

بررسی اثربخشی حفاظتی کامپوزیت پلی وینیل الکل-کاربید بور برای چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$

شهریار ملکی^{*}، ناهید حاجیلو^۱ و فاطمه دولتشاه^۱

^۱ پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، البرز، ایران.

^{*} البرز، کرج، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، کد پستی: ۳۱۴۸۶۴۳۱۱۱.

پست الکترونیکی: smaleki@aeoi.org.ir

چکیده

کامپوزیت‌های پلیمری به‌خاطر سبکی، سهولت در فراوری، دارا بودن اتم‌های هیدروژن فراوان و در نتیجه پراکندگی الاستیک با ذرات نوترون، گزینه ایده‌آلی به‌منظور کندسازی و حفاظت‌سازی نوترونی قلمداد می‌شوند. در این کار تجربی کامپوزیت پلی وینیل الکل-کاربید بور (PVA-B₄C) حاوی ۵ درصد وزنی از ذرات پُرکننده کاربید بور به کمک روش محلولی در ضخامت ۱٫۰۶۱ mm ساخته شد. سایز ذرات B₄C استفاده شده در این کامپوزیت بین ۵۰-۲۰ μm قرار داشت. سپس، کامپوزیت مذکور تحت پرتودهی چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با متوسط انرژی ۵ MeV و اکتیویته ۵ Ci قرار گرفت. به‌منظور اندازه‌گیری آهنگ دز نوترون‌ها در فاصله ۱۰۰ cm از چشمه، از آشکارساز کروی ^3He بهره‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری نشان داد که مقدار سطح مقطع ماکروسکوپی کلی کامپوزیت مذکور برابر $۰/۲۰۸\text{ cm}^{-۱}$ بوده که با مقدار شبیه‌سازی از کد MCNP، ۱/۸٪ اختلاف دارد؛ بنابراین استفاده از این کامپوزیت به‌منظور جایگزینی حفاظ‌های متداول نوترونی بایستی از طریق تحقیقات بیشتر بررسی گردد.

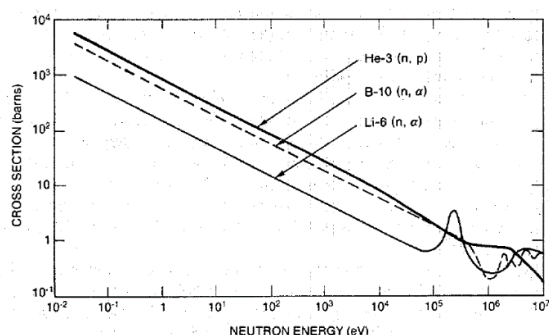
کلیدواژگان: کامپوزیت PVA-B₄C، حفاظ‌سازی، نوترون، امرسیوم-برلیوم، سطح مقطع ماکروسکوپی کلی.

۱. مقدمه

PVA-B₄C است. شایان ذکر است که PVA یک پلیمر زیست سازگار و محلول در آب است. پلیمرها از نظر تبلور یا بلورینگی^۱ عموماً به سه دسته بلوری، نیمه-بلوری و آمورف تقسیم بندی می‌شوند (شکل ۱-الف). تحقیقات نشان می‌دهد که PVA یک پلیمر نیمه-بلوری است [۹]. ساختار شیمیایی پلیمر PVA نشان می‌دهد که PVA دارای شاخه‌های کوچک هیدروکسیلی (OH) است (شکل ۱-ب).

کامپوزیت‌های پلیمری به‌خاطر سبکی، انعطاف‌پذیری، فراوری آسان و قیمت ارزان دارای مزایا و کاربردهای بسیاری در علوم هسته‌ای هستند؛ به‌طور نمونه می‌توان از قابلیت به‌کارگیری این مواد در حفاظ‌سازی [۶-۱]، آشکارسازی و دزیمتری [۸،۷] پرتوهای یون‌ساز نام برد. کامپوزیت‌های پلیمری از جمله مواد به‌کار رفته جهت حفاظ‌سازی پرتوهای نوترون به‌شمار می‌روند. یکی از کامپوزیت‌های پلیمری که قابلیت به‌کارگیری به‌عنوان حفاظ نوترون را داراست، ماده پلی وینیل الکل-کاربید بور یا

¹ Crystallinity



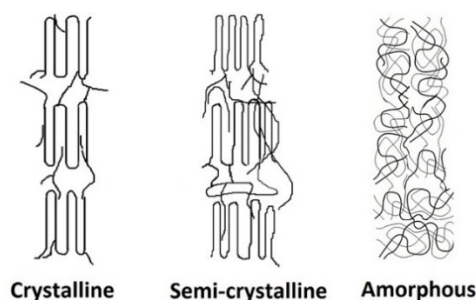
شکل (۲). نمایی از مقایسه سطح مقطع جذب نوترون برای ${}^3\text{He}$ ،

${}^6\text{Li}$ و ${}^{10}\text{B}$ [۲۰].

