



طراحی و ساخت حفاظ پرتوی کامپوزیت‌های پلیمری انعطاف‌پذیر برای میدان‌های آمیخته نوترون-گاما

سیدرضا هاشمی¹، مجتبی تاجیک^{1*} و اسکندر اسدی امیرآبادی²

¹دانشکده فیزیک، دانشگاه دامغان، دامغان، سمنان، ایران.

²گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده علوم پایه، پردیس دانشگاه مازندران، بابلسر، مازندران، ایران.

*سمنان، دامغان، دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک، کدپستی: 41167-36716

پست الکترونیکی: tajik@du.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، حفاظ کامپوزیتی انعطاف‌پذیر با ترکیبی از پلی اتیلن، تنگستن و کاربید بور برای میدان‌های آمیخته نوترون-گاما طراحی و ساخته شده است. برای این منظور، در مرحله اول، مطالعات نظری با استفاده از کد چند منظوره MCNP و در مرحله دوم با توجه به نتایج مطالعات شبیه‌سازی، برای اولین بار در داخل کشور کامپوزیت چند منظوره‌ای با استفاده از ترکیب فاز سخت ذرات کاربید بور به همراه پودر فلز تنگستن و ترکیبی از انواع مختلفی از پلی اتیلن نرم و سخت به صورت آزمایشگاهی در مرکز پلیمر و پتروشیمی ایران ساخته شد. در مرحله سوم برای حفاظ ساخته شده، میزان تضعیف شار نوترون چشمه‌ی $^{241}\text{Am-Be}$ با استفاده از آشکارساز BF_3 و میزان تضعیف شار گامای چشمه‌ی سزیوم $100 \mu\text{Ci}$ با استفاده از آشکارساز NaI اندازه‌گیری شد. نتایج نشان می‌دهند در کامپوزیت پلی اتیلن/ کربید بور/ تنگستن (PE/B4C/W) با توجه به ابعاد میکرومتری ذرات تقویت‌کننده و سطح مقطع بالای برهم‌کنش پرتوهای رادیواکتیو با این ذرات، حفاظ ترکیبی با ضخامت بسیار کمتر نسبت به حفاظ‌های معمولی قدرت جذب بیشتری در برابر پرتوهای گاما و نوترون را دارا است. حفاظ با ضخامت 0/5 سانتی‌متر با 30 درصد تنگستن و 30 درصد بور، تقریباً 90 درصد نوترون‌های چشمه آمرسیوم-بریلیوم را جذب می‌کند و با ضخامت 2 سانتی‌متر، حدود 40 درصد شار فوتون‌های گامای چشمه ^{137}Cs را کاهش می‌دهد.

کلیدواژگان: حفاظ کامپوزیتی انعطاف‌پذیر، نوترون، گاما، آشکارساز BF_3 .

1. مقدمه

می‌شود. این پرتوها قابلیت نفوذ بسیار بالایی در مواد دارند و در صورتی که با حفاظ مناسبی تضعیف نشوند، می‌توانند به انسان، موجودات زنده و دستگاه‌های الکترونیکی آسیب‌های جدی وارد سازند و خطرات زیست محیطی جبران‌ناپذیری را

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، استفاده از فناوری هسته‌ای در زمینه‌های مختلف نظامی، صنعتی، پزشکی، کشاورزی و تحقیقاتی رو به افزایش است. در اثر واکنش‌های هسته‌ای، پرتوهای مختلفی از جمله پرتوهای گاما و نوترون ساطع

2. مطالعات شبیه‌سازی

تضعیف شدت باریکه گاما عمدتاً از چهار طریق فوتوالکتریک، کامپتون، تولید زوج و پراکندگی همدوس با الکترون‌های ماده و تضعیف باریکه نوترون در یک ماده از طریق پدیده‌های جذب و یا پراکندگی با هسته‌های اتم ماده صورت می‌گیرد، این تضعیف به صورت تابعی نمایی با رابطه 1 نشان داده می‌شود:

$$I = I_0 e^{-\beta x} \quad (1)$$

در این رابطه I شدت پرتو عبوری از حفاظ واقع شده مابین چشمه و آشکارساز، I_0 شدت اولیه پرتو برای حالتی که مابین چشمه و آشکارساز حفاظی وجود ندارد، β ضریب تضعیف خطی که به جنس ماده‌ی جذب‌کننده و انرژی پرتو (فوتون و نوترون) وابسته است. این ضریب برای فوتون‌های گاما به صورت μ و برای نوترون‌ها به صورت Σ نوشته می‌شود و x ضخامت جذب است.

با استفاده از رابطه 2 درصد تضعیف K برای هر نمونه به دست می‌آید:

$$K = \frac{I_0 - I}{I_0} \times 100 \quad (2)$$

بر اساس نتایج محققین در سال‌های اخیر [1-15]، یک سری از مطالعات شبیه‌سازی و اندازه‌گیری‌های مربوطه برای به دست آوردن مناسب‌ترین مواد محافظ توسط ترکیب درصدوزنی مختلف تنگستن و کاربید بور، به‌عنوان خلاصه به صورت زیر در نظر گرفته شد. حفاظ اول: 7/5 درصد بور و 30 درصد تنگستن، حفاظ دوم: 15 درصد بور و 30 درصد تنگستن، حفاظ سوم: 30 درصد بور و 30 درصد تنگستن.

