

طراحی و ساخت حفاظ چشمه نوترون با استفاده از کامپوزیت پلی متیل متاکریلات حاوی اسیدبوریک و پلی اتیلن ساخته شده به وسیله پلیمریزاسیون درجا

شقایق شهرام^۱، سیدفرهاد مسعودی^{۲*}، شروین احمدی^۳ و اسماعیل بیات^۳

^۱دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

^۲پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران.

^۳پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، کدپستی: ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵

پست الکترونیکی: masoudi@kntu.ac.ir

چکیده

ساخت حفاظ‌های نوترونی با شکل هندسی خاص و با استفاده از روش‌های ماشین‌کاری، زمان‌بر و پرهزینه است. هم‌چنین در صورت بزرگ بودن حفاظ و یا نیاز به ساخت سریع، حفاظ‌های پلیمری رایج مانند پلی‌اتیلن حاوی بور، کاربری لازم را ندارند. در این پژوهش از پلیمر پلی متیل متاکریلات (PMMA) به‌عنوان پایه‌ی پلیمری، پودر اسیدبوریک به‌عنوان جاذب نوترون و پودر پلی‌اتیلن با چگالی بالا جهت افزایش میزان هیدروژن برای ساخت حفاظ کامپوزیتی به‌روش پلیمریزاسیون درجا استفاده شده است. درصد ترکیب بهینه مواد کامپوزیت با استفاده از شبیه‌سازی در کد MCNPX محاسبه شده و حفاظ‌های ساخته‌شده در چیدمانی شامل آشکارساز ^3He و چشمه نوترون Am-Be مورد ارزیابی قرار گرفتند. بنابر نتایج به‌دست آمده، با استفاده از حفاظ کامپوزیتی شامل ۶۷٪ پلی متیل متاکریلات، ۲۸٪ اسیدبوریک و ۵٪ پلی اتیلن چگالی بالا، شار نوترون حرارتی در حدود ۸۰٪ نسبت به پلی اتیلن خالص کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج به‌دست آمده کارایی مناسب این حفاظ کامپوزیتی را نشان داد.

کلیدواژگان: حفاظ نوترونی، چشمه Am-Be^{241} ، پلی متیل متاکریلات، بوریک اسید، پلیمریزاسیون درجا، MCNPX2.6.

۱. مقدمه

آن‌جا که میزان نفوذ و تاثیرگذاری پرتوهای هسته‌ای بستگی به نوع تابش و محیط برهم‌کنش دارد، از منظر حفاظ‌سازی، همه تابش‌ها و محیط اطراف آن‌ها از اهمیت یکسانی برخوردار نیستند. در میان تابش‌های هسته‌ای، حفاظ‌سازی تابش نوترون و گاما به‌واسطه نداشتن بار و عمق نفوذ بالای آن‌ها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

امروزه استفاده از تابش‌های هسته‌ای در زمینه‌های گوناگون مانند صنعت، کشاورزی و پزشکی رو به گسترش است. در کنار مطالعه کاربردهای پرتوهای هسته‌ای، یکی از مهم‌ترین مباحث در زمینه ایمنی هسته‌ای، حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای است تا از آثار مخرب این تابش‌ها بر روی محیط جلوگیری شده و میزان دز دریافتی در انسان‌ها کاهش یابد. از

حفاظت‌سازی چشمه‌های نوترونی بستگی به قدرت چشمه و نوع کاربرد آن‌ها دارد و هنوز هم از موضوعات مورد مطالعه در دنیا محسوب می‌شود. ماده‌ای را می‌توان یک حفاظ خوب به حساب آورد که بدون گسیل یک تابش خطرناک ثانویه، در ضخامت‌های کمتر، منجر به افت انرژی بیش‌تری شود و در عین حال تحت تأثیر تابش، خواص مکانیکی و اپتیکی آن تغییری نکند [۱، ۲].

