

Research Paper

# Simulation of Neutron Absorption of an Aluminum-base Composite Containing Boron Carbide Particles<sup>1</sup>

Zahra Safaei<sup>2</sup>, Mohsen Asadi Asadabad<sup>3\*</sup>, Reza Amini Najafabadi<sup>4</sup> and Javad Mokhtari<sup>5</sup>

Received: 2021.05.11

Revised: 2021.07.13

Accepted: 2021.08.11

## Abstract

The use of metal matrix composites can provide a combination of desirable properties of metals as well as the special physical properties of neutron absorber reinforcing particles such as boron carbide, which alone may be brittle. Therefore, in the present study on neutron attenuation power of composite shielding, several Al-B<sub>4</sub>C composite samples with weight fractions of 5, 10 and 20% B<sub>4</sub>C have been used. In order to investigate the neutron absorption properties of the studied samples, the MCNP Monte Carlo code and the neutron source of the dry channel of the MNSR reactor with a flux of  $2.13 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  have been used, which provided in nominal reactor power of 30 kW. The results show that the neutron flux in the presence of 5, 10 and 20% boron carbide samples is predicted to be  $1.32 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ,  $1.12 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  and  $1.07 \times 10^5 \text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , respectively. With this increase in the percentage of reinforcement phase, neutron flux is reduced down to 50%.

**Keywords:** *Boron carbide, Composite shielding, Neutron absorption, Simulation, Nuclear protection.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.36082.1210

<sup>2</sup> M. Sc. Graduated, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Golpayegan, Isfahan, Iran.  
Email: zsafaei212@yahoo.com

<sup>3</sup> Associate Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran.  
(Corresponding Author) Email: msasadi@aeoi.org.ir

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Metallurgy and Materials Engineering, Golpayegan, Isfahan, Iran.  
Email: ramini33@yahoo.com

<sup>5</sup> Assistant Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran. Email: jmokhtari34@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۵، تابستان ۱۴۰۰

صص ۷-۱۴

مقاله پژوهشی

## شبیه‌سازی جذب نوترونی کامپوزیت پایه آلومینیومی حاوی ذرات کاربید بور<sup>۱</sup>

زهرا صفایی<sup>۲</sup>، محسن اسدی اسدآباد<sup>۳\*</sup>، رضا امینی نجف آبادی<sup>۴</sup> و جواد مختاری<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۲۰

### چکیده

استفاده از کامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌تواند ترکیبی از خواص مطلوب زمینه فلزی و همچنین خواص ویژه فیزیکی ذرات جاذب نوترون مانند کاربید بور را فراهم سازد که به تنهایی ممکن است شکننده و ترد باشند. در این پژوهش مطالعه‌ای روی توان تضعیف نوترون حفاظت‌های کامپوزیتی از نوع میکرو کامپوزیت آلومینیوم/کاربید بور با درصدهای ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی کاربید بور انجام شده است. جهت بررسی خواص جذب نوترون نمونه‌های مورد مطالعه از روش شبیه‌سازی کد مونت کارلوی MCNP و چشمه نوترونی کانال خشک رآکتور

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.36082.1210

<sup>۲</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه فنی مهندسی گلپایگان، گلپایگان، اصفهان، ایران.

Email: zsafaei212@yahoo.com

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران. (نویسنده مسئول).

Email: msasadi@aeoi.org.ir

<sup>۴</sup> استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد، دانشکده فنی، دانشگاه فنی مهندسی گلپایگان، گلپایگان، اصفهان، ایران.

Email: ramini33@yahoo.com

<sup>۵</sup> استادیار، پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران. Email: jmokhtari34@gmail.com

MNSR با شار  $1.0^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$  در  $2/13 \times 1.0^5$  در توان نامی ۳۰ کیلووات استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که شار نوترون در حضور نمونه‌های ۵، ۱۰ و ۲۰٪ کاربید بور به ترتیب  $1.0^5 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ،  $1/32 \times 1.0^5$  و  $1/12 \times 1.0^5$  و  $1/07 \times 1.0^5$  پیش بینی می‌شود و با این افزایش درصد فاز تقویت کننده کاربید بور، شار نوترون تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

