مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۱۰۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 102, No. 1, 2023

# بررسی تجربی ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و هسته‌ای کامپوزیت‌های جاذب نوترون حاوی بور

**محمدجواد نصر اصفهانی[۲]، محسن اسدی اسدآباد*[۱]،فریدون پیامی[۱]**

۱. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران- ایران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۱۹۵۳۶۳۳۵۱۱، تهران- ایران

*Email: msasadi@aeoi.org.ir

**مقاله‌ی پژوهشی**

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۲/۲۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۸

## چکیده

در پژوهش حاضر ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و هسته‌ای دو نوع کامپوزیت زمینه پلیمری و زمینه فلزی حاوی ذرات کاربید بور مورد بررسی تجربی قرار گرفت. بر اساس آزمون عبور نوترون، میزان عبور نوترون کم‌تری در پلیمر BPAER تقویت‌شده با نانوذرات $B_4C$ در مقایسه با کامپوزیت تقویت‌شده با میکروذرات به‌دست آمد. نمودارهای تنش- کرنش به‌دست آمده از آزمون کشش، بهبود ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت رزین اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات $B_4C$ در مقایسه با میکروذرات را نشان می‌دهد. هم‌چنین آزمون عبور تابش نوترون، بهبود مشخصه‌ی هسته‌ای نانوکامپوزیت Al-$B_4C$ را در مقایسه با میکروکامپوزیت Al-$B_4C$ نشان می‌دهد. از سوی دیگر مشاهده شد چگالی این نانوکامپوزیت مقدار بیش‌تری نسبت به میکروکامپوزیت داشته و صرفنظر از اندازه و مقدار افزودن ذرات کاربید، چگالی تمام نمونه‌های کامپوزیتی کم‌تر از آلومینیم است. با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده سختی کامپوزیت نیز افزایش یافته است که این افزایش در نمونه‌های نانوکامپوزیت بسیار بیش‌تر از نمونه‌های میکرو بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** کامپوزیت، کاربید بور، عبور نوترون، نانوذرات

# Experimental study of structural, mechanical, and nuclear properties of neutron absorber composites containing boron

**M.J. Nasr Isfahani[2], M. Asadi Asadabad*[1], F. Payami[1]**

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran
2. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.BOX: 1953633511, Tehran - Iran

**Research Article**
Received 10.5.2021, Accepted 10.10.2021

## Abstract

The present study investigated the structural, mechanical, and nuclear properties of two types of polymeric and metallic composites containing boron carbide particles. The neutron transmission test obtained lower neutron transmission in BPAER reinforced with $B_4C$ nanoparticles compared to the microparticle-reinforced composite. The stress-strain diagrams obtained from the tensile test show the improvement of the mechanical properties of the epoxy resin composite reinforced with $B_4C$ nanoparticles compared to the microparticles. The neutron transmission test also indicates an improvement in the nuclear properties of the Al-$B_4C$ nanocomposite compared to the Al-$B_4C$ micro composite. On the other hand, the density of this nanocomposite shows an increase compared to the micro composite. Also, regardless of the size and amount of carbide particles added, the density of all composite samples was lower than that of aluminum. Also, the hardness of the composite increased with increasing the amount of reinforcing phase, which was more in the nanocomposite samples than in the micro composite samples.