حفاظت‌سازی نوترون مبتنی بر اصل تضعیف نوترون‌های سریع و تبدیل آن‌ها به نوترون حرارتی، سپس جذب نوترون‌های حرارتی به واسطه مواد جاذب نوترون و درنهایت کاهش دز نوترون و هم‌چنین حذف گاما‌های اولیه و ثانویه تولید شده است. چالش اساسی در ساخت و طراحی حفاظ نوترون، استفاده از موادی است که به‌طور هم‌زمان علاوه بر کاهش دز نوترون، گاما‌های ثانویه پراورزی تولید نکنند. از آن‌جا که نمی‌توان ماده‌ای یافت که تمام خواص مورد نیاز را دارا باشد، باید به دنبال روشی برای ترکیب مواد مختلف با خواص متفاوت بود. یکی از این راه‌کارها بهره‌گیری از مواد کامپوزیتی است. کامپوزیت‌ها مواد چندجزئی هستند که اجزای مختلف آن‌ها کارایی یکدیگر را بهبود می‌بخشند [۳-۵].

به‌طور معمول برای حفاظت‌سازی در برابر نوترون از پلیمرهای غنی از هیدروژن که شامل جاذب‌های نوترون حرارتی است، استفاده می‌شود [۶، ۷]. یکی از بهترین جاذب‌های نوترون حرارتی، بور و یا ترکیبات آن است که دارای سطح مقطع بسیار بالایی با نوترون‌های حرارتی در حدود ۷۸۰ بارن است [۸].

به‌جهت خواص مکانیکی مناسب، راحتی ساخت و مقرون‌به‌صرفه بودن و سبکی در سال‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری در صنعت حفاظت‌سازی توسعه بسیاری داشته است [۹، ۱۰]. علی‌رغم مزایای پلیمرهای متداول برای ساخت حفاظ مانند پلی‌اتیلن‌های حاوی ترکیبات بوردار،

ساخت و قالب‌زنی این نوع حفاظ‌ها نیازمند ماشین‌آلات صنعتی با امکانات زیاد است؛ در برخی موارد که هندسه منبع تابش نامتقارن یا پیچیده است، قالب‌زنی و برش حفاظ بسیار مشکل‌ساز می‌شود. هم‌چنین روش‌های ساخت این نوع حفاظ‌ها معمولاً پرهزینه و بسیار زمان‌بر است.

پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات (PMMA) یک ترموپلاستیک شفاف با مزایای مکانیکی استثنایی است که امکان پلیمریزه شدن به‌روش پلیمریزاسیون درجا را داشته و نیازی به حرارت‌دهی و یا پرتو‌دهی ندارد [۱۱]. روش پلیمریزاسیون درجا که در این پژوهش جهت ساخت حفاظ‌های کامپوزیت نوترون از آن استفاده شده است، این امکان را فراهم می‌آورد که برای هر نوع قالب دلخواه بدون نیاز به ماشین‌آلات صنعتی پیشرفته ساخت کامپوزیت‌ها صورت گیرد و در نتیجه حفاظت‌سازی در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به سایر روش‌ها و با هزینه‌های کمتری انجام شود.

در یکی از تحقیقاتی که در سال ۲۰۱۹ توسط یک گروه ترکیب‌ای انجام گرفت، با افزودن درصد‌های متفاوتی از کلمانیت (که غنی از هیدروژن بوده و دارای ترکیبات بور است) به ماتریس PMMA، ترکیب جدیدی برای افزایش قابلیت کامپوزیت پلیمری حفاظ پرتویی میدان‌های مختلط نوترون و گاما ساخته شد. این گروه تأثیر تقویت‌کننده کلمانیت را با ۴ غلظت متفاوت برای بررسی ویژگی‌های حفاظ پرتویی آزمایش کردند. این گروه با افزودن ۴۰٪ وزنی کلمانیت، افزایش ظرفیت حفاظ پرتویی برای فوتون‌های گاما را تا حدود ۱۱٪ و برای چشمه نوترون تا حدود ۳۶٪ گزارش کردند. طبق نتیجه‌گیری این گروه، با توجه به کسر وزنی بالای هیدروژن که در ترکیبات وجود دارد این کامپوزیت برای حفاظت در برابر نوترون حرارتی نیز مناسب می‌باشد [۱۲].