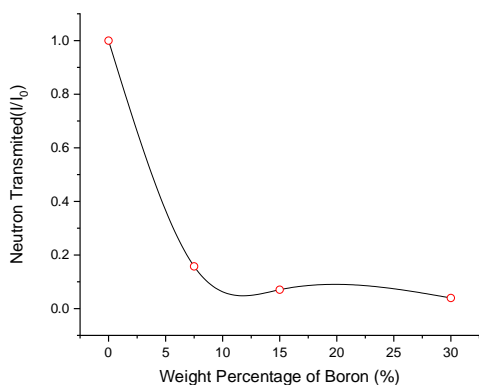
به منظور شبیه‌سازی و بررسی کارایی حفاظ مورد نظر، هندسه مواد و آماره برای کد مونت کارلو MCNPX تعریف شد.

ایجاد نمایندند. لذا گسترش و افزایش کارایی حفاظ‌های پرتوهای هسته‌ای به‌ویژه پرتوهای گاما و نوترون برای حفاظت مردم، تجهیزات و ساختمان‌ها از اثرات مضر پرتوهای مذکور بسیار ضروری به نظر می‌رسد [1-7].

جهت حفاظت در برابر تابش‌های هسته‌ای ممکن است از مواد گوناگونی نظیر سرب، تنگستن، آهن، گرافیت، آب، پلی‌اتیلن و یا بتن به همراه ترکیباتی از مواد جاذب نوترون و گاما استفاده شود. در فضا‌های باریک و محدود استفاده از بتن، سرب و سایر حفاظ‌های پرتوی مناسب نیست. چندین حفاظ انعطاف‌پذیر پرتوی توسط پژوهشگران در مراجع [8-15] ارائه شده است. این حفاظ‌ها در میدان‌های آمیخته نوترون-گاما دوام ضعیفی دارند و نمی‌توانند به مدت طولانی استفاده شوند [14].

در این تحقیق، ساخت یک حفاظ مقاوم و انعطاف‌پذیر برای میدان‌های آمیخته نوترون-گاما با ترکیبی از پلی‌اتیلن، تنگستن و کاربید بور مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با در نظر گرفتن پیشینه این تحقیق و تکمیل کارهای قبلی در مرکز پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد [15]. این حفاظ با ضخامت کم می‌تواند جهت حفاظ‌گذاری هم‌زمان پرتوهای گاما و نوترون مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به امکانات موجود در آزمایشگاه هسته‌ای، با استفاده از کد مونت کارلو MCNPX [16] میزان تضعیف شار گامای چشمه ^{137}Cs و نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ عبوری از این حفاظ‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی شد. در بخش تجربی کامپوزیت‌ها طبق نتایج شبیه‌سازی ساخته شد. سپس این کامپوزیت‌ها در آزمایشگاه میزان کارایی‌شان مورد سنجش قرار گرفت. میزان تضعیف شار گامای چشمه ^{137}Cs با فعالیت $100 \mu\text{Ci}$ با استفاده از آشکارساز NaI و میزان تضعیف شار نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ با فعالیت $4/3\text{Ci}$ با استفاده از آشکارساز BF_3 اندازه‌گیری شد.

نتایج شبیه‌سازی در شکل 2 در مورد میزان عبور و تضعیف شار پرتوهای نوترون برای درصدهای مختلف بور برای حفاظ‌هایی با 30 درصد تنگستن نشان می‌دهد با افزایش درصد بور میزان تضعیف نوترون‌ها دارای رفتارهای افزایشی متفاوتی است. میزان تضعیف شار نوترون با افزایش بور تا حدود 10 درصد بسیار زیاد و از 10 درصد به بالا این میزان تضعیف بسیار کند است.



شکل (2): میزان عبور پرتوهای نوترون بر حسب درصد بور برای

ضخامت 1 cm.

2.2. تضعیف پرتوهای گامای ثانویه تولیدشده بر حسب

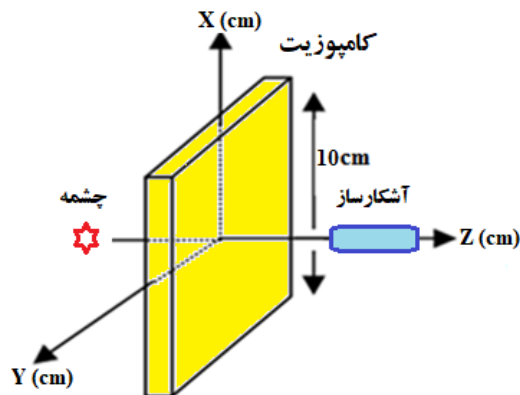
ضخامت

علاوه بر پرتوهای ناشی از چشمه رادیواکتیو، پرتوهای ثانویه ناشی از برهمکنش‌های نوترون با مواد حفاظ نیز می‌تواند مخاطراتی از نظر ایمنی پرتو ایجاد کند. هنگامی که بور در حفاظ استفاده می‌شود واکنش‌های (n, γ) منجر به تولید پرتوهای گامای ثانویه می‌شود. مطابق با بخش قبل نتایج برای هر سه نوع حفاظ در یک نمودار آورده شد، تا میزان تضعیف پرتوهای گامای ثانویه برای سه حفاظ طراحی شده به‌طور کیفی قابل محاسبه باشد. نتایج حاصل از این محاسبات در شکل 3 آمده است.