**Keywords:** Composite, Boron carbide, Neutron transmission, Nanoparticles

## ۱. مقدمه

نوترون به‌طور گسترده‌ای در قدرت هسته‌ای، فن‌آوری تصویربرداری، آنالیز فعال‌سازی و پرتودرمانی به‌کار می‌رود [۱]. از آن‌جایی‌که نوترون اثرات بیولوژیکی بالاتری نسبت به سایر تابش‌های یونیزه دارد و عامل وزنی دز آن با انواع دیگر تابش‌های یونیزه قابل مقایسه نیست، به همین دلیل با توسعه صنعت هسته‌ای، تقاضا برای مواد حفاظ در برابر تابش نوترون نیز افزایش یافته است. حفاظ‌های سنتی از صفحات ضخیم سرب و بتن تقویت‌شده ساخته می‌شوند که با کاهش سرعت نوترون از عبور آن جلوگیری می‌کنند. وجود مشکلات ساخت و انتقال لایه‌های ضخیم و دشواری تعمیر آن‌ها سبب شده است که پژوهشگران تلاش‌هایی را در راستای تهیه حفاظ‌هایی سبک و قابل‌حمل مانند کامپوزیت‌ها انجام دهند [۲]. بنابراین، لازم است از یک تقویت‌کننده مانند کاربید بور در زمینه‌ای سبک و شکل‌پذیر مانند آلومینیم استفاده شود تا امکان ساخت و شکل‌دهی قطعاتی سبک به‌عنوان حفاظ نوترون به‌وجود آید [۳]. پژوهشگران بسیاری، تهیه و مشخصه‌یابی کامپوزیت Al-$B_4C$ را مورد بررسی قرار داده‌اند [۳-۱۰]. یکی از نکات مشترک این پژوهش‌ها لزوم توزیع همگن ذرات برای حصول ریزساختار مطلوب و بهبود خواص مکانیکی است [۴]. به‌همین‌منظور روش‌های مختلفی برای ساخت این کامپوزیت‌ها از قبیل ریخته‌گری همزنی[1] [۵]، ریخته‌گری کوبشی[2] [۶]، روش متالورژی پودر [۷] زینترینگ پلاسمای جرقه‌ای [۸]، زینترینگ با ماکروویو [۹] و . . . مورد توجه قرار گرفته است. با این‌وجود هم‌چنان مسایل حل نشده بسیاری نظیر سازگاری و ترشوندگی مناسب فاز تقویت‌کننده با زمینه [۱۰]، توزیع مناسب فاز تقویت‌کننده در زمینه [۴]، محدودیت تولید صفحات نازک به دلیل ترد بودن $B_4C$ [۳]، نقش اندازه ذرات [۷] و . . . باقی‌مانده است. مطالعه‌ی تجربی تأثیر پارامترهای مختلف از جمله اندازه ذرات $B_4C$ روی بازده حفاظ نوترون این کامپوزیت‌های زمینه فلزی بسیار مؤثر خواهد بود.

از سوی دیگر اخیراً گستره‌ی وسیعی از ترکیبات هیدروژن‌گونه هم‌چون پلی‌اتیلن و پارافین که حاوی مقدار نسبتاً زیاد اتم‌های هیدروژن به‌عنوان کُندساز نوترون هستند، با عناصری با جذب بالا برای نوترون حرارتی هم‌چون بور، لیتیوم و گادولینیوم به عنوان تقویت‌کننده، در بحث حفاظت در برابر تابش نوترون مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۱]. کامپوزیت‌های پلیمری دربرگیرنده‌ی ترکیبات بور به دلیل این‌که نسبتاً ارزان بوده و دارای توانایی خوبی برای جذب نوترون هستند، برای این منظور بیش‌تر مورد توجه قرار گرفته و استفاده شده‌اند [۱۲]. هر چند پلی‌اتیلن معروف‌ترین پلیمر برای حفاظت در برابر تابش نوترون است، اما به‌علت مقاومت حرارتی نسبتاً پایین، پژوهشگران را به سمت دیگر مواد هیدروژن‌گونه یا کامپوزیت‌ها سوق داده است [۱۳]. اپوکسی، به عنوان یک پلیمر گرماسخت[3]، به‌علت وزن کم، در این زمینه مفید بوده و به راحتی به‌جای کامپوزیت‌های زمینه فلزی یا پلیمرهای گرمانرم[4] هم‌چون پلی‌اتیلن قابل استفاده است. رزین اپوکسی ویژگی‌های برجسته‌ای مانند پایداری ابعادی خوب به‌علت جمع‌شوندگی[5] اندک، چسبندگی عالی به بیش‌تر تقویت‌کننده‌ها، مقاومت زیاد در برابر حرارت، استحکام مکانیکی بالا و پایداری شیمیایی را دارا می‌باشد. علاوه بر این، به‌علت وجود حلقه‌های آروماتیک، در مقایسه با پلی‌اتیلن یا بتن دوام بیش‌تری در برابر تابش هم‌زمان گاما و نوترون دارد [۱۴].