در این مقاله، پلی‌متیل‌متاکریلات با قابلیت پلیمریزاسیون درجا و ریخته‌گری به‌عنوان ماتریس پایه پلیمر پیشنهاد

و مقادیر پیشنهادی در جدول ۱ جهت شبیه‌سازی و تست تجربی مدنظر قرار گرفت.

جدول (۱): درصد وزنی ترکیبات نمونه‌های مختلف.

شماره نمونه	پلی متیل متاکریلات	پلی اتیلن (چگالی بالا)	اسیدبوریک
S1	۱۰۰	۰	۰
S2	۸۹	۵	۶
S3	۶۷	۵	۲۸
S4	۵۳	۵	۴۲
S5	۴۵	۵	۵۰

در این مقاله، برای محاسبات شبیه‌سازی، مانند محاسبه شار و یا تعداد نوترون‌های حرارتی عبوری از حفاظ، طیف گامای ثانویه و دز انباشتی نوترون، از کد MCNPX2.6 استفاده شد. چیدمان حفاظ به کار رفته در شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است.

یک چشمه همسانگرد استوانه‌ای شکل نوترون $Am-Be$ با اکتیویته ۴ کوری به شعاع ۵ میلی‌متر و ارتفاع ۲ سانتی‌متر به همراه آشکارساز استوانه‌ای 3He برای ارزیابی شار نوترون حرارتی در فاصله‌ی ۱/۵ سانتی‌متر پشت حفاظ در کد تعریف شد. طیف این چشمه نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. ۶ سانتی‌متر کندکننده از جنس پلی‌اتیلن به‌طور ثابت و سپس ۱ سانتی‌متر کامپوزیت با ترکیب درصدی ذکر شده در جدول ۱ به‌عنوان جاذب نوترون حرارتی در مقابل چشمه در نظر گرفته شد. هدف از این شبیه‌سازی ارزیابی درصد بهینه بور و پلی‌اتیلن اضافه‌شده به پلیمر پایه است.

در شبیه‌سازی صورت‌گرفته درصد ترکیبات مواد و ضخامت حفاظ تغییر کرد و در هر مورد، شار نوترون پس از حفاظ مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه میزان کاهش نوترون‌های حرارتی و طیف گامای ثانویه با یکدیگر و همچنین با پلی‌اتیلن خالص، بهترین هندسه و بهترین ضخامت به‌عنوان نمونه بهینه انتخاب شد.

می‌گردد. پودر تقویت‌کننده پلی‌اتیلن برای بالابردن خواص مکانیکی و همچنین کمک به کاهش نوترون سریع در کنار پلیمر پایه به ماتریس اضافه می‌شود. یکی از اولویت‌های ساخت این حفاظ، مقرون‌به‌صرفه بودن و امکان تولید در داخل کشور است. بنابراین از بین ترکیبات بوردار فراوان، اسیدبوریک به‌عنوان جاذب نوترون حرارتی استفاده شد که از دیگر مزایای آن می‌توان به عدم سمیت نیز اشاره کرد. در نهایت ترکیب جدیدی برای ساخت حفاظ نوترون ارائه شده و کارایی آن در مقایسه با حفاظ پلی‌اتیلنی مورد سنجش قرار می‌گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. بهینه‌سازی ترکیب حفاظ کامپوزیتی

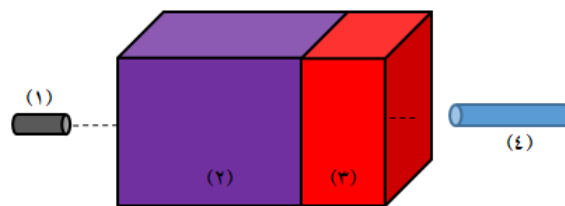
از آنجایی که سطح مقطع جذب نوترون‌های سریع قابل چشم‌پوشی است، لازم است با به‌کارگیری مواد مناسب، ابتدا نوترون‌های سریع را به نوترون‌های گرمایی تبدیل کرد و سپس به‌وسیله هسته‌هایی که سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی بالایی دارند، شار نوترون‌های پشت حفاظ را کاهش داد [۱].

