار $HVL^{(7)}$ کوچک‌تری دارد. اما در محدوده‌ی انرژی پدیده‌ی کامپتون، فیزیک مسئله متفاوت است. در این محدوده، سطح مقطع تضعیف فوتون به چگالی الکترونی ماده‌ی جاذب وابسته است، نه به عدد اتمی. مقایسه‌ی بین ویژگی‌های سرب و تنگستن در جدول ۱ ارائه شده است.

۳. مواد و روش‌ها

۱.۳ بستر پلی‌مری

کامپوزیت‌های زمینه‌ی پلی‌مری^(۸) از رایج‌ترین کامپوزیت‌ها به شمار می‌آیند. رزین‌های اپوکسی یک رزین گرماسخت^(۹) هستند که حاوی دو گروه اپوکسی در دو انتهای زنجیره، معروف به اپوکساید^(۱۰) هستند. ساختار کلی یک رزین اپوکسی در شکل ۱ نشان داده شده است.

پراکنده‌گی‌های پی‌درپی در پلی‌مر به وسیله‌ی هسته‌های کربن و به خصوص هیدروژن موجود در آن، بخش بزرگی از انرژی خود را از دست داده، کند شده و به ناحیه‌ی حرارتی می‌رسند [۱۲]. در نهایت نوترون‌های حرارتی به وسیله‌ی جاذب نوترونی مانند ترکیبات بور، کادمیم و یا گادولیم جذب و از باریکه‌ی نوترونی حذف می‌شوند.

به دلیل عمق نفوذ بالای گاما، حفاظت در برابر گامای ثانویه‌ی تولید شده در فرایند پرتوزسازی نوترونی بسیار مهم است. حفاظت‌سازی تابش گاما، مبتنی بر چگالی ماده‌ی جاذب است. به همین دلیل، حفاظت‌های سربی به طور گسترده در تضعیف تابش‌های گاما و ایکس به کار گرفته می‌شوند. با این وجود، به دلایل گوناگونی از جمله سمیت بالای سرب، سنگینی، شکننده بودن [۱۳، ۱۴] و خطرات زیست‌محیطی که به واسطه‌ی پرتوگیری بلندمدت سرب ایجاد می‌شود، تلاش‌ها به منظور جای‌گزینی این نوع حفاظ شروع شده است. از طرفی به دلیل چگالی بالای سرب، تولید تابش ترمزی ناشی از الکترون‌های پراثرژی ثانویه‌ی تولیدی، خطرات بالقوه‌ی بیش‌تری را نسبت به تابش اولیه ایجاد می‌کند. بنابراین تولید و طراحی حفاظ‌های تابشی غیرسربی^(۵) از جمله کامپوزیت‌های پلی‌مری تقویت‌شده^(۶) که زیانی به محیط زیست نرسانند و وزن کم‌تری در مقابل حفاظ‌های سربی داشته باشند، در دستور کار پژوهش‌گران قرار گرفته است.

پرتو گاما در برهم‌کنش با ابر الکترونی ماده‌ی حفاظ طی فرایندهای احتمالی کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج تضعیف می‌شود. احتمال هر یک از برهم‌کنش‌های فوق، وابستگی شدیدی به انرژی فوتون فرودی دارد. احتمال کل برهم‌کنش، μ ، که ضریب تضعیف خطی کل نامیده می‌شود، برابر با حاصل جمع هر سه احتمال فوق است

$$\mu (\text{m}^{-1}) = (\tau + \sigma + \kappa) \quad (2)$$

در این رابطه τ احتمال رخداد پدیده‌ی فوتوالکتریک، σ احتمال رخداد پدیده‌ی کامپتون و κ احتمال تولید زوج است. از نظر فیزیکی، μ احتمال برهم‌کنش است که بر واحد فاصله بیان می‌شود. به طور کلی می‌توان این‌گونه بیان کرد که در شرایط

جدول ۱. مقایسه بین سرب و تنگستن

ماده‌ی جاذب	عدد اتمی Z	جرم اتمی M	چگالی	نسبت Z/M	سمت زیست‌شناختی	سطح مقطع گیراندازی نوترون‌های حرارتی
Pb	۸۲	۲۰۷٫۲	۱۱٫۳۴	۰٫۳۹	دارد	۰٫۱۷
W	۷۴	۱۸۳٫۸۴	۱۹٫۳	۰٫۴۰	ندارد	۱۸