افزودن ترکیبات حاوی بور مانند کاربید بور به‌عنوان تقویت‌کننده در زمینه‌های پلیمری توانایی ماده پلیمری را به عنوان حفاظ در برابر تابش نوترون افزایش می‌دهد [۱۵]. ذرات سرامیکی $B_4C$ با داشتن ویژگی‌هایی هم‌چون دیرگدازی[6]، مقاومت سایشی[7] و پایداری شیمیایی از مهم‌ترین مواد به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری حفاظ در برابر تابش نوترون هستند.

در حالی‌که کاربرد فن‌آوری نانو در شاخه‌های مختلف مهندسی نتایج امیدوارکننده‌ای را به همراه داشته است ولی در زمینه‌ی مهندسی هسته‌ای توسعه چندانی نداشته است [۱۶]. لذا در این پژوهش سعی شده با استفاده از نانوذرات کاربیدبور به‌عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی و کامپوزیت‌های رزین اپوکسی از نوع بیسفنول‌آ، علاوه بر رفع نیازمندی‌های حفاظت در برابر تابش نوترون، ویژگی‌های مکانیکی را نیز بهبود بخشید.

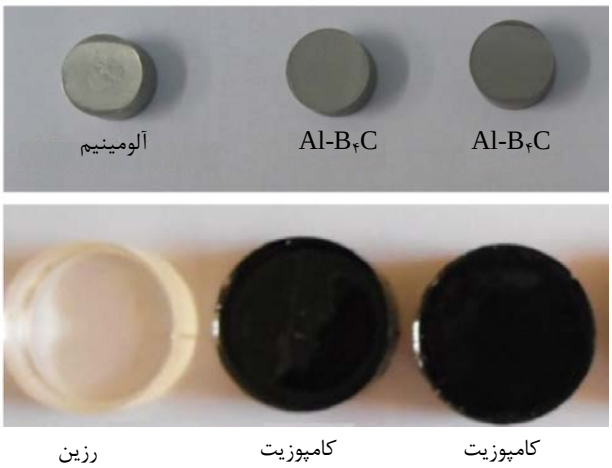
## ۲. مواد و روش آزمون

در این تحقیق از دو نوع نانوکامپوزیت حاوی کاربید بور استفاده شد. تصویر نمونه‌های ساخته شده در شکل ۱ و مشخصات این دو نوع کامپوزیت در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

1. Stir Casting
2. Squeeze Casting

3. Thermoset
4. Thermoplastic
5. Shrinkage
6. Heat Resistance
7. Abrasion Resistance

چیدمان مورد استفاده در این پژوهش برای اندازه‌گیری شار نوترون عبوری از قطعات حفاظ ساخته‌شده در شکل ۲ آمده است. در این چیدمان همان‌گونه که مشاهده می‌شود چشمه $^{۲۵۲}Cf$ (جدول ۲) به عنوان چشمه تابش نوترون داخل بلوک‌های پارافینی قرار گرفته است. باریکه‌ی نوترون فرودی پس از عبور از حفره‌های گرافیتی از قطعات حفاظ تهیه‌شده عبور می‌کند. تابش نوترون پس از عبور از قطعات حفاظ مجدداً از حفره‌های گرافیتی عبور کرده و به یک آشکارساز $BF_۳$ که در ارتباط با یک رایانه مبتنی بر تحلیل‌گر چندکاناله است وارد می‌گردد. حضور این تحلیل‌گر چندکاناله برای سنجش تپ گسیلی از آشکارساز در حین آزمایش انتخاب شده است. در نهایت برای سنجش میزان نوترون عبوری از حفاظ از یک شمارنده ولتاژ بالا استفاده شده است.