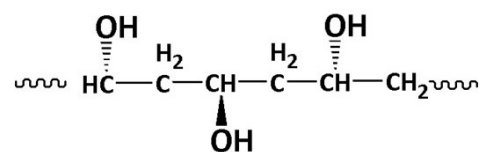
یون‌های پر انرژی Li و He (آلفا) دارای تکانه مساوی و در خلاف جهت یکدیگرند و از طریق اندرکنش با ماده، انرژی خود را از دست می‌دهند. پرتودهی کامپوزیت‌های پلیمری حاوی ذرات بور با نوترون، از طریق گیراندازی نوترون‌های حرارتی توسط ${}^{10}\text{B}$ از طریق برخوردهای غیرالاستیک با مواد سبک منجر به کند سازی نوترون‌ها می‌شوند که این طریق می‌توان به مقدار ضریب تضعیف مؤثر یا سطح مقطع کلی ماکروسکوپی ماده کامپوزیتی مذکور برای پرتوهای نوترون پی برد [۲۲، ۲۱].

در سطح جهانی، چندین پژوهش انجام شده که در آن‌ها از B_4C در پلیمرهای مختلف به عنوان حفاظ نوترونی استفاده شده است [۲۴، ۲۳]؛ به‌طور نمونه در پژوهشی که در سال ۲۰۲۰ انجام شده، عملکرد شیلد نوترونی برای ماده کامپوزیت $\text{PEEK}^1/\text{B}_4\text{C}$ در غلظت‌های ۵-۱۵ درصد وزنی بررسی شده است [۲۴].

در پژوهشی دیگر، نانوکامپوزیت‌های $\text{PVA}/\text{PEO}/\text{PVP}$ حاوی نانوذرات B_4C و BN (نیتريد بور) با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد تهیه و مشخصه‌یابی شدند [۲۳]. نتایج حاکی از کارایی حفاظتی بالاتر نمونه‌های حاوی B_4C در برابر نوترون‌های حرارتی نسبت به نمونه‌های حاوی BN بود.



(الف)



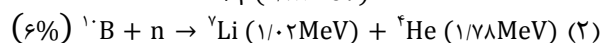
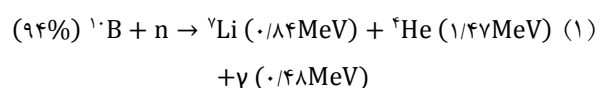
Polyvinyl alcohol (PVA)

(ب)

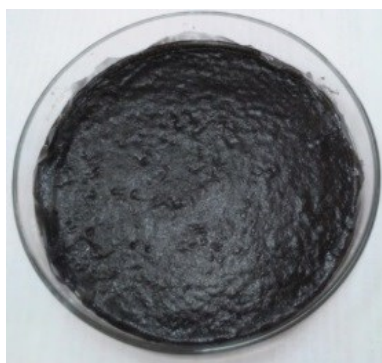
شکل (۱). (الف) طرح‌واره پلیمرهای بلوری، نیمه‌بلوری و آمورف،

(ب) ساختار شیمیایی پلیمر PVA [۱۰].

در زمینه حفاظ‌سازی نوترون با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری چندین کار پژوهشی صورت گرفته است [۱۸-۱۱]. کامپوزیت‌های حاوی بور کاربردهای فراوانی در حفاظ‌سازی نوترون دارا هستند. بور طبیعی دارای دو ایزوتوپ پایدار ${}^{10}\text{B}$ (۸۰/۱٪) و ${}^{11}\text{B}$ (۱۹/۹٪) است. ایزوتوپ ${}^{10}\text{B}$ به علت بالا بودن سطح مقطع جذب نوترونی بسیار بالا، به‌منظور گیراندازی نوترون‌های حرارتی به‌کار می‌رود. نمایی از سطح مقطع ایزوتوپ‌های ${}^{10}\text{B}$ ، ${}^6\text{Li}$ و ${}^3\text{He}$ به تصویر کشیده شده است (شکل ۲). واکنش گیراندازی نوترون با ${}^{10}\text{B}$ به صورت زیر است [۱۹]:



¹ Polyether ether ketone



شکل (۳). نمایی از کامپوزیت (۵ wt %) PVA-B₄C ساخته شده

برای تضعیف نوترون‌ها.