1.2. محاسبه ضریب تضعیف حفاظ برای پرتوهای گاما

و نوترون

به‌منظور محاسبه ضرایب تضعیف حفاظ‌ها، برای چشمه ^{137}Cs و نوترون‌ها با انرژی 4/5 MeV (متوسط انرژی نوترون‌های چشمه Am-Be) چیدمان هندسی مطابق با شکل 1 در نظر گرفته شد.



شکل (1): چیدمان هندسی مورد استفاده در شبیه‌سازی.

روش شبیه‌سازی به این صورت است که ابتدا حفاظ‌ها با ضخامت‌های مشخص مابین چشمه و آشکارساز مطابق با شکل 1 قرار گرفته، سپس در هر مرحله از شبیه‌سازی یکی از حفاظ‌ها برداشته شده و در نهایت بدون حضور حفاظ شار محاسبه شد. مدت زمان شبیه‌سازی طوری تنظیم شد که خطای محاسبات قابل قبول باشد (کمتر از 1 درصد). نتایج حاصل از این محاسبات برای ضرایب تضعیف حفاظ معمولی بدون بور و تنگستن و حفاظ‌های با 30 درصد تنگستن و 7/5 درصد، 15 درصد و 30 درصد بور برای چشمه گامای ^{137}Cs به‌ترتیب برابر با $0/459\text{cm}^{-1}$ ، $0/452\text{cm}^{-1}$ ، $0/377\text{cm}^{-1}$ و $0/466\text{cm}^{-1}$ به‌دست آمد. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که افزایش بور در حفاظ تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر اندازه ضریب تضعیف برای پرتوهای گاما ندارد.

پرتوهای گاما و نوترون انجام شد تا علاوه بر کاهش شدت پرتوها، هزینه ساخت نیز حداقل شود.

پس از مطالعات شبیه‌سازی و مطالعات انجام شده در مراجع [3-5]، ساخت حفاظ انعطاف‌پذیر به عنوان یک جاذب نوترون و گاما جهت استفاده در فضا‌های باریک و محدود، مورد توجه قرار گرفت. ساخت چنین حفاظی، علاوه بر کاربری هسته‌ای باید از خواص مکانیکی بالایی نیز برخوردار باشد [14].

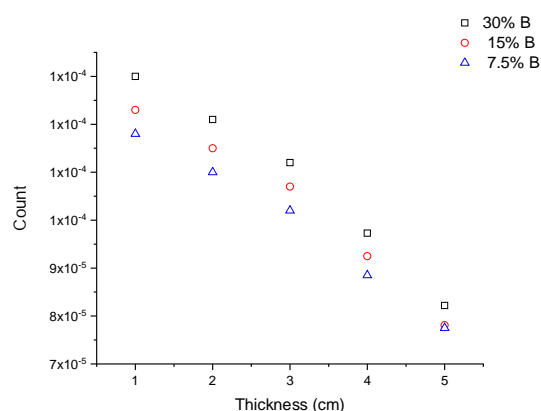
1.3. مراحل ساخت حفاظ‌های کامپوزیتی

با توجه به آنچه در پیشینه تحقیق در مراجع [13-15] آمده است، در این پژوهش ساخت کامپوزیت با افزودن بور به صورت ترکیب B_4C با 7/5، 15 و 30 درصد بور خالص به همراه 30 درصد تنگستن به صورت آزمایشگاهی و در مرکز پلیمر و پتروشیمی ایران انجام شد.

در این تحقیق از پلی‌اتیلن، ساخت شرکت ملی صنایع پتروشیمی ایران و از نوع پلی‌اتیلن گرانولی با چگالی $0/92 \text{ gr/cm}^3$ [17]، پودر تنگستن روسی با درصد خلوص 99% با اندازه‌ی $10 \mu\text{m}$ به عنوان جاذب گاما [18]، پودر B_4C ساخت کشور آلمان، دارای خلوص 99% و با اندازه‌ی $50 \mu\text{m}$ استفاده شد [19].