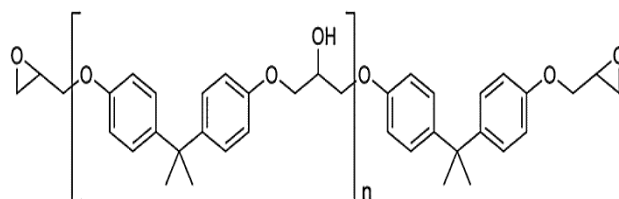
۲.۳ فاز تقویت‌کننده

در کنار فلزات سنگینی هم‌چون سرب، فلز نسوزی مانند تنگستن و آلیاژهای آن در کاربردهایی مانند حفاظ‌سازی تابش‌های ایکس و گاما مطرح هستند. ویژگی متمایز فلزات نسوز، دمای ذوب بالای این فلزات نسبت به آلیاژهایی بر پایه‌ی فلزاتی هم‌چون آهن، کبالت و نیکل است. فلزات نسوز به فلزاتی گفته می‌شود که دمای ذوب آن‌ها بالای 1850°C باشد. طبق این معیار، ۱۳ فلز Ta ، Os ، Re ، Cr ، V ، Mo ، Ir ، Nb ، Ru ، Rh ، Hf ، W و Mo در این گروه قرار می‌گیرند. در این بین، تنگستن ویژگی‌های مطلوبی دارد که علاوه بر غیرسمی بودن آن، می‌توان به مقاومت حرارتی بالا، ضریب کشسانی بالا، مقاومت خوردگی بالا و ضریب انبساط حرارتی پایین اشاره کرد. بنابراین استفاده از این نوع تقویت‌کننده در کامپوزیت پلی‌مری علاوه بر تضعیف فوتون‌های اولیه و ثانویه، سبب افزایش مقاومت حرارتی و مقاومت در برابر خوردگی حفاظ طراحی شده نیز خواهد شد. بنابراین، انتخاب تنگستن به عنوان عنصر مناسبی در طراحی حفاظ هسته‌ای هیبریدی بدون سرب، گزینه‌ای مناسب خواهد بود.

۳.۳ شبیه‌سازی مونت کارلو

کد شبیه‌ساز MCNP-4C [۱۶] که بر پایه‌ی محاسبات مونت کارلو عمل می‌کند، توانایی محاسبه‌ی بهره‌ی حفاظ تابشی در برهم‌کنش ذرات اتمی و هسته‌ای با انرژی‌های گوناگون با ماده‌ی حفاظ را در هندسه‌ها و اندازه‌های مختلف دارد. در این پژوهش، شبیه‌سازی حفاظ پلی‌مری بر پایه‌ی اپوکسی تقویت شده با دو عنصر جاذب گاما به صورت زیر انجام شد:

سه برنامه به صورت جداگانه برای اپوکسی خام^(۱۲)، کامپوزیت تقویت شده با اکسید سرب و کامپوزیت تقویت شده با اکسید تنگستن، هر یک تا ضخامت ۱cm نوشته شد. با استفاده


شکل ۱. ساختار کلی رزین اپوکسی.

در مقایسه‌ی کمی بین مقاومت تابشی مواد پلی‌مری، رزین اپوکسی در مقایسه با پلی‌استر و یا پلی‌اتیلن، مقاومت تابشی به مراتب بالاتری دارد [۱۵]. هم‌چنین حضور عناصر سبکی چون کربن و هیدروژن در ساختار این رزین، آن را در حفاظ‌سازی تابش‌های نوترونی بسیار مناسب کرده است. رزین‌های اپوکسی به دلیل چگالی پایین (حدود $1/11 \text{ g.cm}^{-3}$)، چسبندگی خوب، پایداری محیطی و حرارتی خوب و استحکام بالا، به طور گسترده و به صورت مواد کامپوزیتی در صنعت استفاده می‌شوند. این رزین، مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارد و در شرایط معمولی از استحکام قابل قبولی برخوردار است.