در این کار تجربی به منظور پرتودهی کامپوزیت PVA-(۵ wt%) B₄C، از چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ واقع در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای استفاده شد (شکل ۴). متوسط انرژی نوترون‌های خروجی در آن برابر ۵ MeV و اکتیویته چشمه ۵ Ci است و همچنین به منظور اندازه‌گیری آهنگ دز نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ در فاصله ۱۰۰ cm چشمه، از آشکارساز ^3He مدل ۱۲۳ BERTHOLD UMo بهره‌گیری شده (شکل ۵)، که در تنظیم فواصل از باریکه لیزر استفاده شد. شایان ذکر است که این آشکارساز از یک کره کندکننده نوترون از جنس پلی اتیلن و به قطر ۲۵ cm تشکیل شده که قابلیت اندازه‌گیری آهنگ دز نوترون‌ها در محدوده انرژی نوترون‌های حرارتی تا انرژی‌های ۲۰ MeV را داراست و حتی در میدان‌های ضعیف نوترونی، از حساسیت‌پذیری بالایی برخوردار است. به منظور بررسی تکرارپذیری نتایج، آهنگ دز اندازه‌گیری شده در هر حالت (در غیاب و حضور ماده کامپوزیتی) چهار بار تکرار شد. با توجه به این‌که نمونه کامپوزیت درون پتری دیش آزمایشگاهی ساخته شد و به همان صورت هم در معرض پرتوهای نوترون قرار گرفت، به منظور اندازه‌گیری شدت تابش اولیه در غیاب ماده کامپوزیتی (I_0)، یک پتری دیش از همان نوع و اندازه به ضخامت ۱/۶۱۹ mm جلوی نوترون قرار داده شد. سپس ضخامت کل کامپوزیت به علاوه پتری دیش به مقدار ۲/۶۸۰ mm اندازه‌گیری شد. خاطر نشان می‌گردد که ضخامت‌های یاد شده پس از سه

با توجه به پژوهش‌های پیشین، غلظت ۵ wt% از B₄C به عنوان حداقل غلظت مؤثر برای حفاظت‌سازی نوترون در کامپوزیت‌های پلیمری و ایجاد تعادل میان خواص حفاظتی و پراکندگی یکنواخت ذرات پُرکننده در ماتریس پلیمری شناخته می‌شود [۲۴، ۲۳]. بنابراین نوآوری پژوهش حاضر در ساخت و ارزیابی تجربی-شبیه‌سازی کامپوزیت سبک PVA-B₄C حاوی ۵ درصد وزنی کاربید بور (سایز ذرات ۲۰-۵ μm) برای چشمه نوترونی $^{241}\text{Am-Be}$ با انرژی متوسط ۵ MeV است. هدف اصلی این پژوهش، تعیین سطح مقطع ماکروسکوپیکی کلی (Σ_t) این کامپوزیت و مقایسه آن با نتایج کد MCNP به منظور امکان‌سنجی جایگزینی نسبی حفاظ‌های متداول سنگین‌تر است.

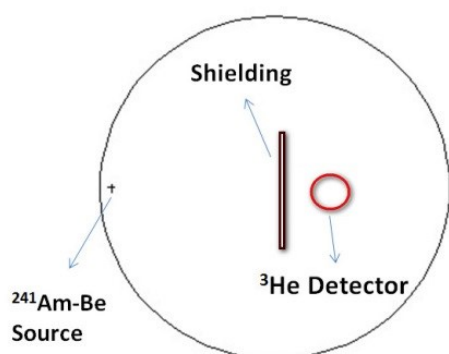
۲. مواد و روش‌ها

۱.۲ ساخت ماده کامپوزیت

به منظور ساخت کامپوزیت PVA-B₄C (۵ wt%)، پلی‌وینیل الکل (PVA) به صورت گرانول از شرکت پتروشیمی تولید داخل و پودر کربید بور (B₄C) با خلوص ۹۹٪ و سایز ذرات ۲۰-۵۰ μm از شرکت ژاپنی Kojundo Chemical Laboratory تهیه شد. آب مقطر به عنوان حلال PVA تهیه شد. در ابتدا پلیمر PVA در آب مقطر به کمک همزن مغناطیسی در دمای ۸۰ °C حل شده، هم‌زمان در ظرف دیگری پودر B₄C توسط حمام اولتراسونیک به مدت یک ساعت در فرکانس ۴۰ kHz درون آب مقطر فراصوت دهی شد، تا این‌که پودر مذکور کاملاً در آب پخش گردید. در نهایت این دو ظرف با یکدیگر مخلوط شده، درون پتری دیش ریخته شدند، سپس در آن ۹۰ °C به مدت یک شبانه‌روز قرار گرفته تا حلال کاملاً خارج گردید. در نهایت کامپوزیت با ضخامت ۱/۰۶۱ mm تشکیل شد (شکل ۳) که در اندازه‌گیری ضخامت از میکرومتر دیجیتالی مدل IP۵۴ QLR بهره‌گیری شد.