**شکل ۱.** نمونه‌های ساخته شده کامپوزیت زمینه‌فلزی و کامپوزیت زمینه‌پلیمری.

**جدول ۱.** مشخصات فازهای زمینه و تقویت کننده دو کامپوزیت

| فاز زمینه | درصد $B_۴C$ | ابعاد ذرات $B_۴C$ | ضخامت نمونه (mm) | قطر نمونه (mm) |
|---|---|---|---|---|
| اپوکسی بیسفنول آ [1] | ٪۵ | µm/nm | ۲۰ | ۶۰ |
| اپوکسی بیسفنول آ | ٪۱۰ | µm/nm | ۲۰ | ۶۰ |
| آلومینیم | ٪۵ | µm/nm | ۸ | ۲۰ |
| آلومینیم | ٪۱۰ | µm/nm | ۸ | ۲۰ |

**جدول ۲.** مشخصات چشمه $^{۲۵۲}Cf$ استفاده شده در این پژوهش

| فعالیت (mCi) | نیمه عمر (سال) | انرژی نوترون (MeV) | آهنگ گسیل نوترون (n/s) | سال تولید |
|---|---|---|---|---|
| ۲۷ | ۲٫۶۵ | ۲ | ۱٫۱×۱۰^۸ | ۱۹۹۰ |

زمان شمارش برای هر اندازه‌گیری ۱۰۰ s انتخاب شد تا بین ۱۰۰ تا ۱۱۰ شمارش با عدم قطعیت کم‌تر از ٪۰٫۳ ثبت شود. برای انجام آزمون، نخست آهنگ شار نوترون بدون حفاظ ($I_0$) (شدت اولیه) و به‌مدت ۱۰۰ s اندازه‌گیری شد. سپس همان‌گونه که در شکل (۲ ج) نشان داده شده، حفاظ مورد بررسی جلوی چشمه نوترون گذاشته شده و آهنگ شار نوترون عبوری (I) به مدت ۱۰۰ s اندازه‌گیری شد. ضریب عبور نوترون به صورت $I/I_0$ محاسبه شد. در این پژوهش، تأثیر مقدار و اندازه ذرات $B_۴C$ و ضخامت قطعات کامپوزیت BPAER-$B_۴C$ و کامپوزیت Al-$B_۴C$ بر توانایی جذب نوترون تعیین گردید.

**شکل ۲.** طرح شماتیک و نمایی از چیدمان مورد استفاده برای اندازه‌گیری میزان عبور نوترون.

1. Bisphenol A Epoxy Resin (BPAER)

آزمون کشش، به عنوان یکی از رایج‌ترین آزمون‌ها برای تعیین مشخصات مکانیکی مواد کامپوزیت پلیمری، برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت BPAER-$B_4C$ استفاده شد. برای این هدف از هر ترکیب، سه نمونه‌ی دمبلی‌شکل مطابق استاندارد ASTM D۶۳۸ تهیه شد. سپس با استفاده از یک دستگاه کشش فشار ۵۰ kN مدل H۵۰KS شرکت Hounsfield کشور انگلستان با آهنگ کشش ۰٫۵ mm/min در دمای اتاق، نمودار تنش - کرنش نمونه‌ها به‌دست آمد. با استفاده از داده‌های منحنی تنش - کرنش، مقادیر استحکام کششی و درصد ازدیاد طول هر نمونه تعیین شد.