به منظور تضعیف گامای ثانویه، استفاده از عناصری با عدد اتمی و چگالی بالا در بستر پلی‌مری روشی مؤثر و کاربردی است. با افزودن مواد تقویت‌کننده به بستر سبک پلی‌مری، چگالی کامپوزیت تغییر خواهد کرد. مقادیر تنوری چگالی کامپوزیت‌ها با فرض نداشتن حباب^(۱۱)، با رابطه‌ی (۵) به دست می‌آید

$$\rho_c = \frac{100}{\left[\frac{M}{\rho_m} + \frac{F}{\rho_f} \right]} \quad (5)$$

که در آن M و ρ_m به ترتیب درصد وزنی و چگالی زمینه‌ی پلی‌مری و F و ρ_f به ترتیب درصد وزنی و چگالی ماده‌ی پرکننده (تقویت‌کننده) است.

**جدول ۲.** نتایج آنالیز CHN رزین اپوکسی استفاده شده

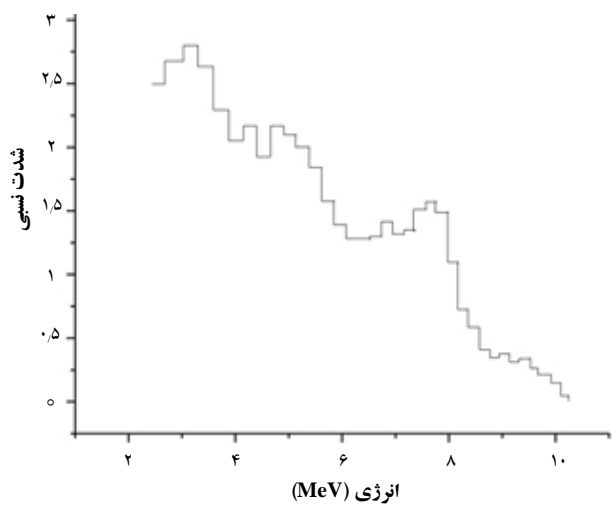
عنصر	w/w %
کربن	۶۶٫۴۸
هیدروژن	۸٫۰۶
نیتروژن	۵٫۳۸

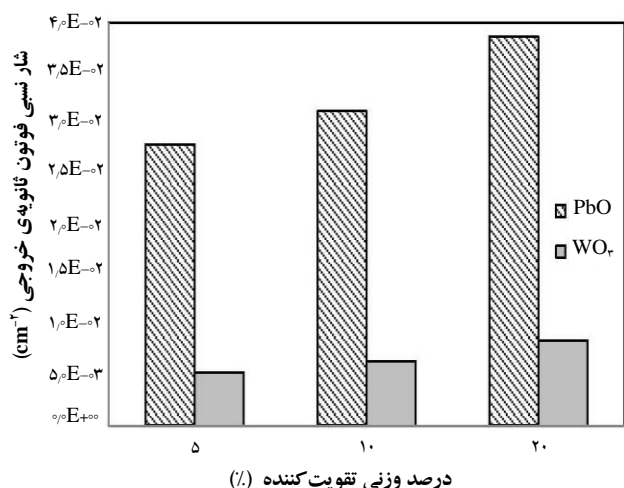
۴. یافته‌ها و بحث

استفاده از رزین اپوکسی علاوه بر مقاومت حرارتی و مکانیکی بالا، به دلیل قابلیت کاربری پیوسته در برابر تابش‌های نوترون و گاما، بسیار مورد توجه صنعت هسته‌ای قرار گرفته است. نتایج آنالیز CHN در جدول ۲ نشان می‌دهد رزین اپوکسی ماده‌ای است که از عناصر سبکی هم‌چون هیدروژن و کربن تشکیل شده است. هیدروژن و کربن در فرایند پرتوزاسازی نوترونی به ترتیب فوتون‌های گامای ثانویه پرنانرژی ۲٫۲ MeV و ۱ تا ۵ MeV را تولید می‌کنند [۱۹]. بنابراین بررسی و حفاظ‌سازی گاماهاى ثانویه پرنانرژی تولیدی در یک میدان نوترونی، امری لازم و ضروری است. به دلیل حضور عناصر سبک در اپوکسی، ضمن بهبود فرایند کندسازی نوترون‌های سریع براساس رابطه‌ی ۱، برخورد‌های ناکشسان نوترونی و سرانجام تولید تابش‌های گامای ثانویه به حداقل مقدار خود خواهد رسید.