**واژگان کلیدی:** کاربید بور، جذب نوترون، شبیه‌سازی، حفاظ هسته‌ای، حفاظت هسته‌ای.

## ۱. مقدمه

در بحث حفاظت در برابر تابش نوترون، ساختارهایی مطلوب است که در مواجهه با تابش نوترون، سرعت نوترون در آن کاهش یابد و در نتیجه تضعیف گردد. در مورد نوترون‌های تند، ترکیبی از مواد استفاده می‌شود که نخست به وسیله پراکندگی‌های کشسان<sup>۱</sup>، انرژی نوترون کاهش یابد تا به حد انرژی نوترون‌های حرارتی برسد و سپس به وسیله مواد جاذب نوترون، این نوترون‌های کم‌انرژی جذب شوند. با توجه به این که جرم نوترون تقریباً با جرم هیدروژن یکسان است، مؤثرترین مواد کندکننده (تعديل کننده)<sup>۲</sup>، مواد هیدروژن گونه است. افزون بر این، مواد جاذب مطلوب باید حین جذب نوترون‌های حرارتی، اثرگیراندازی گسیل گاما را به کمترین مقدار برساند. بسیاری از مواد مورد استفاده در ساخت قطعات به منظور حفاظت در برابر تابش نوترون منجر به دام انداختن پرتوهای گاما یا فوتون‌ها به وسیله پراکندگی ناکشسان می‌شوند. با اضافه کردن بور، لیتیم و یا گادولونیوم به ساختار قطعات حفاظ، این برهمکنش‌ها را می‌توان به حداقل رساند. از آنجا که بور نسبتاً ارزان است و قابلیت بالایی در جذب نوترون‌های حرارتی دارد، از این رو ترکیبات حاوی بور برای این هدف انتخاب می‌شوند [۱]. حفاظ‌های کامپوزیتی شامل یک کندکننده نوترون سریع و یک ماده جاذب نوترون گرمایی هستند. نوترون‌های سریع در اثر پراکندگی‌های مکرر به وسیله هسته‌های کربن و هیدروژن، قسمت اعظمی از انرژی خود را از دست داده، کند شده و در نهایت حرارتی می‌شوند. از جمله مواد کندکننده می‌توان به آب، پارافین و دیگر مواد هیدروژن‌دار اشاره کرد [۲]. کامپوزیت  $\text{Al-B}_4\text{C}$  به علت توانایی جذب نوترون، بدون تشکیل هسته‌های رادیواکتیو با عمر طولانی، به طور گسترده‌ای به عنوان میله‌های کنترل، مواد محافظ و آشکارساز نوترون در رآکتورهای هسته‌ای استفاده می‌شود [۳] توانایی جذب نوترون توسط کاربید بور با غنی کردن ایزوتوپ  $^{10}\text{B}$  افزایش می‌یابد. همچنین مواد کامپوزیت حاوی کاربید بور با هدایت حرارتی مطلوب

<sup>1</sup> Elastic Scattering

<sup>2</sup> Moderator

و مقاومت مناسب در برابر شوک حرارتی به عنوان نخستین مواد در دیوارهٔ رآکتورهای همجوشی هسته‌ای معرفی شده‌اند [۴]. پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است، به طور مثال در مطالعه‌ای که اوئنز<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۸ انجام دادند، از روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، قابلیت محافظت نوترون و خصوصیات تولید تابش ثانویه در چهار مادهٔ مختلف از جمله کاربید بور/آلومینیوم، کاربید بور/تنگستن، متاتن و شیشهٔ بور سیلیکات بیسموت و متاتن استفاده کردند. داده‌های حاصل در مورد عملکرد محافظتی و تابش ثانویهٔ تولید شده نشان داد که کامپوزیت کاربید بور/تنگستن مؤثرترین مادهٔ حفاظ کامپوزیتی است. همچنین مشخص گردید که کامپوزیت‌های حاوی مواد با عدد اتمی پایین، عملکرد حفاظتی بهتری در برابر نوترون‌های سریع دارند [۵]. همچنین در مطالعهٔ دیگری، کرکوت و همکارانش روی ویژگی حفاظ نوترونی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف بور تحقیق کردند و با استفاده از شبیه‌سازی و نتایج تجربی نشان دادند که با افزایش مقدار بور، خواص حفاظتی نمونه‌ها افزایش می‌یابد [۶]. در هیچ یک از پژوهش‌های انجام شده از محیط یک رآکتور برای شبیه‌سازی استفاده نشده است. یکی از رآکتورهای تحقیقاتی که بدین منظور از آن استفاده می‌شود، رآکتور چشمهٔ نوترون مینیاتوری (MNSR) است [۷]. این رآکتور کم‌قدرت با حداکثر توان ۳۰ KW و سوخت اورانیوم ۲۳۵ با غنای حدود ۹۰٪ در پژوهشکدهٔ رآکتور پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای اصفهان مستقر است.