فرآیند کاهش انرژی نوترون عمدتاً به‌وسیله برخوردهای کشسان با هسته‌های سبک مانند هیدروژن صورت می‌گیرد. از طرفی بورون کربید، اسیدبوریک و یا بوراکس که حاوی بورون هستند، گزینه‌های مناسبی برای جذب نوترون‌های حرارتی می‌باشند [۱۳]. آنچه مسلم است، افزایش درصد اسیدبوریک در کامپوزیت تأثیر زیادی بر کاهش نوترون گرمایی عبوری دارد و به‌دلیل کاهش هیدروژن کامپوزیت، در حد ناچیزی باعث افزایش نوترون سریع عبوری می‌شود. از طرف دیگر اضافه‌نمودن افزودنی به پایه پلیمری با حفظ امکان پلیمریزاسیون درجا، محدودیت‌هایی دارد. نسبت درصد تقویت‌کننده‌ها به پلیمر پایه تا حد رسیدن به میزان اشباع رزین برای حفظ ویسکوزیته مواد با آزمون‌های متعدد بررسی گردید

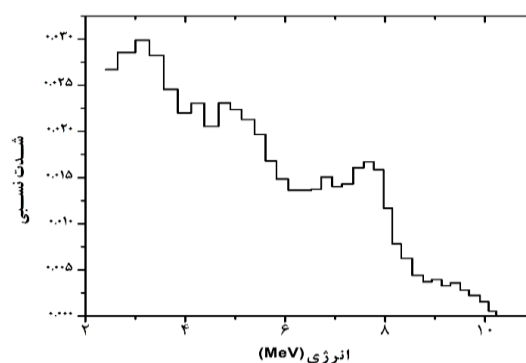
کلی به منظور حفظ شدن حالت خمیری ترکیبات، حداکثر تقویت کننده‌ی اضافه شده به رزین پایه در حدود ۴۰-۵۰ درصد کل نمونه تخمین زده شده است. این میزان برای هر پودر و مایع تقویت کننده‌ای بسته به شکل شبکه‌های مولکولی مواد واکنش‌هایی شیمیایی متفاوت خواهد بود. علاوه بر ازدست رفتن ویسکوزیته رزین افزودن تقویت کننده‌ها بیش از مقدار تعیین شده سبب شکست حرارتی، پایین آمدن خواص مکانیکی، پلیمری و همچنین در برخی موارد عدم تکمیل فرآیند پلیمریزاسیون می‌شود. قالب‌هایی از جنس شیشه‌ی نشکن، پیرکس، پلاستیک مقاوم در برابر حرارت و آلومینیوم برای روش پلیمریزاسیون درجا مورد آزمایش قرار گرفت که در نهایت قالب‌های آلومینیومی به سبب گردش حرارتی بهتر که بهبود و تسریع روند پلیمریزاسیون و همچنین جدا شدن آسان‌تر نمونه را به دنبال دارد، انتخاب شد. رزین شفاف متیل متاکریلات، به همراه بوریک‌اسید و پلی اتیلن چگالی بالا تا حاصل شدن یک ترکیب خمیری شکل و همگن به وسیله مخلوط‌کن، مخلوط شده و ماده پخت (پروکساید) در مرحله آخر به ترکیبات افزوده شد. فرآیند قالب‌گیری نمونه‌ها برخلاف ساخت بسیاری از کامپوزیت‌های پلیمری و یا لاستیکی که مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی است و نیاز به دستگاه‌های پیچیده‌ای دارد، به راحتی انجام شده و ساخت نمونه‌ها در زمان نسبتاً کوتاهی (۵-۲ ساعت) انجام گرفت. شکل ۳، نمونه S2 ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شمایی از شکل و ابعاد حفاظ کامپوزیتی ساخته شده شامل ۸۹٪ پلی متیل متاکریلات، ۵٪ پلی اتیلن چگالی بالا و ۶٪ اسیدبوریک.