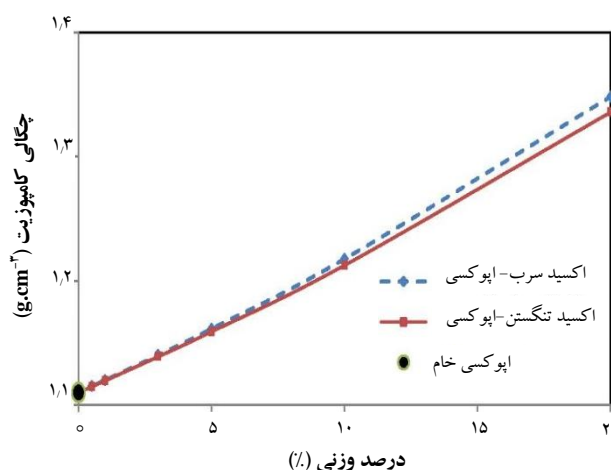
شکل ۳ تغییرات چگالی تئوری کامپوزیت‌های تقویت شده با اکسید سرب ($\rho=9,53 \text{ g.cm}^{-3}$) و اکسید تنگستن ($\rho=7,16 \text{ g.cm}^{-3}$) با درصد وزنی متفاوت را نشان می‌دهد. با افزایش درصد وزنی تقویت‌کننده‌ی سرب و یا تنگستن، چگالی حفاظ کامپوزیتی نیز افزایش خواهد یافت. با این وجود، استفاده از تنگستن به عنوان جاذب گاما، افزایش وزن کم‌تری را نسبت به سرب تحمیل خواهد کرد. برای مثال حفاظ تنگستنی با درصد وزنی ۵٪ و ۲۰٪، در واحد حجم، به ترتیب ۹۹٫۷۹ و ۹۹٫۰۷ درصد نسبت به حفاظ سربی سبک‌تر است. از طرفی همان‌طور که در جدول ۱ مشخص است، چگالی الکترونی برای سرب و تنگستن تقریباً برابر است. از دیدگاه اصول حفاظ‌سازی، برای فوتون‌های گامای اولیه و یا ثانویه پرنانرژی، استفاده از تنگستن به جای سرب علاوه بر مزایای متعددی که دارد محدودیتی ایجاد نمی‌کند، هر چند قیمت بالای تنگستن نسبت به سرب قابل ملاحظه است.

از نتایج آنالیز $\text{CHN}^{(13)}$ ارائه شده در جدول ۲، درصد‌های وزنی عناصر رزین اپوکسی پخت شده با هاردنر (نسبت ترکیبی هاردنر به اپوکسی ۱۵٪ وزنی) به عنوان ورودی در برنامه استفاده شد. طیف نوترونی چشمه‌ی Am-Be [۱۷] با بهره‌گیری از نرم‌افزار Origin Pro8.5.1 به صورت نمودار ستونی در این شبیه‌سازی استفاده شد. استفاده از این چشمه‌ی نوترونی با نیم-عمر طولانی (در حدود ۴۳۳ سال) و با انرژی میانگین نوترونی ۴ MeV، در بسیاری از پژوهش‌ها متداول است [۱۸]. شکل ۲، طیف استخراجی از این نرم‌افزار را نشان می‌دهد. هندسه‌ی مسئله، وابسته به درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده در اپوکسی خواهد بود. سرانجام با بهره‌گیری از تالی $\text{F}_2^{(14)}$ برای فوتون، و با در نظر گرفتن شماره‌ی واکنش ۲۰۲ در کارت FM، شار کلی فوتون عبوری از واحد سطح، محاسبه شد. از آن‌جا که در این شبیه‌سازی، بررسی جاذب نوترونی و اندازه‌گیری تضعیف شار نوترون هدف پژوهش نبوده است، منشأ فوتون‌های ثانویه‌ی نوع P۳ در نظر گرفته نشده است. تابش‌های ترمزی ایجاد شده نیز با بهره‌گیری از مدل $\text{TTB}^{(15)}$ و تنظیم سوئیچ IDES در کارت phys:p در حالت فیزیک تفصیلی، لحاظ شده‌اند. ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت‌ها با درصد‌های وزنی ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ از تنگستن و سرب با یکدیگر مقایسه شدند. هم‌چنین شدت غیرتضعیفی I_0 در رابطه‌ی ۳ مربوط به حضور اپوکسی خام، با صفر درصد وزنی تقویت‌کننده، در برابر باریکه‌ی نوترونی است.