روش‌ها و نرم‌افزارهای بسیاری برای تولید اعداد تصادفی به منظور کاربرد در شبیه‌سازی‌های مونت کارلو مطرح شده‌اند. در این میان کد MCNP یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی در انجام محاسبات هسته‌ای است که بر اساس روش مونت کارلو کار می‌کند. این کد در طراحی رآکتورهای هسته‌ای و بررسی ایمنی آنها، حفاظ‌سازی، طراحی آشکارسازها، چاه‌پیمایی هسته‌ای، طراحی هدفمند شتاب دهنده‌ها، فیزیک پزشکی، محاسبات دزیمتری و منحنی‌های هم‌دز و غیره کاربرد دارد. این کد قابلیت رهگیری سه نوع ذره (نوترون، الکترون و فوتون) را دارد و اکثر برهمکنش‌های هر یک از این ذرات در سیستم بررسی می‌گردد. پارامترهای هر ذره بعد از برهمکنش به عنوان یک تاریخچه ذخیره می‌گردد و ذره آن قدر ردگیری می‌شود تا از سیستم خارج شود و یا آن‌چنان کم‌اهمیت شود که در نتیجهٔ محاسبات بی‌تأثیر باشد؛ سپس ذرهٔ بعدی ردگیری می‌شود. همچنین اگر در یک برهمکنش نوترون، فوتون و یا الکترون جدیدی تولید شود، آن ذره نیز ردگیری می‌شود. خروجی برنامه در واقع یک متوسط‌گیری روی سهم‌های تمام تاریخچه‌های ذرات در یک مسئله است [۸].

<sup>1</sup> Evans

در این پژوهش به منظور بررسی کارایی کامپوزیت  $Al-B_4C$  به عنوان حفاظ جاذب نوترون از چند نمونه با درصد‌های مختلف  $B_4C$  استفاده گردید و برای نخستین بار خواص این نمونه‌ها با روش شبیه‌سازی با کد MCNP در چشمه نوترونی رآکتور تحقیقاتی MNSR مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

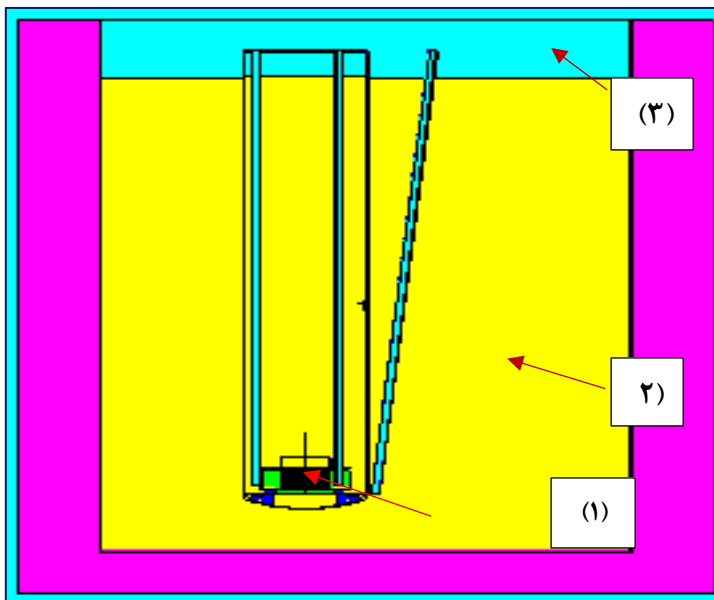
در رآکتور MNSR از اورانیوم با غنای بالا به عنوان سوخت، آب به عنوان خنک‌کننده و کندکننده و برلیوم به عنوان بازتابنده استفاده شد. غنای اورانیوم  $^{235}U$  در این چشمه نوترونی ۸۹٪/۹۷ و چگالی سوخت  $3/43 \text{ gr/cm}^3$  است. هدف از انجام مطالعات شبیه‌سازی در این پژوهش، بررسی توانایی کامپوزیت  $Al-B_4C$  در جذب نوترون به عنوان حفاظ هسته‌ای است. در این تحقیق از نوترون‌های خروجی کانال خشک رآکتور مینیاتوری به عنوان چشمه نوترون استفاده شد. به همین منظور کل رآکتور به صورت سه‌بعدی در کد MCNPX6 شبیه‌سازی شد و با استفاده از روش Kcode و تالی F5 شار نوترون در خروجی کانال خشک در حضور نمونه‌های کامپوزیت و در نبود آنها محاسبه شد. در هر شبیه‌سازی از ۵۰ سیکل غیرفعال و ۵۰۰ سیکل فعال استفاده شد. در هر سیکل یک میلیون ذره دنبال شد. شبیه‌سازی‌ها در دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد انجام شد. برای به دست آوردن شار مطلق از ضریب تبدیل  $10^{15} \times 2/53$  استفاده شد. نمونه‌های کامپوزیتی  $Al-B_4C$  با کسر جرمی ۵٪، ۱۰٪ و ۲۰٪ کاربید بور در مقابل خروجی سایت خشک رآکتور MNSR با شرایط واقعی این رآکتور در توان ۳۰ کیلووات مدل گردید و شار نوترون در خروجی سایت خشک در حضور و غیاب نمونه‌ها اندازه‌گیری شد و اثر حضور نمونه‌ها به عنوان حفاظ، مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصه ابعادی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ذکر شده است.