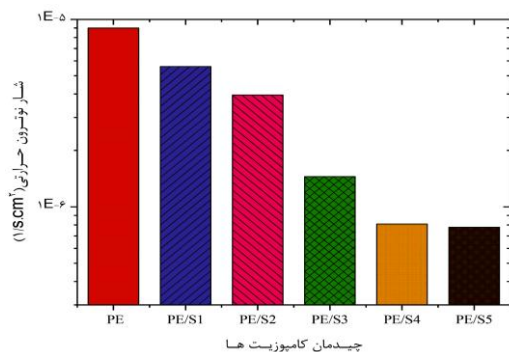
شکل (۱): هندسه به کار رفته در شبیه‌سازی با کد MCNP برای بررسی درصد بهینه ترکیبات کامپوزیت براساس جدول ۱. (۱): چشمه همسانگرد استوانه‌ای نوترون (۲): کندکننده از جنس پلی اتیلن به ضخامت ۶ سانتی‌متر. (۳): یک سانتی‌متر از کامپوزیت با درصدهای اشاره شده در جدول ۱. (۴): آشکارساز ^3He .



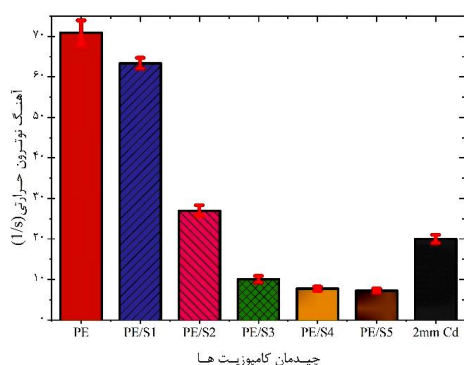
شکل (۲): طیف چشمه نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ استفاده شده در کار تجربی و شبیه‌سازی.

۲.۲. ساخت حفاظ به روش پلیمریزاسیون درجا

به‌عنوان اولین قدم در ساخت نمونه‌ها، پروکساید بهینه جهت ساخت MMA تعیین شد. آزمایش‌های اولیه نشان داد ۱٪ وزنی پروکساید اضافه شده به رزین موجب داغ شدن شدید نمونه، ایجاد حباب‌هایی روی سطح و جوشیدن پلیمر می‌شود. با کم کردن پروکساید و ساخت نمونه‌هایی با درصدهای ۰/۷۵، ۰/۵ و ۰/۴، درصد بهینه بسته به دمای محیط، غلظت ترکیبات و ضخامت نمونه در حدود ۰/۴-۰/۶ تخمین زده شد. این مقدار با توجه به دمای محیط، شرایط پخت (استفاده از آون برای تسریع پلیمریزاسیون)، ابعاد نمونه و موارد دیگر تا حدودی متفاوت است. مرحله بعد افزودن پودر اسیدبوریک به منظور جذب نوترون‌های حرارتی و پودر پلی اتیلن جهت تقویت خواص کندکنندگی حفاظ به رزین پایه است. به‌طور



شکل (۵): شبیه سازی شار نوترون حرارتی بر حسب نوع حفاظ داخل آشکارساز.



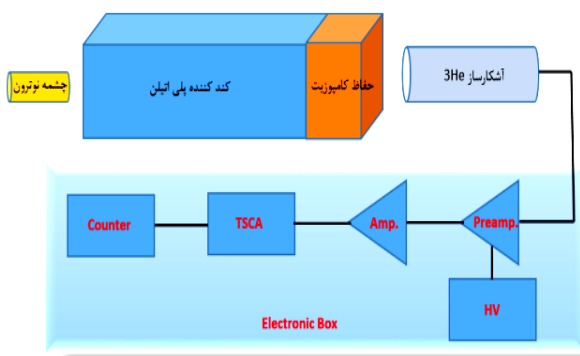
شکل (۶): اندازه گیری تجربی آهنگ نوترون حرارتی بر حسب نوع حفاظ در چیدمان آزمایشگاهی مشخص شده در شکل ۴.