عناصر اصلی تشکیل دهنده‌ی کامپوزیت عبارتند از: لاستیک، پلی‌اتیلن، کاربید بور و تنگستن. با توجه به ابعاد میکرومتری ذرات تقویت‌کننده، می‌توان حفاظ ترکیبی خاصی تولید کرد که با ضخامت بسیار کمتر نسبت به حفاظ‌های معمولی از قدرت جذب بیشتری در برابر پرتوهای گاما و نوترون برخوردار باشد [10]. دلیل این امر این است که به سطح مقطع بالای برخورد پرتوهای رادیواکتیو با ذرات تقویت‌کننده در ابعاد میکرومتری وابسته است. استفاده از فاز سخت ذرات کاربید بور به همراه پودر فلز تنگستن و ترکیبی از انواع مختلفی

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود در ضخامت‌های کم با افزایش میزان بور از 7/5 تا 30 درصد میزان شمارش پرتوهای گامای تولید شده، به دلیل افزایش میزان واکنش (n, γ) افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ضخامت حفاظ میزان شمارش پرتوهای گاما کاهش می‌یابد. نتیجه کلی حاصل از این شبیه‌سازی نشان می‌دهد افزایش بور اگرچه باعث تضعیف بیشتر شار نوترون می‌شود اما می‌تواند میزان تابش‌های گامای ثانویه را افزایش دهد. بنابراین با افزایش درصد بور باید برای تضعیف شار گامای ثانویه، میزان درصد تنگستن را در حفاظ افزایش داد.



شکل (3): میزان تضعیف پرتوهای گامای چشمه ^{137}Cs برای سه نوع حفاظ طراحی‌شده برحسب ضخامت حفاظ.

3. مطالعات تجربی

در بحث حفاظ‌گذاری همواره باید به این نکته توجه نمود میزان کارایی یک ماده برای حفاظ‌گذاری از طریق میزان تضعیف پرتو به ازای واحد ضخامت تعیین می‌گردد. همچنین با افزایش ضخامت حفاظ، وزن و حجم حفاظی که یک سیستم رادیواکتیو را احاطه می‌کند، افزایش می‌یابد و باعث افزایش دیگر فاکتورهای وابسته به آن مانند هزینه کل (شامل مواد مصرفی و فضای فیزیکی)، خواهد شد. بر همین اساس مطالعات شبیه‌سازی به منظور بهینه‌نمودن نسبت وزنی عناصر مورد نیاز جهت ساخت حفاظ کامپوزیتی جهت تضعیف

غیریکنواختی حفاظ می‌شود. در این پژوهش از کوره معمولی شرکت Carbolite آلمان استفاده شد. پس از خشک‌شدن گرانول، از دستگاه پرس برای قالب زدن استفاده می‌شود. برای تهیه صفحات مناسب از سیستم قالب‌گیری فشاری (مدل mini TEST PRES ساخت شرکت TOYOSEIKI ژاپن) موجود در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران استفاده شد. در دستگاه پرس ابتدا گرانول را تحت حرارت ذوب کرده، سپس تحت فشار 30 MPa نمونه‌ها به شکل صفحاتی با ابعاد بهینه به روش قالب‌گیری فشاری تهیه شد. نمونه‌ای از این حفاظ‌ها در شکل 6 نشان داده شده است.

از لاستیک، پلی‌اتیلن نرم و سخت از ویژگی‌های جدید این پژوهش است که برای اولین بار در داخل کشور مطرح می‌شود. ابتدا مواد خام شامل لاستیک، گریدهای مختلف پلی‌اتیلن، ذرات کاربید بور به‌همراه پودر فلز تنگستن آماده شد. مواد خام در دستگاه اکسترودر در دمای 160-180 درجه سانتی‌گراد و دور 230 rpm ترکیب شد. به‌علت حرارت و اصطکاک، مواد به حالت خمیری مطابق با شکل 4 درآمده، پس از خنک‌کردن مواد اختلاط شده‌ی مذابی به سمت دستگاه خردکننده پلیمر¹ هدایت می‌شود تا خرد و به صورت گرانول مطابق با شکل 5 شود.

جدول (1): چگالی متناظر برای حفاظ‌های کامپوزیتی.

شماره کامپوزیت	درصد تنگستن	درصد بور	چگالی کامپوزیت (gr/cm ³)
1	0	0	1/1
2	30	7/5	1/5
3	30	15	1/6
4	30	30	1/7



شکل (4): نمایی از مواد پس از اختلاط که به‌صورت مذاب در حال خروج از دستگاه اکسترودر.



(6): نمایی از حفاظ انعطاف‌پذیر ساخته شده.



شکل (5): نمایی از گرانول به‌دست آمده از دستگاه خردکننده پلیمر.

2.3. نتایج میکروسکوپ الکترونی

به منظور ارزیابی ساز و کار تغییر شکل و در نهایت شکست در نمونه‌های کامپوزیت از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SERON TECHNOLOGY) استفاده شد.