جدول ۱ مشخصه ابعادی تقریبی نمونه‌های کامپوزیتی  $Al-B_4C$

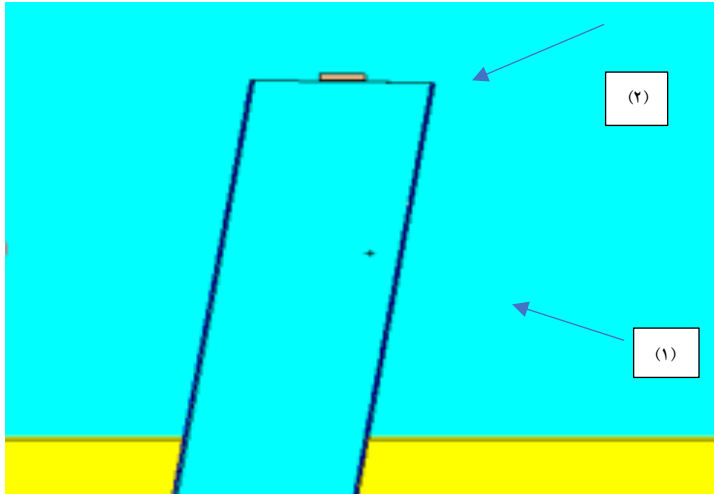
نمونه	طول (cm)	عرض (cm)	ضخامت (cm)
Al-5%B <sub>4</sub> C	~۱/۹۰	~۱/۴۵	~ ۰/۳۹
Al-10%B <sub>4</sub> C	~۱/۶۰	~۱/۲۰	~ ۰/۳۹
Al-20%B <sub>4</sub> C	~۱/۲۵	~۱/۲۵	~ ۰/۳۹

### ۳. نتایج و بحث

هر چند در چند پژوهش [۹-۱۱] به کمک روش شبیه‌سازی مونت کارلو و همچنین چشمه‌های نوترونی با انرژی مختلف، مقدار جذب نوترون کامپوزیت‌های حاوی  $Al/B_4C$  با نسبت‌های مختلف بررسی شده است، اما این شبیه‌سازی برای نخستین بار در حضور رآکتور مینیاتوری (MNSR) انجام گرفته است. شکل ۱ شمایی از رآکتور مینیاتوری (MNSR) شبیه‌سازی شده با استفاده از کد MCNP و محل قرارگیری قلب رآکتور و همچنین سایت خشک و خروجی سایت خشک (محل قرارگیری نمونه‌های مورد مطالعه) را نشان می‌دهد. این نمودار با استفاده از نرم‌افزار X-Vised رسم شده است. شکل ۲ تصویر با بزرگنمایی بیشتر از نمونه شبیه‌سازی شده در خروجی سایت خشک را نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ذکر شده است.



شکل ۱ شمای رآکتور مینیاتوری (MNSR) شبیه‌سازی شده با استفاده از کد MCNP، ۱: قلب رآکتور مینیاتوری MNSR، ۲: سایت خشک، ۳: خروجی سایت خشک (محل قرارگیری حفاظ‌های کامپوزیتی)



شکل ۲ تصویر شماتیک نمونه شبیه‌سازی شده در خروجی سایت خشک، ۱: سایت خشک، ۲: نمونه شبیه‌سازی شده در خروجی سایت خشک