۲.۲. شبیه سازی با کد MCNP

در این کار تجربی، به منظور برآورد دقیق مقدار ضریب تضعیف مؤثر یا سطح مقطع ماکروسکوپی کلی کامپوزیت (۵ wt.%) PVA-B_۴C تحت پرتوهای نوترونیهای چشمه ^{۲۴۱}Am-Be، شبیه سازی تحت شرایط اندازه گیری تجربی نیز با استفاده از کد MCNP۴C صورت گرفت (شکل ۶). ابتدا در غیاب ماده کامپوزیتی، شدت پرتوهای نوترونی ناشی از چشمه ^{۲۴۱}Am-Be در طیف انرژی مربوطه از نوترون های حرارتی تا نوترون هایی با انرژی ۱۱ MeV و با انرژی متوسط ۵ MeV با استفاده از تالی F۴ در آشکارساز محاسبه شد؛ سپس ماده کامپوزیتی مذکور در کد تعریف شد و شدت پرتوهای نوترونی در حضور ماده تحت شرایط میدانی واقعی محاسبه شد. در پایان ضریب تضعیف مؤثر یا سطح مقطع ماکروسکوپی کلی (Σ_t) کامپوزیت با ضخامت ۱/۰۶۱ mm محاسبه گردید. در شبیه سازی مذکور، اثرات پراکندگی نوترون ها با دیواره های اطراف در نظر گرفته نشد. در ادامه، به منظور اطمینان از صحت کد MCNP، خروجی برنامه برای ماده UO_۲ با چگالی ۱۰ g/cm^۳ تحت پرتوهای نوترون های ۱ MeV قرار گرفت و مقدار Σ_t شبیه سازی شده با مقدار واقعی آن یعنی $\Sigma_t = ۰/۵۲۵ \text{ cm}^{-1}$ ، تنها ۰/۸٪ اختلاف داشت که نشان داد که این کد قابل اطمینان است.



شکل (۶). نمایی از هندسه مسئله در این پژوهش به کمک کد MCNP.

بار اندازه گیری و میانگین گیری از آن ها گزارش گردیده اند؛ بنابراین به منظور اندازه گیری ضخامت خالص ماده کامپوزیتی مذکور، پس از تفریق دو ضخامت فوق مقدار ۱/۰۶۱ mm گزارش گردید. چگالی یک کامپوزیت از رابطه زیر به دست می آید [۲۵]:

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{w_f}{\rho_f} + \frac{w_m}{\rho_m} \quad (۳)$$

که ρ_c ، ρ_f و ρ_m به ترتیب چگالی کامپوزیت، ماده پُرکننده (فیلر) و ماده زمینه (ماتریس) بوده، w_f و w_m کسرهای وزنی ماده پُرکننده و زمینه است. برای کامپوزیت PVA-B_۴C (۵ wt.%)، با توجه به مقدار چگالی PVA و B_۴C به ترتیب برابر ۲/۵۲ g/cm^۳ و ۱/۲۶ g/cm^۳ [۲۶، ۲۷]، مقدار چگالی کامپوزیت برابر ۱/۲۹ g/cm^۳ محاسبه می گردد.



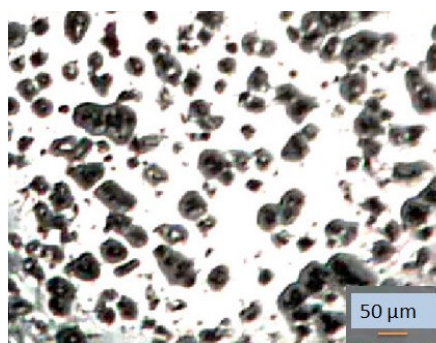
شکل (۴). سیستم پرتو دهی نوترون ^{۲۴۱}Am-Be موجود در آزمایشگاه SSDL کرج.



شکل (۵). آشکارساز ^۳He به منظور اندازه گیری آهنگ دز نوترون های چشمه ^{۲۴۱}Am-Be.

۳. نتایج و بحث

تصویر میکروسکوپی کامپوزیت PVA-B₄C (۵ wt/.) در بزرگ‌نمایی ۵۰ μm توسط میکروسکوپ دیجیتالی Dino-Lite ارائه شده (شکل ۷) که به پخش همگن کریستال‌های B₄C در بستر پلی‌وینیل الکل دلالت دارد. البته از شکل پیداست که مقداری تجمع ذرات به صورت کلوخه‌ای^۱ در بستر پلیمر وجود دارد که می‌تواند به دلیل زمان ناکافی برای فراصوت دهی نمونه مذکور توسط حمام اولتراسونیک در فرکانس مربوطه باشد.