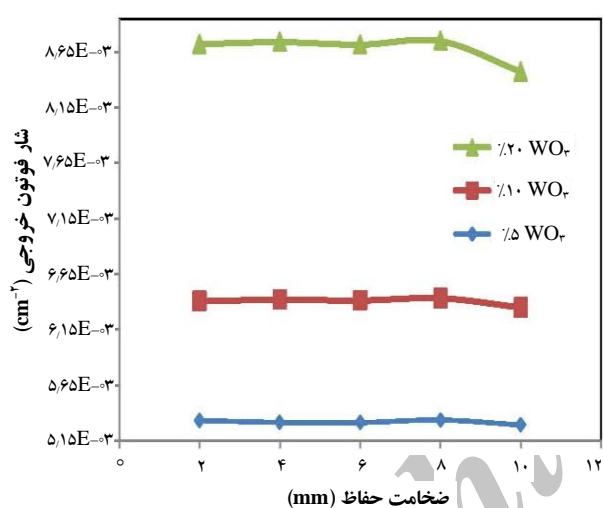
**شکل ۲.** طیف نوترونی Am-Be استفاده شده در شبیه‌سازی.



شکل ۴. مقایسه‌ی شدت نسبی فوتون خروجی از حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن و اکسید سرب.



شکل ۳. مقایسه‌ی تئوری تغییرات جگالی کامپوزیت‌های تقویت شده با سرب و تنگستن با درصد وزنی متفاوت.



شکل ۵. تغییرات شار فوتون خروجی با ضخامت حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با درصد‌های مختلف وزنی از تنگستن.

نتیجه‌ی شبیه‌سازی با کد MCNP در مورد دو حفاظ کامپوزیتی جاذب گاما که نسبت به کامپوزیت خام به‌هنگام شده است، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، تأثیر مثبت حضور عناصر جاذب گاما در اپوکسی خام بر قدرت حفاظ به خوبی نمایان و تمامی مقادیر شار فوتون خروجی نسبت به اپوکسی خام بسیار کم‌تر از یک است. در یک میدان نوترونی، افزایش درصد وزنی اکسید تنگستن و یا اکسید سرب در حفاظ پلی‌مری، تأثیری منفی بر کارایی حفاظ پرتوهای گاما خواهد داشت. با وجود تصور اولیه مبنی بر بهبود خواص حفاظ با افزایش درصد وزنی عناصر سنگین در زمینه‌ی سبک پلی‌مری، نتیجه کاملاً متضاد است و با افزایش درصد وزنی، کارایی تضعیف گامای ثانویه کاهش یافته و شدت فوتون‌های خروجی رو به افزایش است. در توضیح این مطلب باید یادآور شد که حفاظ در یک میدان نوترونی قرار دارد و احتمال برهم‌کنش ناکشسان نوترون‌های سریع با عناصر سنگین موجود در حفاظ با افزایش درصد وزنی این عناصر، افزایش می‌یابد. با این وجود، استفاده از تنگستن به جای سرب این تأثیر منفی را به طور چشمگیری کاهش داده است. ضمن این که تنگستن علاوه بر این که احتمال برهم‌کنش ناکشسان را کاهش می‌دهد، تابش ترمزی کم‌تری نسبت به سرب ایجاد خواهد کرد.

همین نتیجه در شکل ۵ نیز به خوبی نشان داده شده است. در این شکل قدرت تضعیف حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با درصد‌های مختلف وزنی از ذرات اکسید تنگستن تا

ترمزی کم‌تری نسبت به سرب ایجاد خواهد کرد.