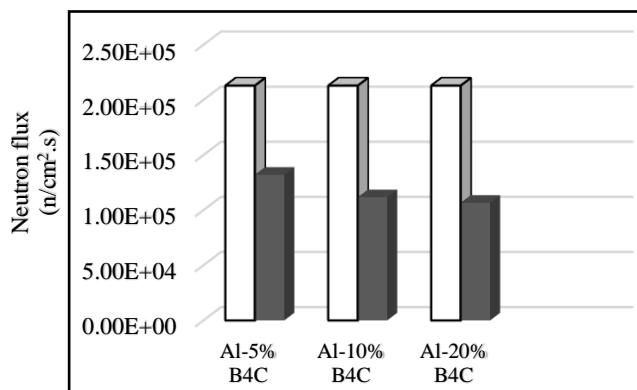
جدول ۲ نتایج شبیه‌سازی نمونه‌های کامپوزیتی  $Al-B_4C$

نمونه	ضخامت (cm)	شار نوترون بدون حضور نمونه‌ها ( $n/cm^2.s$ )	شار نوترون در حضور نمونه‌ها ( $n/cm^2.s$ )	خطا
Al-5% $B_4C$	~ ۰/۳۹	$۲/۱۳۰۱۸ \times ۱۰^۵$	$۱/۳۲۱۴۸ \times ۱۰^۵$	۰/۰۰۱
Al-10% $B_4C$	~ ۰/۳۹	$۲/۱۳۰۱۸ \times ۱۰^۵$	$۱/۱۱۷۷۹ \times ۱۰^۵$	۰/۰۰۱
Al-20% $B_4C$	~ ۰/۳۹	$۲/۱۳۰۱۸ \times ۱۰^۵$	$۱/۰۶۷۲۱ \times ۱۰^۵$	۰/۰۰۱

شکل ۳ نیز اثر فاز تقویت کننده کاربید بور را در کاهش شار نوترون نشان می‌دهد. همان‌طور که از داده‌های شبیه‌سازی جدول ۲ و شکل ۳ استدلال می‌شود، شار نوترون حرارتی خروجی از سایت خشک رآکتور MNSR با حضور نمونه‌های کامپوزیتی به عنوان حفاظ کاهش یافته و با افزایش درصد فاز تقویت کننده کاربید بور، کاهش شار بیشتری نتیجه‌گیری می‌شود. در پژوهشی [۶] از روش مونت کارلو برای شبیه‌سازی ضرایب بازتاب و انتقال کامپوزیت  $Al/B_4C$  با درصد‌های جرمی مختلف  $B_4C$  و ضخامت‌های مختلف در برابر نوترون‌های با انرژی متفاوت استفاده شد. این تحقیق نشان داد که ضریب بازتاب ابتدا با افزایش ضخامت کامپوزیت  $Al/B_4C$  افزایش می‌یابد و پس از آن که ضخامت به مقدار مشخصی رسید، تمایل به اشباع دارد. این تحقیق نشان می‌دهد که

ضریب بازتاب اشباع نوترون و ضخامت مربوط به آن به انرژی نوترون و درصد جرمی  $B_4C$  در کامپوزیت بستگی دارد. در تحقیق دیگری [۹] نشان داده شد که افزایش کسر جرمی  $B_4C$  منجر به کارایی بیشتر حفاظ نوترون حرارتی می‌گردد. با افزایش ضخامت حفاظ نیز علاوه بر کاهش بیشتر شار سطحی، مقدار بسیار بیشتری تابش ثانویه تولید می‌شود.

از آنجا که سطح مقطع جذب نوترون برای  $^{10}B$  در کاربید بور  $3837$  بارن است [۵]، شار نوترون فرودی هنگام برخورد با ذرات کاربید بور که به عنوان فاز تقویت کننده است، جذب می‌شود. طبیعی است با افزایش مقدار فاز  $B_4C$ ، جذب نوترون توسط نمونه‌ها افزایش می‌یابد و کاهش شار بیشتری مشاهده می‌شود؛ همچنین همان‌گونه که از داده‌های شبیه‌سازی جدول ۲ استدلالت می‌شود با مدل کردن نمونه‌های کامپوزیتی  $Al-B_4C$  با درصدهای وزنی  $5\%$ ،  $10\%$  و  $20\%$  به ترتیب میزان شار نوترون حرارتی عبوری از نمونه‌ها کاهش می‌یابد و به ترتیب کاهش شار  $38\%$ ،  $48\%$  و  $5\%$  برای نمونه‌های  $Al-5\%B_4C$ ،  $Al-10\%B_4C$  و  $Al-20\%B_4C$  مشاهده می‌شود. جذب نوترون در کامپوزیت  $Al-Si-Mg-B_4C$  توسط چشمه نوترون  $Am/Be241$  در یک پژوهش تجربی صورت گرفته است، خواص جذب نوترون با افزایش مقدار  $B_4C$  افزایش یافته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاربید بور تا  $8\%$ ، میزان تضعیف نوترون  $25.4$  درصد افزایش می‌یابد. در پژوهش دیگری توسط ژیانگ و همکارانش [۱۱] داده‌های تجربی اندازه‌گیری جذب نوترون در کامپوزیت‌های حاوی  $Al/B_4C/Gd$  با نتایج روش شبیه‌سازی توسط  $MCNP$  مقایسه گردید و تطابق مطلوبی بین آنها مشاهده شد.