شکل (۷). تصویر نوری کامپوزیت در بزرگ‌نمایی ۵۰ μm با استفاده از میکروسکوپ دیجیتالی.

در صورتی که ماده‌ای با ضخامت x تحت پرتوهای نوترون‌های با شدت اولیه I_0 قرار بگیرد، شدت نهایی نوترون عبوری از ماده یعنی I برابر است با [۲۸]:

$$I = I_0 e^{-N\sigma_t x} = I_0 e^{-\Sigma_t x} \quad (۴)$$

که N چگالی اتمی ماده و σ_t سطح مقطع میکروسکوپی کلی است که خود تابعی از سطح مقطع‌های پراکندگی و جذب نوترون در ماده بوده و Σ_t سطح مقطع ماکروسکوپی کلی ماده بر حسب cm^{-1} عبارت است از:

$$\Sigma_t = N\sigma_t \quad (۵)$$

در جدول ۱، نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی ضریب تضعیف مؤثر یا سطح مقطع کلی ماکروسکوپی (Σ_t) کامپوزیت برای پرتوهای نوترون چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ گزارش شده که در محاسبه

ضریب تضعیف مؤثر یا Σ_t برای ضخامت x ماده کامپوزیتی مذکور از رابطه زیر استفاده شده است:

$$\Sigma_t = \frac{\ln(I_0/I)}{x} \quad (۶)$$

که I_0 و I به ترتیب آهنگ دز اندازه‌گیری شده در غیاب و حضور کامپوزیت است. همان‌طور که از جدول ۱ دیده می‌شود، نتایج اندازه‌گیری نشان داد که مقدار Σ_t برای کامپوزیت PVA-B₄C برابر 0.208 cm^{-1} بوده که با مقدار شبیه‌سازی MCNP تنها $1/8$ درصد اختلاف دارد. این اختلاف می‌تواند به علت اندرکنش‌های جذب و پراکندگی نوترون‌ها با قالب شیشه‌ای و مواد اطراف چشمه باشد.

جدول (۱). مقدار Σ_t اندازه‌گیری شده برای کامپوزیت و مقایسه با

شبیه‌سازی MCNP برای چشمه $^{241}\text{Am-Be}$.

Thickness (cm)	I_0 (μSv/h)	I (μSv/h)	Σ_t (cm ⁻¹)	
				Experiment MCNP
0.1061 ± 0.0001	114.4 ± 1.2	111.9 ± 0.5	0.208 ± 0.003	0.212

مقدار عدم قطعیت کلی در اندازه‌گیری برابر $1/4$ بوده (۱۵) و بازه اطمینان ($k=1$)، که با توجه به کاهش $2/2$ % شدت پرتوهای نوترون چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ برای نمونه کامپوزیت مذکور به ضخامت 1.061 mm ، ضرورت اندازه‌گیری‌های مذکور برای لایه‌های ضخیم‌تر از مرتبه HVL تا TVL را در تحقیقات آتی مسجل می‌سازد. شایان ذکر است که در محاسبه عدم قطعیت نسبی سطح مقطع ماکروسکوپی کل (Σ_t) از رابطه زیر استفاده شد [۲۹]:

$$\frac{\Delta \Sigma_t}{\Sigma_t} = \frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta x}{x} \quad (۷)$$

که در آن ΔI_0 و ΔI به ترتیب عدم قطعیت‌های مربوط به آهنگ دز معادل بر حسب ($\mu\text{Sv/h}$) در غیاب و در حضور حفاظ نوترونی و همچنین Δx عدم قطعیت مربوط به دقت دستگاه ریزسنج (میکرومتر) در اندازه‌گیری ضخامت حفاظ نوترونی است.

¹ Agglomeration

بر این اساس، مقدار HVL با توجه به مقدار سطح مقطع ماکروسکوپیکی کلی در جدول ۱ برابر ۳/۳ cm و مقدار TVL برابر ۱۱/۱ cm برآورد می‌شود. در محاسبات HVL و TVL کلی از روابط زیر استفاده شده است [۳۰]:

$$HVL(cm) = \frac{\ln(2)}{\Sigma_t} \quad (8)$$

$$TVL(cm) = \frac{\ln(10)}{\Sigma_t} \quad (9)$$

در این جا نتایج پژوهش حاضر با سایر پژوهش‌های مشترک مقایسه می‌گردد. در سال ۲۰۱۶، عادل و همکاران با کامپوزیت B_۴C/epoxy به ضخامت ۲ cm و غلظت ۵ wt %، مقدار سطح مقطع ماکروسکوپیکی کلی را در حدود ۰/۱۷ cm^{-۱} گزارش نمودند که از نظر مرتبه بزرگی با نتایج پژوهش حاضر (۰/۲۰۸ cm^{-۱}) قابل مقایسه است [۱۱].