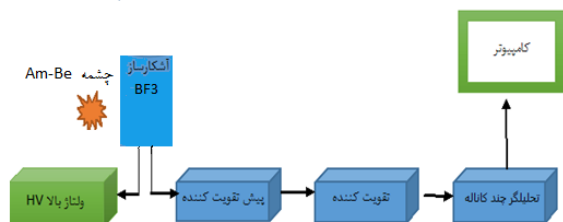
پس از اتمام فرآیند مخلوط‌شدن و خرد شدن، گرانول به‌دست آمده در کوره در دمای 70 درجه سانتی‌گراد قرار داده شد تا گرانول خشک شود. اگر گرانول خشک نشود پس از پرس در سطح حفاظ حباب دیده می‌شود، این عامل سبب ناهماهنگی و

¹ Pellestiser

3.3. آزمایش حفاظ برای پرتوهای نوترون

برای انجام آزمون حفاظ و اندازه‌گیری میزان تضعیف نوترون در حفاظ‌های کامپوزیت از چشمه نوترونی $4/3$ کوری Am-Be استفاده شد.

چشمه مورد استفاده در فاصله تقریبی 15 سانتی‌متری از آشکارساز نوترون‌های حرارتی و بلوکه‌ای از جنس پلی‌اتیلن خالص با ضخامت $7/5$ سانتی‌متر به‌عنوان کندکننده در جلوی چشمه امرسیوم برلیوم قرار گرفت [13]. در انجام این آزمایش حفاظ‌های ساخته شده مابین چشمه و آشکارساز قرار داده و شمارش انجام شد. شماتیک این آزمایش در شکل 9 آمده است.



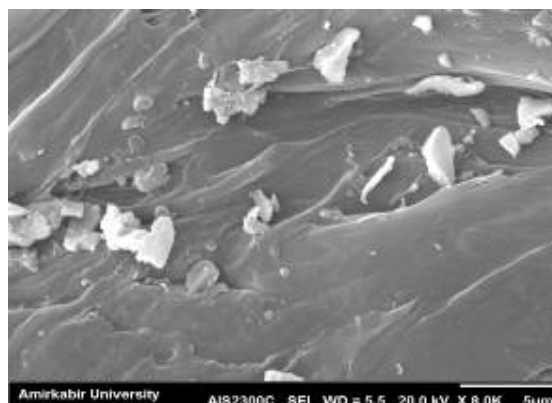
شکل (9): چیدمان آزمایشگاهی جهت اندازه‌گیری تضعیف نوترونی حفاظ‌های ساخته شده.

به‌منظور بررسی و اندازه‌گیری میزان تضعیف نوترون‌ها در حفاظ‌های ساخته‌شده، از آشکارساز BF_3 استفاده شد. در شکل 9 موقعیت آشکارساز BF_3 نسبت به حفاظ‌ها، بلوک‌های پلی‌اتیلن و چشمه نشان داده شده است. اجزاء استفاده شده برای اندازه‌گیری شار نوترون حرارتی عبارتند از: منبع تغذیه ولتاژ بالا، پیش‌تقویت‌کننده مدل 3000، تقویت‌کننده طیف‌نگاری مدل 3600، تحلیل‌گر چندکاناله مدل 4201، ADC مدل 4010 و نرم‌افزار داده برداری DAS از مؤسسه‌ی IAP.

1.3.3. نتایج آزمون تضعیف نوترونی

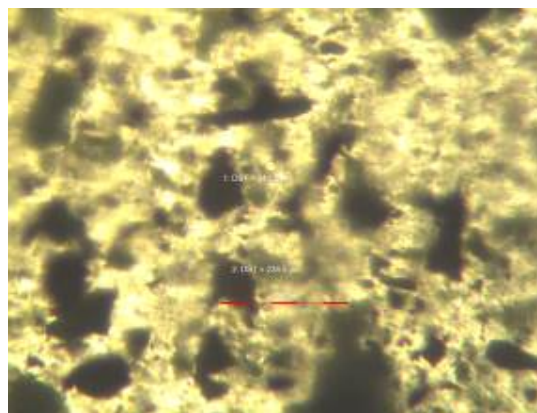
نتایج اندازه‌گیری میزان تضعیف نوترون‌ها در حفاظ‌های ساخته شده با درصد‌های متفاوت از ذرات کاربرد بور با مقدار

شکل (7) سطح مربوط به کامپوزیت $7/5$ درصد کاربرد بور و 30 درصد تنگستن را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به ابعاد میکرومتری پرکننده‌ها و فواصل بین آن‌ها، می‌توان نتیجه گرفت توزیع ذرات پرکننده از لحاظ مقدار و اندازه در زمینه تقریباً یکنواخت است.

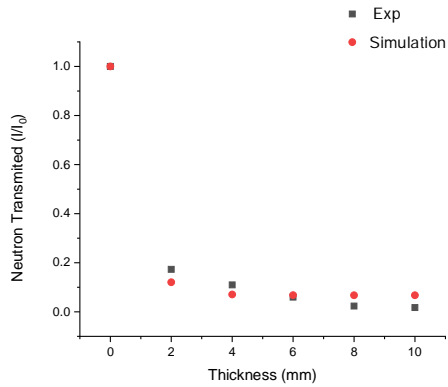


شکل (7): تصویر کامپوزیت $7/5$ کاربرد بور و 30٪ تنگستن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی.