چگالی تجربی کامپوزیت Al-$B_4C$ با استفاده از روش ارشمیدوس اندازه‌گیری شد. در این روش، چگالی نمونه‌ها با اندازه‌گیری اختلاف بین وزن نمونه در هوا و وزن نمونه در آب مقطر در دمای اتاق اندازه‌گیری شد. چگالی نظری با استفاده از قانون مخلوط‌ها محاسبه شد. درصد حفره نیز بر اساس اختلاف در مقادیر چگالی تجربی و چگالی نظری نمونه‌ها محاسبه گردید. به‌منظور بررسی ویژگی مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت آلومینیم - کاربید بور، سختی نمونه‌ها بر اساس آزمون مختلف میکروسختی تعیین شد. برای آزمون میکروسختی از یک دستگاه QV-۱۰۰۰ DAT ساخت کشور آمریکا با یک فرورونده هرمی ویکرز، با اعمال بار ۱۰۰ g روی ۱۰ نقطه از هر نمونه انجام شد.

## ۳. نتایج و بحث

### ۱.۳ ویژگی‌های هسته‌ای کامپوزیت رزین اپوکسی بیسفنول آ-کاربید بور

برای بررسی تأثیر نانوذرات $B_4C$ به عنوان تقویت‌کننده در زمینه BPAER بر ویژگی جذب نوترون، از آزمون تجربی عبور تابش نوترون استفاده شده است. در این آزمون تغییرات شدت باریکه‌ی عبوری نسبت به باریکه‌ی فرودی تابش نوترون بر اساس تغییر اندازه‌ی ذرات $B_4C$ در دو گستره‌ی نانومتری و میکرومتری و تغییر مقدار $B_4C$ برای دو مقدار ۵ و ۱۰٪ وزنی بررسی شده است. میزان عبور نوترون برحسب ضخامت حفاظ با تغییر مقدار و اندازه ذرات $B_4C$ به عنوان جزء تقویت‌کننده کامپوزیت BPAER-$B_4C$ در جدول ۳ و شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار $B_4C$ میزان عبور نوترون کاهش می‌یابد. شیب نمودار در نمونه‌های نانوکامپوزیت BPAER-$B_4C$ در مقایسه‌ی با نمونه‌های میکروکامپوزیت BPAER-$B_4C$ سریع‌تر می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده کاهش سریع‌تر میزان عبور نوترون در نانوکامپوزیت BPAER-$B_4C$ در مقایسه با میکروکامپوزیت BPAER-$B_4C$ است.

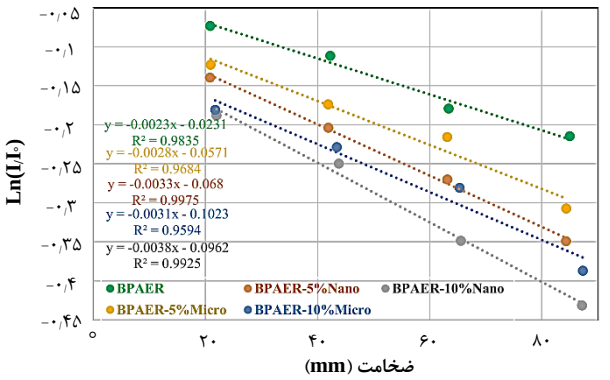
از آن‌جایی‌که سطح مقطع جذب $B_4C$ برای نوترون‌های سریع خیلی کوچک است، در نتیجه نوترون‌های سریع می‌توانند بدون این‌که حفاظ شوند عبور کنند. بنابراین نوترون‌های فرودی در این آزمون را می‌توان با دقت بالایی نوترون حرارتی در نظر گرفت [۱۷]. همان‌گونه که از داده‌های شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش مقدار $B_4C$، کاهش اندازه ذرات $B_4C$ و افزایش ضخامت حفاظ، میزان عبور تابش نوترون از کامپوزیت BPAER-$B_4C$ کاهش پیدا کرده است. این روند پیش از این نیز در سامانه‌های مشابهی هم‌چون $B_4C$- رزین اپوکسی [۱۸]، $B_4C$- پلی‌اتیلن چگالی بالا [۱۹]، $B_4C$- فیبرکربنی- رزین اپوکسی [۱۲] و $B_4C$- لاستیک طبیعی [۲۰] گزارش شده است.