۵. نتیجه‌گیری

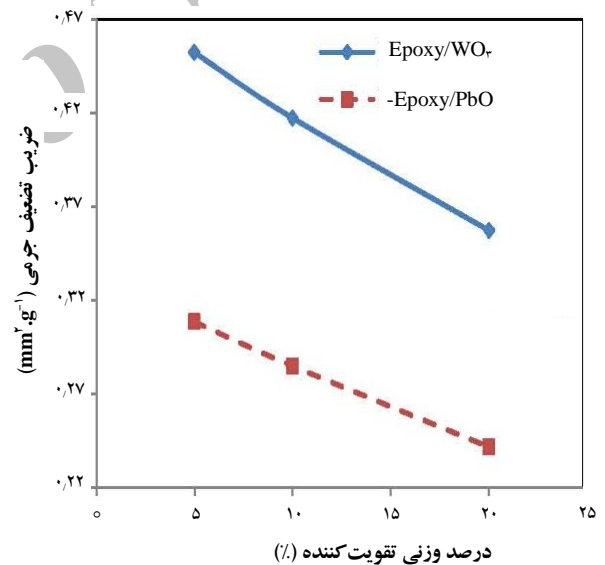
در این پژوهش، با استفاده از روش مونت کارلو به همراه داده‌های تجربی، عملکرد حفاظ‌های کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن و اکسید سرب در طیف انرژی نوترونی چشمه Am-Be بدون حضور جاذب نوترونی مطالعه شد. اپوکسی به عنوان پلی‌مری گرماسخت، به دلیل ترکیبات با عدد اتمی پایین خود، می‌تواند کسر بیش‌تری از انرژی نوترون‌های سریع را در هر برهم‌کنش تضعیف کند. حضور یک میدان نوترونی، معمولاً همراه با طیفی از فوتون‌های ثانویه همراه خواهد بود. از طرفی با افزایش عدد اتمی ماده‌ی حفاظ، احتمال پراکندگی ناکشسان نوترون‌های پرنانرژی افزایش خواهد یافت که طی آن طیفی از فوتون‌های گاما ایجاد می‌شود. بنابراین استفاده از تنگستن با عدد اتمی کم‌تر نسبت به سرب، ضمن سبک کردن وزن نهایی حفاظ، سبب تولید کم‌تر تابش‌های گامای ثانویه خواهد شد. هم‌چنین به دلیل چگالی الکترونی برابر با سرب، حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن می‌تواند فوتون‌های پرنانرژی تولیدی را به خوبی حفاظ‌سازی کند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با درصد‌های وزنی مشابه از تنگستن و سرب، حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن، ضریب تضعیف جرمی بالاتری را نشان می‌دهد و بنابراین می‌تواند قدرت حفاظ‌سازی بهتری حاصل نماید. افزایش بیش‌تر درصد وزنی ماده‌ی تقویت‌کننده، ضمن افزایش چگالی و نیز افزایش وزن حفاظ کامپوزیتی، از قدرت حفاظ می‌کاهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Boron neutron capture therapy
2. Inelastic scattering
3. Neutron absorber
4. Elastic scattering
5. Lead free
6. Reinforced polymers
7. Half value layer
8. Polymeric matrix composite
9. Thermoset
10. Epoxide
11. Void free
12. Neat epoxy
13. Carbon, Hydrogen, Nitrogen
14. Tally
15. Tick-target bremsstrahlung

کم‌تری و در نتیجه کاهش شار فوتون‌های ثانویه خواهد شد. کاهش در شار فوتون‌های خروجی از حفاظ پلی‌مری با درصد‌های وزنی بالاتر، با شیب بیش‌تری همراه است.

ضریب تضعیف جرمی ماده، به عنوان معیاری مناسب در مقایسه‌ی قدرت یک حفاظ در تضعیف باریکه به شمار می‌آید. بالا بودن این ضریب برای یک حفاظ به منزله‌ی قدرت بیش‌تر حفاظ‌سازی آن است. شکل ۶ با مقایسه‌ی ضریب تضعیف جرمی دو حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن و اکسید سرب در ضخامت ۱۰ mm، قدرت حفاظ کامپوزیت تقویت شده با اکسید تنگستن نسبت به مورد اکسید سرب را به خوبی نشان می‌دهد. جدول ۳ نتایج عددی شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از این جدول مشخص است، افزایش درصد وزنی که با تولید بیش‌تر فوتون‌های ثانویه در برهم‌کنش با نوترون‌های سریع همراه است (شکل ۵)، این ضریب را کاهش می‌دهد.



شکل ۶. ضریب تضعیف جرمی حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید تنگستن و حفاظ کامپوزیتی تقویت شده با اکسید سرب.