همچنین برای مشاهده کردن میزان پخش ذرات در کامپوزیت ساخته شده با میکروسکوپ نوری (LABOMED) و بزرگ‌نمایی 1000X از نمونه عکس گرفته شد. شکل 8 تصاویر میکروسکوپ نوری میزان توزیع یکنواختی از کربید بور (B_4C) را نشان می‌دهد.



شکل (8): عکس گرفته شده با استفاده از میکروسکوپ نوری تصویر SEM مربوط به کامپوزیت $7/5$ کاربرد بور و 30٪ تنگستن.



شکل (10): مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی، میزان عبور نوترون‌های حاصل از چشمه Am-Be برحسب ضخامت لایه‌های حفاظ کامپوزیتی حاوی 30٪ کاربید بور و 30٪ تنگستن.

4.3. اندازه‌گیری شار عبوری گاما از حفاظ‌های

کامپوزیتی

به منظور بررسی و اندازه‌گیری میزان تضعیف پرتوهای گاما در حفاظ‌های ساخته شده، ابتدا بدون قرار دادن هیچ حفاظ تنگستنی، تابع پاسخ آشکارساز NaI(Tl) به ابعاد 2"×2" و وقتی که در معرض چشمه‌ی ¹³⁷Cs با فعالیت 100 μCi قرار گرفت، اندازه‌گیری شد. مابین آشکارساز و چشمه، هر یک از حفاظ‌های ساخته شده مطابق با شکل 11 قرار گرفته و تابع پاسخ آشکارساز اندازه‌گیری شد. در هر مرحله یک حفاظ به حفاظ‌های موجود در مقابل چشمه و آشکارساز اضافه شد و داده برداری انجام شد.



شکل (11): چیدمان آزمون هسته‌ای برای تعیین میزان تضعیف پرتوهای گامای ¹³⁷Cs.

ثابت تنگستن 30% در جدول 2 آورده شده است. در این جدول مقدار HVL (ضخامت لایه نیم‌جذب ماده جاذب که به ازای آن ضخامت شدت پرتوهای تابشی به نیمی از مقدار اولیه کاهش می‌یابد) و مقدار TVL (آن ضخامتی از ماده است که شدت پرتوهای تابشی به یک‌دهم مقدار اولیه کاهش می‌یابد.) ارایه شده است. همان‌طور که نتایج این جدول نشان می‌دهند، با افزایش ذرات بور، نسبت شار نوترون‌های خروجی به نوترون‌های ورودی (I/I_0) کاهش یافته است. باید توجه داشت این رفتار کاهش خطی نیست. به‌طوری‌که با افزایش 7/5 درصد بور در کامپوزیت ضخامت لایه نیم‌جذب به اندازه 30 درصد کاهش می‌یابد.

جدول (2): نتایج آزمون میزان تضعیف نوترون‌ها در حفاظ‌های ساخته شده با درصدهای متفاوت از ذرات کاربید بور و مقدار ثابت 30% تنگستن.

شماره حفاظ	I/I_0 (%)	HVL(cm)	TVL(cm)
2	25	0/36	1/38
3	18	0/25	0/95
4	12	0/13	0/49

به‌عنوان نمونه، نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی در شکل 10 برای حفاظ کامپوزیتی حاوی 30٪ کاربید بور و 30٪ تنگستن مقایسه شده است. در این شکل همخوانی قابل قبولی مابین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. در این شکل برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی می‌توان دو ناحیه برای تغییرات عبور نوترون‌ها در نظر گرفت. در ناحیه اول میزان تغییرات عبور نوترون‌ها تا نزدیکی ضخامت 4 میلی‌متر بسیار شدید است. در ناحیه دوم از ضخامت 4 میلی‌متر و بیشتر، میزان تغییرات عبور نوترون‌ها کند است. در ضخامت 4 میلی‌متر میزان عبور نوترون‌ها تقریباً 10 درصد است.

4. تست‌های مکانیکی

برخی از آزمایش‌های مکانیکی جهت تعیین ویژگی‌های مکانیکی از قبیل استحکام کششی¹، قدرت افزایش طول در شکست²، قدرت از هم گسیختگی³ و سختی⁴ حفاظ‌های ساخته شده انجام شد. نتایج نشان می‌دهند حفاظ ساخته شده از ویژگی‌های مناسب مکانیکی برخوردار است. نتایج این بررسی‌ها به‌طور خلاصه به شرح ذیل است:

- 1- استحکام کششی و قدرت افزایش طول در شکست با افزایش درصد پرکننده‌ها (کربید بور و تنگستن) به‌خاطر ایجاد نقص در ساختار ماتریس کامپوزیت، کاهش می‌یابد.
- 2- قدرت از هم گسیختگی با افزایش پرکننده‌ها تضعیف می‌شود. زیرا پرکننده‌ها به ساختار پیوسته و یکنواخت ماتریس کامپوزیت آسیب می‌رسانند.
- 3- سختی حفاظ، میزان انعطاف‌پذیری حفاظ را نشان می‌دهد. سختی حفاظ با افزایش پرکننده‌ها افزایش می‌یابد زیرا میزان سختی پرکننده‌ها از میزان سختی ماتریس کامپوزیت، بیشتر است.