کامپوزیت‌های تقویت‌شده با نانوذرات کاربید بور به علت افزایش مساحت سطحی نانوذرات نسبت به همتای میکرومتری توزیع بهتر نانوذرات $B_4C$ نسبت به همتای میکرومتری در زمینه‌ی BPAER و حذف جذب ذره به‌علت خودحفاظتی[1] و در نتیجه افزایش احتمال برهم‌کنش ذرات کاربید بور با نوترون‌های حرارتی، میزان عبور نوترون از قطعات نانوکامپوزیت BPAER-$B_4C$ نسبت به میکروکامپوزیت BPAER-$B_4C$ کم‌تر است [۲۱]. بنابراین با کاهش اندازه ذرات $B_4C$ از گستره میکرومتری به گستره‌ی نانومتری، میزان عبور نوترون کاهش یافته است.

**جدول ۳.** نتایج به‌دست آمده از آزمایش عبور نوترون از نمونه‌های پلیمری

| نمونه | ضخامت (mm) | تکرار ۱ | تکرار ۲ | تکرار ۳ | میانگین | انحراف معیار | عبور (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BPAER | ۲۰٫۸۴ | ۱۰۸۹۷ | ۱۰۹۰۳ | ۱۰۷۱۹ | ۱۰۸۴۰ | ۸۵ | ۹۲٫۹۴ |
| | ۴۲٫۲۴ | ۱۰۴۹۸ | ۱۰۳۶۳ | ۱۰۴۳۱ | ۱۰۴۳۱ | ۵۵ | ۸۹٫۴۳ |
| | ۶۳٫۳۷ | ۹۷۰۲ | ۹۷۳۸ | ۹۸۰۷ | ۹۷۴۹ | ۴۴ | ۸۳٫۵۹ |
| | ۸۴٫۹۷ | ۹۴۶۳ | ۹۴۴۳ | ۹۳۳۱ | ۹۴۱۲ | ۵۸ | ۸۰٫۷۰ |
| نانوکامپوزیت BPAER-5%$B_4C$ | ۲۰٫۸۱ | ۱۰۲۸۰ | ۱۰۱۱۰ | ۱۰۰۴۸ | ۱۰۱۴۶ | ۹۸ | ۸۶٫۹۹ |
| | ۴۱٫۹۱ | ۹۵۸۸ | ۹۵۰۷ | ۹۴۴۳ | ۹۵۱۳ | ۵۹ | ۸۱٫۵۶ |
| | ۶۳٫۱۳ | ۸۸۹۷ | ۸۹۳۸ | ۸۸۷۹ | ۸۹۰۵ | ۲۵ | ۷۶٫۳۵ |
| | ۸۴٫۲۹ | ۸۲۷۶ | ۸۲۴۰ | ۸۱۶۶ | ۸۲۲۷ | ۴۶ | ۷۰٫۵۴ |
| نانوکامپوزیت BPAER-10%$B_4C$ | ۲۱٫۹۷ | ۹۷۳۲ | ۹۶۱۰ | ۹۶۵۰ | ۹۶۶۴ | ۵۱ | ۸۲٫۸۶ |
| | ۴۳٫۷۹ | ۹۰۷۶ | ۹۱۳۷ | ۹۰۴۵ | ۹۰۸۶ | ۳۸ | ۷۷٫۹۰ |
| | ۶۵٫۵۴ | ۸۲۹۳ | ۸۲۰۴ | ۸۱۹۹ | ۸۲۳۲ | ۴۳ | ۷۰٫۵۸ |
| | ۸۷٫۱۶ | ۷۵۹۲ | ۷۵۳۴ | ۷۶۰۸ | ۷۵۷۸ | ۳۲ | ۶۴٫۹۷ |
| میکروکامپوزیت BPAER-5%$B_4C$ | ۲۰٫۹۱ | ۱۰۲۵۳ | ۱۰۳۰۲ | ۱۰۳۸۷ | ۱۰۳۱۴ | ۵۵ | ۸۸٫۴۳ |
| | ۴۱٫۸۹ | ۹۸۶۱ | ۹۷۴۰ | ۹۸۰۴ | ۹۸۰۲ | ۴۹ | ۸۴٫۰۴ |
| | ۶۳٫۰۹ | ۹۴۶۸ | ۹۳۲۳ | ۹۴۱۵ | ۹۴۰۲ | ۶۰ | ۸۰٫۶۱ |
| | ۸۴٫۳۵ | ۸۵۸۸ | ۸۶۴۳ | ۸۵۰۵ | ۸۵۷۹ | ۵۷ | ۷۳٫۵۵ |
| میکروکامپوزیت BPAER-10%$B_4C$ | ۲۱٫۷۳ | ۹۷۳۳ | ۹۸۰۶ | ۹۶۶۳ | ۹۷۳۴ | ۵۸ | ۸۳٫۴۶ |
| | ۴۳٫۴۳ | ۹۲۷۳ | ۹۳۴۹ | ۹۲۲۰ | ۹۲۸۱ | ۵۳ | ۷۹٫۵۷ |
| | ۶۵٫۳۳ | ۸۷۹۵ | ۸۸۸۵ | ۸۷۴۸ | ۸۸۰۹ | ۵۷ | ۷۵٫۵۳ |
| | ۸۷٫۳ | ۷۹۰۶ | ۷۹۴۷ | ۷۸۸۸ | ۷۹۱۴ | ۱۸ | ۶۷٫۹۳ |