در تحقیقی دیگر، سلطانی و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که کامپوزیت HDPE/B_۴C با ۵ % وزنی ذرات میکرونی، مقدار سطح مقطع ماکروسکوپیکی حدود ۰/۱۹ cm^{-۱} داشته که با نتایج پژوهش حاضر قابل مقایسه بوده و همچنین نشان دادند که کاهش سایز ذرات پُرکننده از میکرو به نانو، منجر به افزایش سطح مقطع جذب می‌شود [۱۳].

در سال ۲۰۱۷، اوزدمیر^۱ و همکاران با کامپوزیت EPDM حاوی B_۲O_۳ به ضخامت ۱ cm، میزان تضعیف نوترون‌های حرارتی را در حدود ۲۵ % گزارش نمودند [۱۴]. همچنین و^۲ و همکاران (۲۰۲۰) با کامپوزیت PEEK/B_۴C و درصدهای وزنی ۵-۱۵، عملکرد حفاظتی مناسب برای نوترون‌های حرارتی نشان دادند و مقدار HVL را در حدود ۲/۸-۳/۵ cm گزارش نمودند که با HVL محاسبه شده در این پژوهش (۳/۳ cm) مطابقت خوبی نشان می‌دهد [۲۳].

همچنین پارک^۳ و همکاران (۲۰۲۲) با کامپوزیت Polyethylene/B_۴C نشان دادند که افزایش درصد وزنی B_۴C از ۵ wt % به ۱۰ wt % منجر به افزایش ۱۵ % در تضعیف نوترون می‌شود [۱۷].

در نهایت، لی^۴ و همکاران (۲۰۲۴) با کامپوزیت B_۴C/PEEK نشان دادند که افزایش غلظت B_۴C از ۵ wt % به ۱۵ wt %، ضریب تضعیف را حدود ۳۰ % افزایش می‌دهد [۱۸]. به‌طور کلی، عوامل متعددی بر اثربخشی حفاظتی کامپوزیت مذکور در این پژوهش مؤثر هستند. از جمله، سایز ذرات پُرکننده، ضخامت کامپوزیت و درصد وزنی ذرات پُرکننده B_۴C. اینکه ذرات در ابعاد نانو باشند یا میکرو، می‌تواند در میزان تضعیف پرتوها تأثیرگذار باشد. همچنین در خصوص اهمیت غلظت B_۴C، مطالعات نشان می‌دهند که افزایش غلظت یا درصد وزنی B_۴C در ماتریس پلیمری می‌تواند سطح مقطع جذب را به طور قابل توجهی افزایش دهد [۳۲، ۳۱، ۱۳]؛ اما غلظت بهینه بایستی به‌گونه‌ای تعیین شود که ضمن کاهش ضخامت شیلد نهایی، از پدیده کلوخگی یا تجمع ذرات افزودنی به ماتریس پلیمری جلوگیری شود.

مطالعه حاضر از حیث کار تجربی دارای محدودیت‌هایی است؛ از جمله محدود به یک غلظت (۵ wt %) و یک ضخامت (۱/۰۶۱ mm) بوده و برای تعیین غلظت بهینه نیاز به بررسی سیستماتیک غلظت‌های بالاتر در محدوده ۱۰-۲۰ wt % و ضخامت‌های بزرگ‌تر است؛ بنابراین توصیه می‌شود که در پژوهش‌های آتی، محدودیت‌های مورد اشاره در نظر گرفته شده و تا حد امکان رفع شوند. اگر چه با ضخامت موجود (یعنی ۱/۰۶۱ mm) امکان ساخت حفاظ مناسب نوترون‌های حرارتی چشمه امرسیوم-برلیوم مهیا نیست، اما کار پژوهشی حاضر، با هدف تعیین سطح مقطع ماکروسکوپیکی کلی و به دنبال آن

^۳ Park^۴ Li^۱ Özdemir^۲ Wu

$^{241}\text{Am-Be}$ با انرژی متوسط ۵ MeV و اکتیویته ۵ Ci جهت پرتودهی ماده کامپوزیتی مذکور به صورت تجربی و شبیه‌سازی مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج اندازه‌گیری نشان داد که مقدار سطح مقطع کلی ماکروسکوپی کامپوزیت مذکور برابر 0.208 cm^{-1} بوده که با مقدار شبیه‌سازی از کد MCNP دارای اختلاف ۱/۸٪ است؛ بنابراین با توجه به وجود محدودیت‌های تجربی در این پژوهش، به ویژه تعداد نمونه‌ها، درصد وزنی و ضخامت (در این پژوهش فقط یک نمونه با درصد وزنی ۵٪ و ضخامت ۱/۰۶۱ mm بررسی شده است)، با انجام تحقیقات بیشتر، این امید وجود دارد که کامپوزیت مذکور با توجه به سبک بودن بتواند به عنوان حفاظ مناسبی برای نوترون‌های چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ به کارگیری شود.