نتایج تست‌های مکانیکی حفاظ‌ها به‌طور خلاصه در جدول 3 آورده شده است.

جدول (3): ویژگی‌های مکانیکی حفاظ ساخته شده.

نوع تست مکانیکی	حداکثر مقدار	حداقل مقدار
استحکام کششی (MPa)	1/87	1/30
قدرت افزایش طول (%)	749/55	470/03
قدرت از هم گسیختگی (KN/m)	2/10	3/08
سختی (shoreA)	29/78	68/42

¹ Tensile strength

² Elongation

³ Tear strength

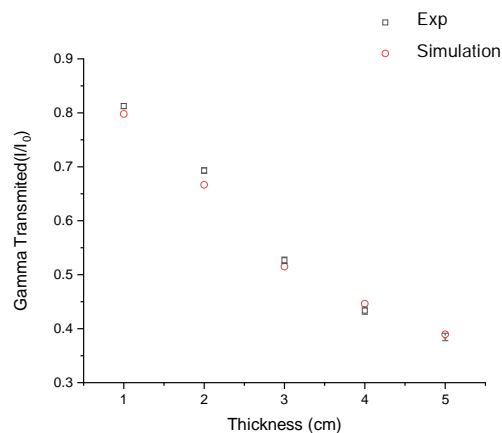
⁴ Hardness

1.4.3 نتایج آزمون تضعیف پرتو گاما

در شکل 12، تغییرات شمارش گامای حاصل از چشمه ^{137}Cs برحسب ضخامت لایه‌های حفاظ کامپوزیتی حاوی 7/5% کاربید بور و 30% تنگستن برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داده شده است.

نتایج تجربی و شبیه‌سازی در این شکل همخوانی خوبی با یکدیگر دارند و حداکثر خطای نسبی میزان عبور برای نتایج تجربی و شبیه‌سازی کمتر از 4 درصد است.

نتایج شکل 12 نشان می‌دهد با افزایش ضخامت‌های حفاظ مقدار شار عبوری پرتوهای گاما کاهش چشمگیری دارد. میزان عبور فوتون‌های گامای چشمه ^{137}Cs در ضخامتی به اندازه 2 سانتی‌متر تقریباً 40 درصد است، این مقدار در مقایسه با حفاظ انعطاف‌پذیر ساخته شده توسط گونگ و همکاران [14]، بهبودی خوبی در جذب فوتون‌های گاما را نشان می‌دهند. میزان شمارش‌ها طوری تنظیم شد که حداکثر خطا برای مقادیر تجربی و شبیه‌سازی کمتر از یک درصد به‌دست آید.



شکل (12): مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی، میزان عبور گامای حاصل از چشمه ^{137}Cs برحسب ضخامت لایه‌های حفاظ کامپوزیتی حاوی 7/5% کاربید بور و 30% تنگستن.

5. نتیجه‌گیری

پرتوهای گاما دارد و ذرات کاربرد بور تأثیری در کاهش شار پرتوهای گاما ندارند. بررسی‌ها نشان داد که تنگستن می‌تواند گامای ثانویه تولید شده ناشی از برهمکنش مواد حفاظ با نوترون را به‌خوبی جذب کند. این امر علاوه بر افزایش ضریب ایمنی در حفاظ‌گذاری ضخامت، قیمت حفاظ را تا حد بسیار زیادی کاهش می‌دهد. نتایج آزمون‌های تجربی حفاظ‌های کامپوزیتی انعطاف‌پذیر توانمندی و کارایی بالایی برای حفاظ در میدان تایشی آمیخته نوترون-گاما نشان می‌دهد. ضمن اینکه این حفاظ برخلاف حفاظ‌های قبلی انعطاف‌پذیر است. انعطاف‌پذیری حفاظ باعث می‌شود، حفاظ‌سازی محیط‌های پرتوی عملیاتی‌تر و از نظر اقتصادی ارزان‌تر انجام پذیرد. این نوع حفاظ می‌تواند در خودروهای امدادی و زرهی مورد استفاده در سوانح هسته‌ای کاربرد بسیار مؤثری از خود نشان دهد.

با در نظر گرفتن پژوهش‌های قبل، در این کار تحقیقاتی، ساخت یک حفاظ انعطاف‌پذیر برای میدان‌های آمیخته نوترون و گاما با استفاده از پودر تنگستن با ابعاد کمتر از $10\mu\text{m}$ و درصد خلوص 99/99 به‌صورت ثابت به‌عنوان جاذب پرتو گاما و پودر کاربرد بور (B_4C) با ابعاد کمتر از $50\mu\text{m}$ به‌عنوان جاذب نوترون حرارتی با درصدهای 7/5، 15 و 30 در نظر گرفته شد. پودر تنگستن و پودر کاربرد بور در ماتریس‌های پایه پلیمری (شامل لاستیک NR-CR همرا با گریدهای مختلف پلی‌اتیلن به همراه سایر افزودنی‌ها) تزریق شد. قبل از ساخت، مطالعات شبیه‌سازی انجام شده برای کامپوزیت انعطاف‌پذیر مورد نظر نشان داد که با افزایش کاربرد بور در ماتریس پایه پلیمری تأثیر چندانی در تضعیف نوترون‌های حرارتی ندارد. بررسی‌ها نشان دادند که درصد بهینه برای ذرات کاربرد بور در حفاظ، حدود 10 درصد می‌باشد. همچنین نتایج نشان دادند مقدار تنگستن موجود در حفاظ نقش اساسی در کاهش شار