مطابق نتایج تجربی، نمونه های S3 و S4 تقریباً با همان درصدی که به دست آمده در نتایج شبیه سازی، منجر به کاهش نرخ نوترون های حرارتی شده اند. با توجه به نتایج مشابه میزان کاهش نوترون های حرارتی در شبیه سازی و تجربی، مقدار بهینه ی اسیدبوریک اضافه شده به حفاظها در حدود ۳۰٪ (۵٪ بورون طبیعی) تخمین زده شد. در مراحل بعدی، ارزیابی عملکرد حفاظ فقط به صورت شبیه سازی انجام شد. برای مقایسه چیدمان های مختلف، سه حالت حفاظ ترکیبی از پلی اتیلن و نمونه S3، کل حفاظ از نمونه S3 و کل حفاظ از پلی اتیلن، که به ترتیب چیدمان ۱ تا ۳ نامگذاری شده اند، مورد بررسی قرار گرفتند. شکل ۷ و جدول ۲ تعداد نوترون های حرارتی و دز پس از حفاظ را پس از این چیدمان ها نشان می دهد.

۳.۲. چیدمان آزمایشگاهی جهت بررسی حفاظ

کامپوزیتی

برای بررسی حفاظ کامپوزیتی ساخته شده با درصد ترکیبات مختلف، یک چیدمان آزمایشگاهی به صورت شکل ۴ در نظر گرفته شد. در آزمایش صورت گرفته از یک چشمه همسانگرد استوانه ای نوترون $^{241}\text{Am-Be}$ با اکتیویته ۴ کوری و آشکارساز استوانه ای ^3He مدل LND-25169 برای ارزیابی شار نوترون حرارتی در فاصله ی ۱/۵ سانتی متر پشت حفاظ استفاده شد.

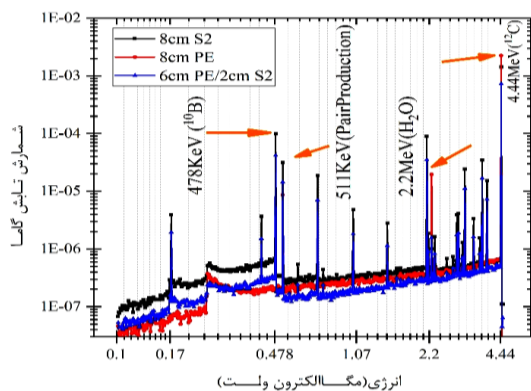


شکل (۴): چیدمان حفاظ و بلوک دیاگرام مدار الکترونیک.

۳. نتایج

شکل ۵ شار نوترون حرارتی پس از عبور از نمونه های مختلف (در جدول ۱) را نشان می دهد. چنان که نتایج نشان می دهد، شار نوترون حرارتی پس از ۶ سانتی متر پلی اتیلن و ۱ سانتی متر نمونه S3 و S4، به ترتیب در حدود ۸۵٪ و ۹۰٪ نسبت به حالتی که فقط پلی اتیلن قرار داشته کاهش داشته است. برای بررسی این نتایج نمونه های ساخته شده بر اساس روش توضیح داده شده در بخش ۲.۲ در چیدمان آزمایشگاهی ارائه شده در بخش ۳.۲ مورد استفاده قرار گرفت. شکل ۶ نتیجه نرخ نوترون های شمارش شده در آشکارساز را برای نمونه های مختلف ساخته شده (مطابق جدول ۱) نشان می دهد.

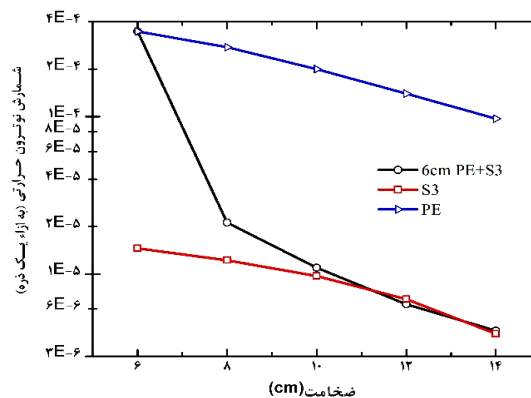
پرتوهای گاما نیز بهتر عمل کرده است و به‌ویژه در قله انرژی ۴/۴۴ MeV که مربوط به برهم‌کنش نوترون با کربن است، تعداد فوتون‌های بعد از چیدمان ۲ در حدود ۶۵٪ نسبت به پلی‌اتیلن خالص کاهش داشته‌اند.