۴. تشکر و قدردانی

از آقای دکتر سید مهدی هاشمی به‌خاطر همکاری در انجام اندازه‌گیری‌ها و همچنین آقای دکتر روح اله عادل به‌خاطر تهیه پودر B_۴C قدردانی می‌شود.

محاسبه HVL مناسب از ماده حفاظ انجام شده که در پژوهش‌های آتی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

ذکر این نکته خالی از لطف نیست که در طراحی حفاظ برای چشمه‌های نوترونی، بایستی به موضوع حفاظ‌گذاری پرتوهای گاما نیز توجه کافی داشت که در اثر جذب و گیراندازی نوترون‌های حرارتی به وجود می‌آیند. در این پژوهش، فقط به بررسی امکان جذب نوترون‌های حرارتی چشمه $^{241}\text{Am-Be}$ با استفاده از کامپوزیت پلی‌وینیل الکل-کاربید بور در یک درصد وزنی ثابت پرداخته شده است؛ بنابراین به منظور ساخت حفاظ مناسب برای این چشمه و یا سایر چشمه‌های نوترونی، بایستی لایه‌های مختلف از جنس مواد مناسب را با توجه به اکتیویته و انرژی متوسط چشمه در کنار یکدیگر قرار داد.

۳. نتیجه‌گیری

در این کار تجربی کامپوزیت (۵ wt %) PVA-B_۴C به روش محلولی با ضخامت ۱/۰۶۱ mm ساخته شد. پس از مرحله آماده‌سازی نمونه، به منظور اندازه‌گیری ضریب تضعیف مؤثر یا سطح مقطع کلی ماکروسکوپی ماده (Σ_t)، نوترون‌های چشمه

۵. مراجع

1. F. Salimi-Ahmadabad, S. Malekie, F. Ziaie. The investigation of reinforcement phase distribution on electrical conductivity of polymer-carbon nanotube composite as radiation dosimeter: A Monte Carlo method. *Iran. J. Radiat. Saf. Meas.* 4 (2016) 49–55.
2. C. Tan, R. James, B. Dong, M.S. Driver, J.A. Kelber, G. Downing, L.R. Cao. Characterization of a boron carbide-based polymer neutron sensor. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 803 (2015) 82–88.
3. S. Malekie, H. Shooli, M.A. Hosseini. Assessment of new composites containing polyamide-6 and lead monoxide as shields against ionizing photonic radiation based on computational and experimental methods. *Sci. Rep.* 12 (2022) 9259.
4. S. Jayakumar, T. Saravanan, J. Philip. A review on polymer nanocomposites as lead-free materials for diagnostic X-ray shielding: Recent advances, challenges and future perspectives. *Hybrid Adv.* 4 (2023) 100100.
5. S. Malekie, M.A. Hosseini, A. Abiz, F. Bolourinovin, S.M. Tajudin. Radiation shielding characteristics of HDPE/tungsten oxide nanocomposites reinforced with graphene oxide and LDPE using Geant4, XCOM and experiment. *Polyolefins J.* 11 (2024) 199–211.
6. S. Malekie, S. Kashian, A. Akhavan, M. Kheradmand-Saadi. Preliminary study of a novel radiation shield for jaw in dental radiography using the high-density polyethylene/bismuth oxide nanocomposite. *Radiat. Phys. Chem.* 205 (2023) 110743.
7. S. Malekie, S.R.H. Aghdam, S.M.R. Aghamiri, A. Mosayebi, S.M. Tajudin. Exploration of dosimetry characteristics of PVA/MWCNT-OH