6. مراجع

- [1] V.P. Singh and N.M. Badiger. Gamma ray and neutron shielding properties of some alloy materials. *Ann. Nucl. Energy*. 64 (2014) 301–310.
- [2] J.W.N. Frohlich and H.D. Luginsland. The effect of filler–filler and filler–elastomer interaction on rubber reinforcement. *Compos. A* 36 (2005) 449–460.
- [3] S. Nambiar, J.T. Yeow. Polymer-composite materials for radiation protection. *ACS applied materials & interfaces* 4.11 (2012) 5717–5726.
- [4] B.B. Boonstra. Role of particulate fillers in elastomer reinforcement: a review. *Polymer* 20 (1979) 691–704.
- [5] G.M.K. Heinrich and T.A. Vilgis. Reinforcement of elastomers, current opinion in solid state. *Mater. Sci.* 6 (2002) 195–203.
- [6] A. Alipour, G. Naderi, G.R. Bakhshandeh, H. Valicm and S. Shokoohi. Elastomer nanocomposites based on NR/EPDM/organoclay: morphology and properties. *Int. Polym. Proc.* 26 (2011) 48–55.
- [7] دژانگه، مریم. قجاوند، مجید. قلی‌پور پیوندی، رضا. ساخت، مشخصه‌یابی و شبیه‌سازی خواص حفاظت در برابر پرتوی گامای نانوکامپوزیت. *مجله‌سنجش و ایمنی پرتو*، دوره 4، (1395) 37–45.
- [8] S.E. Gwaily, H.H. Hassan, M.M. Badawy and M. Madani. Study of electrophysical characteristics of lead–natural rubber composites as radiation shields. *Polym. Compos.* 23 (2002) 1068–1075.
- [9] S.E. Gwaily, M.M. Badawy, H.H. Hassan and M. Madani. Natural rubber composites as thermal neutron radiation shields: I. B_4C/NR composites. *Polym. Test.* 21 (2002) 129–133.

- [10] S.D. Kaloshkin, V.V. Tcherdyntsev, M.V. Gorshenkov, V.N. Gulbin and S.A. Kuznetsov. Radiation-protective polymer-matrix nanostructured composites. *J. Alloy. Compd.* 536 (2012) S522-S526.
- [11] M.M. Abdel-Aziz, S.E. Gwaily, A.S. Makarios and A. El-Sayed Abdo. Ethylene-propylene diene rubber/low density polyethylene/boron carbide composites as neutron shields. *Polym. Degrad. Stab.* 50 (1995) 235-240.
- [12] T. Korkut, A. Karabulut, G. Budak, B. Aygün, O. Gencil and A. Hancerliogullari. Investigation of neutron shielding properties depending on number of boron atoms for colemanite, ulexite and tincal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations. *Appl. Radiat. Isot.* 70 (2012) 341-345.
- [13] V.P. Singh, N.M. Badiger and J. Kaewkhao. Radiation shielding competence of silicate and borate heavy metal oxide glasses: comparative study. *J. Non-Cryst. Solids.* 404 (2014) 167-173.
- [14] P. Gong, M. Ni, H. Chai and F. Chen, X. Ta. Preparation and characteristics of a flexible neutron and γ -ray shielding and radiation-resistant material reinforced by benzophenone. *Nuclear Engineering and Technology.* 50 (2018) 470-477.
- [15] M. Salimi, N. Ghal-Eh1 and E. Asadi Amirabadi. Characterization of a new shielding rubber for use in neutron- gamma mixed fields. *Nucl. Sci. Tech.* 36 (2018) 1-8.
- [16] J.S. Hendricks, G.W. McKinney, M.L. Fensin, M.R. James, R.C. Johns, J.W. Durkee. MCNPX 2.6.0 Extensions. New Mexico, US: Los Alamos National Laboratory, LA-UR-08-2216 (2008).
- [17] Iran Polymer and Petrochemical Institute (IPPI), Rubber Processing and Engineering Department.
- [18] Sigma-Aldrich Co., Tungsten.
- [19] Sigma-Aldrich Co., Boron carbide.
- [20] M.K. Lee, J.K. Lee, J.W. Kim and G.J. Lee. Properties of B_4C -PbO-Al(OH)₃-epoxy nanocomposite prepared by ultrasonic dispersion approach for high temperature neutron shields. *J. Nucl. Mater.* 445 (2014) 63-71.
- [21] S.Y. Fu, X.Q. Feng, B. Lauke and Y.W. Mai. Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate-polymer composites. *Composites Part B.* 39 (2008) 933-961.