جدول ۳. تغییرات ضریب تضعیف جرمی کامپوزیت‌های تقویت شده با

اکسید سرب در ضخامت ۱۰ mm

درصد وزنی (%)	ضریب تضعیف جرمی با تقویت‌کننده WO ₂ (mm ² .g ⁻¹)	ضریب تضعیف جرمی با تقویت‌کننده PbO (mm ² .g ⁻¹)
۵	۰٫۴۵۲	۰٫۳۰۸
۱۰	۰٫۴۱۷	۰٫۲۸۵
۲۰	۰٫۳۵۷	۰٫۲۴۱



- [1] J.W. Kim, B.C. Lee, Y.R. Uhm, J.H. Jun, Polymer nanocomposite based multi-layer neutron shields, *Nuclear Physics and Radiation Physics*, (S73) (2010).
- [2] A. Mortley, Radiation effects on the properties of a polyurethane/epoxy graft interpenetrating polymer network: An investigation into the application of polymers in the fabrication of containers to store radioactive waste *Environmental Science & Technology*, (2005) 182.
- [3] R. Lo Frano, G. Pugliese, G. Forasassi, Thermal analysis of a spent fuel cask in different transport conditions. *Energy*, 36(4) (2011) 2285-2293.
- [4] R.C. Singletery, S.A. Thibeault, Materials for low-energy neutron radiation shielding, NASA/TP-2000-210281, (2000), NASA/TP-2000-210281.
- [5] J. Kim, J.H. Jun, Y.J. Bae, Epoxy resin composition for neutron shielding, and method for preparing the same, Google Patents (2014).
- [6] M.K. Lee, J.K. Lee, J.W. Kim, G.J. Lee, Properties of B₄C-PbO-Al(OH)₃-epoxy nanocomposite prepared by ultrasonic dispersion approach for high temperature neutron shields. *Journal of Nuclear Materials*, 445 (2014) 63-71.
- [7] O.G. TurgayKorkut, E. Kam, W. Brostow, X-ray, gamma, and neutron radiation tests on epoxy-ferrochromium slag composites by experiments and monte carlo simulations, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 18(3) (2013) 224-231.
- [8] N.R. Paluvai, S. Mohanty, S.K. Nayak, Studies on thermal degradation and flame retardant behavior of the sisal fiber reinforced unsaturated polyester toughened epoxy nanocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(24) (2015) 15.
- [9] M.Q. Zhang, G. Shi, M.Z. Rong, B. Wetzel, K. Friedrich, Sliding wear behavior of epoxy containing nano-Al₂O₃ particles with different pretreatments. *Wear*, 256 (2004) 1072-1081.
- [10] J. Abenojar, M.A. Martinez, F. Velasco, Effect of boron carbide filler on the curing and mechanical properties of an epoxy resin, *The Journal of Adhesion*, 85(4-5) (2009) 216-238.
- [11] H. Cember, T.E. Johnson, Introduction to health physics, Fourth Edition. (2009) Mc Graw-Hill Companies.
- [12] W. Kraus, Boron containing polymers for radiation shielding. *Polymer preprints*, 34 (1993) 592-559.
- [13] V. Harish, N.N.T. Niranjana Prabhu, K.T. Varughese, Preparation and characterization of lead monoxide filled unsaturated polyester based polymer composites for gamma radiation shielding applications, *Journal of Applied Polymer Science*, 112 (2009) 1503-1508.
- [14] V.I. Pavlenko, V.M. Lipkanskii, R.N. Yastrebinskii, Calculations of the passage of gamma-quanta through a polymer radiation-protective composite, *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 77(1) (2004).
- [15] H.S.a.W.S. Ginell, Nuclear and space radiation effects on materials-space vehicle design criteria, NASA-SP-8053, (1970).
- [16] Monte Carlo N-Particle Transport Code System. CCC-701/MCNP4C2. (Radiation Shielding Information Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN), (2001), Los Alamos National Laboratory.
- [17] E.A. Lorch, Neutron spectra of ²⁴¹Am/B, ²⁴¹Am/Be, ²⁴¹Am/F, ²⁴²Cm/Be, ²³⁸Pu/¹³C and ²⁵²Cf isotopic neutron sources, *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 24 (1973) 585-591.
- [18] B. Chilton, J. Kenneth Shultis, R.E. Faw, Principles of radiation shielding, (1984) New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 493.
- [19] R.B. Firestone, In database for prompt gamma-ray neutron activation analysis, International Atomic Energy Agency (2014).