- nanocomposite for intraoperative electron radiotherapy. *Radiat. Meas.* 180 (2025) 107345.
8. S.M. Safdari, S. Malekie, S. Kashian, M. Akbari. Introducing a novel beta-ray sensor based on polycarbonate/bismuth oxide nanocomposite. *Sci. Rep.* 12 (2022) 2496.
 9. A. Badawi, S.S. Alharthi, M.G. Althobaiti, A.N. Alharbi. The effect of iron oxide content on the structural and optical parameters of polyvinyl alcohol/graphene nanocomposite films. *J. Vinyl Addit. Technol.* 28 (2022) 235–246.
 10. E. Mitani, Y. Ozaki, H. Sato. Two types of C=O...H-O hydrogen bonds and O-H...O-H (dimer, trimer, oligomer) hydrogen bonds in PVA with 88% saponification/PMMA and PVA with 99% saponification/PMMA blends and their thermal behavior studied by infrared spectroscopy. *Polymer* 246 (2022) 124725.
 11. R. Adeli, S.P. Shirmardi, S.J. Ahmadi. Neutron irradiation tests on B₄C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay. *Radiat. Phys. Chem.* 127 (2016) 140–146.
 12. R. Adeli, S. Shirmardi, R. Bagheri. Theory and simulation investigation of low-energy neutron shielding for different boron compounds. *J. Test. Eval.* 45 (2017) 20160060.
 13. Z. Soltani, A.M. Beigzadeh, F. Ziaie, E. Asadi. Effect of particle size and percentages of boron carbide on the thermal neutron radiation shielding properties of HDPE/B₄C composite: Experimental and simulation studies. *Radiat. Phys. Chem.* 127 (2016) 182–187.
 14. T. Özdemir, A. Güngör, İ. Reyhancan. Flexible neutron shielding composite material of EPDM rubber with boron trioxide: Mechanical, thermal investigations and neutron shielding tests. *Radiat. Phys. Chem.* 131 (2017) 7–12.
 15. M.A. Kiani, S.J. Ahmadi, M. Outokesh, R. Adeli, A. Mohammadi. Preparation and characteristics of epoxy/clay/B₄C nanocomposite at high concentration of boron carbide for neutron shielding application. *Radiat. Phys. Chem.* 141 (2017) 223–228.
 16. Y. Gaylan, B. Avar, M. Panigrahi, B. Aygün, A. Karabulut. Effect of the B₄C content on microstructure, microhardness, corrosion, and neutron shielding properties of Al-B₄C composites. *Ceram. Int.* 49 (2023) 5479–5488.
 17. J. Park, S. Her, S. Cho, S.M. Woo, S. Bae. Synthesis and characterization of polyethylene/B₄C composite, and its neutron shielding performance in cementitious materials: Experimental and simulation studies. *Cem. Concr. Compos.* 129 (2022) 104458.
 18. H. Li, H. Guo, H. Tu, X. Chen, X. Zeng. Research on B₄C/PEEK composite material radiation shielding. *Polymers* 16 (2024) 2902.
 19. N. Hong. An exploration of neutron detection in semiconducting boron carbide [PhD dissertation]. University of Nebraska–Lincoln, Lincoln, NE, USA, 2012.
 20. G.F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2010.
 21. G. Raisali, S. Hamidi, E. Hallajfard, A. Shahvar, N. Hajiloo. Optimization of shadow cone length and mass for determination of the amount of scattered radiation dose in the calibration laboratory of Am/Be neutron source. *J. Nucl. Sci. Technol.* 26 (2007) 7–12.
 22. G. Raisali, N. Hajiloo, S. Hamidi, G. Aslani. Analysis of neutron and gamma-ray streaming along the maze of NRCAM thallium production target room. *Appl. Radiat. Isot.* 64 (2006) 940–947.
 23. F. Saltan, K. Şirin, S. Aydin, Y. Yildirim. Preparation and characterization of novel boron containing nanocomposites with neutron radiation shielding properties. *Polym. Compos.* 44 (2023) 8627–8639.
 24. Y. Wu, Y. Cao, Y. Wu, D. Li. Neutron shielding performance of 3D-printed boron carbide PEEK composites. *Materials (Basel)* 13 (2020) 2314.
 25. A. Veiskarami, D. Sardari, S. Malekie, F.B. Mofrad, S. Kashian. Computational prediction of electrical percolation threshold in polymer/graphene-based nanocomposites with finite element method. *J. Polym. Eng.* 42 (2022) 936–945.
 26. N. Cho, Z. Bao, R.F. Speyer. Density- and hardness-optimized pressureless sintered and post-hot isostatic pressed B₄C. *J. Mater. Res.* 20 (2005) 2110–2116.
 27. B. Ramaraj. Crosslinked poly(vinyl alcohol) and starch composite films: Study of their physicomechanical, thermal, and swelling properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 103 (2007) 1127–1132.
 28. P. Rinard. *Neutron Interactions with Matter*. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA, 1991.
 29. International Atomic Energy Agency. *Measurement Uncertainty: A Practical Guide for Secondary Standards Dosimetry Laboratories*. IAEA-TECDOC-1585, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2008.
 30. M.A.M.M. Alsawah. *Evaluation of Radiation Shielding, Microstructure, and Physical Properties for Polymer Matrix Composites Reinforced with Suitable Fillers* [Master's thesis]. 2024.

31. M.Z. Nurazila, Y. Hafizal, M.A. Megat Harun. Neutron attenuation and mechanical properties of polymer composites filled with boron carbide particles. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 785 (2020) 012005.
32. T. Tuna, A.A. Eker, E. Kam. Neutron shielding characteristics of polymer composites with boron carbide. *J. Korean Phys. Soc.* 78 (2021) 566–573.