1. Self-Shielding




**شکل ۳.** عبور نسبی تابش نوترون برحسب ضخامت حفاظ BPAER-$B_4C$ (قدر مطلق شیب خط معرف سطح مقطع عبور نوترون است).

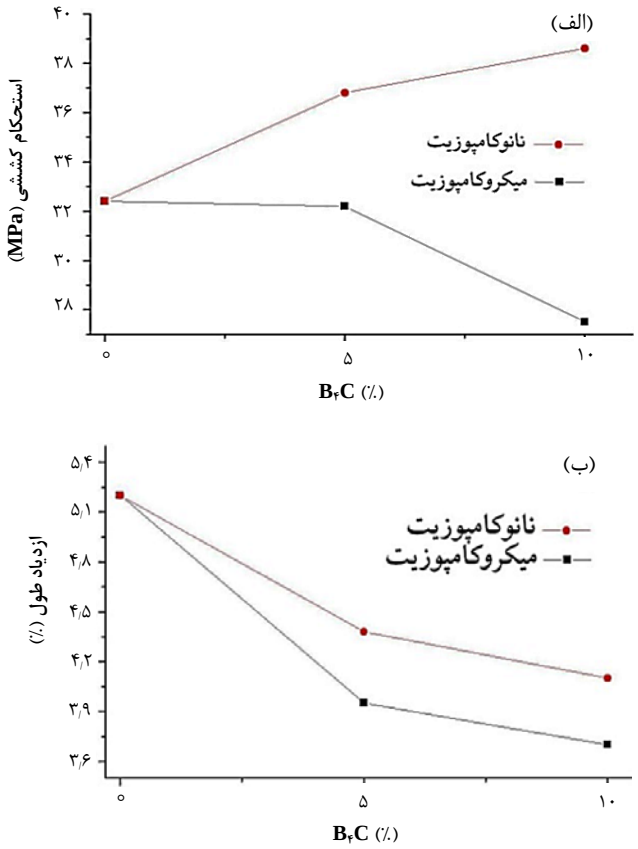
**۲.۳ ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت رزین اپوکسی بیسفنول آ-کاربید بور**