شکل (۸): طیف گاما برحسب انرژی پس از سه چیدمان ۱، ۲ و ۳.

۳. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ماده‌ی PMMA به‌عنوان یک پایه پلیمر جدید به‌همراه اسیدبوریک و پودر پلی‌اتیلن با درصدهای مختلف، برای حفاظ چشمه‌ی Am-Be مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تست‌های عملی و شبیه‌سازی نشان داد کامپوزیت ساخته‌شده از PMMA، اسیدبوریک و پلی‌اتیلن با درصد ۶۷٪، ۲۸٪ و ۵٪، بهینه تضعیف شار نوترون حرارتی را موجب خواهد شد. برای بررسی و مقایسه چیدمان‌های مختلف، سه چیدمان پلی‌اتیلن-کامپوزیت بهینه، کامپوزیت بهینه خالص و پلی‌اتیلن خالص در شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد ۸ سانتی‌متر از چیدمان‌های اول و دوم، ۸۵٪ تعداد نوترون‌های حرارتی را بیش‌تر از همان میزان ضخامت پلی‌اتیلن کاهش داده است. با این وجود در ارزیابی طیف گاما، چیدمان اول رفتار بهتری نشان داد. ضمن این‌که در کاهش دز نسبت به پلی‌اتیلن و حتی چیدمان ۲ تأثیر بیشتری داشته است. با توجه به نتایج و توجه به این نکته که افزایش ۲ برابری اسیدبوریک تا ۴۶٪ وزنی (۸٪ بور) تفاوت زیادی در کاهش نوترون حرارتی نداشته است، ضمن این‌که افزودن حدود ۵۰٪ از یک ترکیب



شکل (۷): شمارش نوترون‌های حرارتی پس از چیدمان ۱ (حفاظ ترکیبی از پلی‌اتیلن و نمونه S3)، چیدمان ۲ (کل حفاظ از نمونه S3) و چیدمان ۳ (کل حفاظ از پلی‌اتیلن).

جدول (۲): دز نوترون (pGy) محاسبه‌شده با استفاده از کد MCNP در کره‌ای حاوی آب به شعاع ۲ سانتی‌متر و در فاصله یک سانتی‌متری پس از حفاظ.

نوع چیدمان حفاظ	حرارتی ($\times 10^{-11}$)	فوق حرارتی ($\times 10^{-4}$)	سریع
۱۰ سانتی‌متر S3	۳/۲۶	۱۲/۲	۱/۳۶
۱۰ سانتی‌متر PE	۴/۰۷	۹/۷۸	۱/۱۴
۶ سانتی‌متر +PE	۲/۷۳	۹/۹۸	۱/۰۴
۴ سانتی‌متر S3			

نتایج شکل ۷ و جدول ۲ نشان می‌دهند تضعیف تعداد نوترون‌های حرارتی پس از چیدمان ۱، برای ضخامت بیش‌تر از ۸ سانتی‌متر تفاوت چندانی با کامپوزیت طراحی شده ندارد و کاهش نوترون‌های حرارتی پس از هر دو چیدمان نسبت به پلی‌اتیلن خالص کاهش چشمگیری داشته‌اند. این درحالی‌است که دز نوترون در هر سه بازه‌ی انرژی در چیدمان اول بهتر عمل می‌کند. این تفاوت بیانگر این امر است که نوترون‌های سریع ابتدا در ضخامت بهینه کندکننده تبدیل به نوترون‌های حرارتی شده و سپس لایه دوم که حاوی بورون و جاذب نوترون حرارتی است، دز را در ناحیه‌ی نوترون‌های حرارتی کاهش می‌دهد.