□ شار اندازه‌گیری شده بدون حضور نمونه

■ شار اندازه‌گیری شده در حضور نمونه

شکل ۳ اثر افزایش فاز تقویت کننده کاربید بور در میزان جذب نوترون



#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش خواص هسته‌ای کامپوزیت  $Al-B_4C$  به عنوان حفاظ جاذب نوترون با استفاده از روش شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با افزایش درصد فاز تقویت کننده کاربید بور، جذب نوترون توسط نمونه‌های کامپوزیتی افزایش می‌یابد و شار نوترون حرارتی در خروجی کانال خشک با حضور نمونه‌های کامپوزیتی کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که کاهش شار نوترون و جذب آن توسط نمونه‌های کامپوزیتی با افزایش درصد فاز تقویت کننده همبستگی مثبتی دارد؛ به طوری که جذب نوترون حرارتی در نمونه  $Al-5\%B_4C$  از ۳۸٪ به ۵۰٪ در نمونه  $Al-20\%B_4C$  افزایش پیدا کرده است و بسته به نوع نیاز و مصرف آن در صنعت می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

#### منابع

- [1] Martin J.E., *Physics for Radiation Protection*, translated by Payami F., Bigdeli Z., and Nasr Isfahani M.J., 1st ed, Sana Publication, Isfahan, 2015 (In Persian).
- [2] Knoll G.F. *Radiation detection and measurement*. 4th ed. John Wiley & Sons, New York, 2010.
- [3] Dominguez C., Cocuad N., Drouan D., Constant A., and Jacquemain D., Investigation on boron carbide oxidation for nuclear reactor safety: Experiments in highly oxidising conditions, *Journal of nuclear materials*, 374(3), 473-481, 2008.
- [4] Jimbou R., Saidoh M., Nakamura K., Akiba M., Suzuki S., Gotoh Y., and Tsuchiya B., New composite composed of boron carbide and carbon fiber with high thermal conductivity for first wall, *Journal of nuclear materials*, 233, 781-786, 1996.
- [5] Evans B.R., Lian J., and Ji W., Evaluation of shielding performance for newly developed composite materials, *Annals of Nuclear Energy*, 116, 1-9, 2018.
- [6] Korkut T., Karabulut A., Budak G., Aygün B., Gencil O., and Hançerlioğullar A., Investigation of neutron shielding properties depending on number of boron atoms for colemanite, ulexite and tincal ores by experiments and FLUKA Monte Carlo simulations, *Applied Radiation and Isotopes*, 70 (1), 341-345, 2012.
- [7] Mokhtari, J., Faghihi, F., Choopan Dastjerdi, M.H., and Khorsandi, J., Neutronic feasibility study of using a multipurpose MNSR for BNCT, NR, and NAA, *Applied Radiation and Isotopes*, 161, 109147, 2020.
- [8] X-5 Monte Carlo Team, <https://mcnp.lanl.gov> April 24, 2003 (Revised 2/1/2008).
- [9] Zhang P., Li Y., Wang W., Gao Z., and Wang B., The design, fabrication and properties of  $B_4C/Al$  neutron absorbers, *Journal of Nuclear materials*, 437(1-3), 350-358, 2013.
- [10] Abdullah Y., Ibrahim A.S., Daud A.R., and Yusof M.R., Neutron absorption of  $Al-Si-Mg-B_4C$  composite, *AIP Conference Proceedings*, 1704 (1), 2016.
- [11] Jiang L.T., Xu Z.G., Fei Y.K., Zhang Q., Qiao J., and Wu G.H., The design of novel neutron shielding  $(Gd+B_4C)/6061Al$  composites and its properties after hot rolling, *Composites Part B*, 168, 183-190, 2019.