طیف گاما پس از حفاظ در سه نوع چیدمان در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق نتیجه، چیدمان ۲ در کاهش

آلی به کامپوزیت ممکن است منجر به ایجاد اختلال در روند پلیمریزاسیون نمونه‌ها و در نهایت کاهش خواص مکانیکی پلیمر شود، می‌توان اظهار داشت ساخت کامپوزیت PMMA، اسیدبوریک و پلی اتیلن با درصدهای ۰.۶۷٪، ۰.۲۸٪ و ۰.۵٪، پس از ۶ سانتی‌متر پلی اتیلن چیدمان مناسب‌تری جهت کاهش شار نوترون‌های حرارتی و حتی تابش گاما خواهد بود.

۴. مراجع

- [1] A.B. Chilton, J.K. Shultis and R.E. Faw. Principles of Radiation Shielding, Prentice Hall Englewood Cliffs, 488 (1984).
- [2] J.K. Shultis and R.E. Faw. Radiation shielding Technology, Health physics, 88(4) (2005) 297–322.
- [3] Z. Uddin, T. Yasin, M. Shafiq, A. Raza and A. Zahur. On the physical, chemical and neutron shielding properties of polyethylene/boron carbide composites, Radiation Physics and Chemistry, 166 (2020) 108450.
- [4] M.A. Kiani, S.J. Ahmadi, M. Outokesh, R. Adeli and A. Mohammadi. Preparation and characteristics of epoxy/clay/B4C nanocomposite at high concentration of boron carbide for neutron shielding application, Radiation Physics and Chemistry, 141 (2017) 223–228.
- [۵] م.ح. بهشتی و ا.م. رضادوست. پلاستیک‌های تقویت‌شده (کامپوزیت). چاپ پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، (۱۳۸۴).
- [۶] م. میری. طراحی و ساخت نانوکامپوزیت PE/B برای حفاظت در برابر تابش نوترون. پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک هسته‌ای دانشگاه دامغان، (آبان ۱۳۹۲).
- [7] A. Güngör, I.K. Akbay and T. Özdemir. EPDM Rubber with hexagonal Boron Nitride a Thermal Neutron Shielding Composite, Radiation Physics and Chemistry, 165 (2019) 108391.
- [8] S. Avcıoğlu, M. Buldu, F. Kaya, C.B. Üstündağ, E. Kam, Y.Z. Menciloğlu, H.Y. Kaptan and C. Kaya. Processing and properties of boron carbide (B4C) reinforced LDPE composites for radiation shielding, Ceramics International, 46(1) (2020) 343–352.
- [9] K. Herrman, L.N. Baxter, K. Mishra, E. Benton, R.P. Singh and R.K. Vaidyanathan. Mechanical characterization of polyethylene-based thermoplastic composite materials for radiation shielding Composites Communications, 13(2019) 37–41.
- [10] U.V. Ancharova, M.A. Mikhailenko, M.R. Sharafutdinov, B.P. Tolochko, K.B. Gerasimov, M.V. Korobeynikov and A.A. Bryazgin. Structure and properties of radiation modified polyethylene, In IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, 168(1) (2017) 012110.
- [۱۱] ف. فرجی. پلیمری‌زاسیون درجای متیل‌متاکریلات در حضور نانولوله‌های کربنی طی اختلاط واکنشی و بررسی تأثیر آن بر خواص الکتریکی و رئولوژیکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی صنایع پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، (زمستان ۱۳۹۵).
- [12] T. Bel, A. Cuneyt and B. Nilgun. Radiation shielding properties of polymethylmethacrylate/ Colemanite composite for the use in mixed irradiation fields of neutrons and gamma rays, Materials Chemistry and Physics, 221(2019) 58–67.
- [13] T. Özdemir, I.K. Akbay, H. Uzun and I.A. Reyhancan. Neutron shielding of EPDM rubber with boric acid Mechanical, thermal properties and neutron absorption tests, Progress in Nuclear Energy, 89(2016) 102–109.