بررسی ویژگی‌های مکانیکی قطعات حفاظ در برابر تابش‌های هسته‌ای برای کمینه نمودن تخریب این ساختارها در هنگام استفاده بسیار مهم است. با توجه به این موضوع در این پژوهش استحکام کششی و درصد ازدیادطول این کامپوزیت‌ها بررسی شده است. با استفاده از منحنی‌های تنش - کرنش به دست آمده، مقادیر استحکام کششی و درصد ازدیادطول این کامپوزیت‌ها تعیین شده و این مقادیر در جدول ۴ آمده است.

نتایج این آزمون نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات کاربید بور به میزان ۵ و ۱۰٪ به BPAER، مقادیر مربوط به استحکام کششی نمونه‌ها به ترتیب به مقدار ۱۳٫۶ و ۱۹٫۱٪ افزایش و به‌طور هم‌زمان ازدیاد طول نمونه‌ها به‌ترتیب به مقدار ۱۵٫۸ و ۲۱٫۲٪ نسبت به BPAER کاهش می‌یابد (شکل ۴). از آن‌جایی‌که گران‌روی BPAER نسبتاً بالا است [۲۱] و از طرفی با افزودن نانوذرات کاربید بور به BPAER و توزیع مناسب آن‌ها در زمینه، یک شبکه به‌وسیله نانوذرات بین زنجیره‌های خطی پلیمری در ساختار BPAER ایجاد شده است در نتیجه مقدار استحکام نمونه افزایش می‌یابد [۲۲]. چنین رفتار افزایش استحکام و کاهش ازدیاد طول قبلاً در سامانه‌های نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن با وزن مولکولی بسیار زیاد تقویت‌شده با نانوذرات کاربیدبور- تنگستن [۲۳] و نانوکامپوزیت رزین اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات کاربیدبور [۲۴] گزارش شده است.

**جدول ۴.** نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش کامپوزیت BPAER-$B_4C$

| نمونه | استحکام (MPa) | ازدیاد طول (٪) |
|---|---|---|
| BPAER | ۳۲٫۴ | ۵٫۲۰ |
| نانوکامپوزیت BPAER-۵$B_4C$ | ۳۶٫۸ | ۴٫۳۸ |
| نانوکامپوزیت BPAER-۱۰$B_4C$ | ۳۸٫۶ | ۴٫۱۰ |
| میکروکامپوزیت BPAER-۵$B_4C$ | ۳۲٫۲ | ۳٫۹۵ |
| میکروکامپوزیت BPAER-۱۰$B_4C$ | ۲۷٫۵ | ۳٫۷ |
| [۲۴] | ۴۳ | ۹٫۷ |




**شکل ۴.** میانگین مقادیر الف) استحکام کششی و ب) درصد ازدیاد طول برحسب درصد کاربید بور در نانو و میکروکامپوزیت BPAER-$B_4C$.

از سوی دیگر با افزودن میکروذرات کاربید بور به مقادیر ۵ و ۱۰٪ وزنی در BPAER مقادیر مربوط به استحکام کششی نمونه‌ها به ترتیب به مقدار ۰٫۶ و ۱۵٫۱٪ و به طور هم‌زمان ازدیاد طول نمونه‌ها به ترتیب ۲۴ و ۳۴٫۶٪ نسبت به BPAER کاهش می‌یابد (شکل ۴). چنین رفتاری در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت‌شده با میکروذرات که منجر به کاهش هم‌زمان استحکام و ازدیاد طول می‌شود در سامانه‌های مشابه میکروکامپوزیت پلی‌پروپیلن تقویت‌شده با سولفات باریم [۲۵] و میکروکامپوزیت رزین اپوکسی تقویت‌شده با سیلیکا [۲۶] گزارش شده است. خواص مکانیکی کامپوزیت زمینه پلیمری

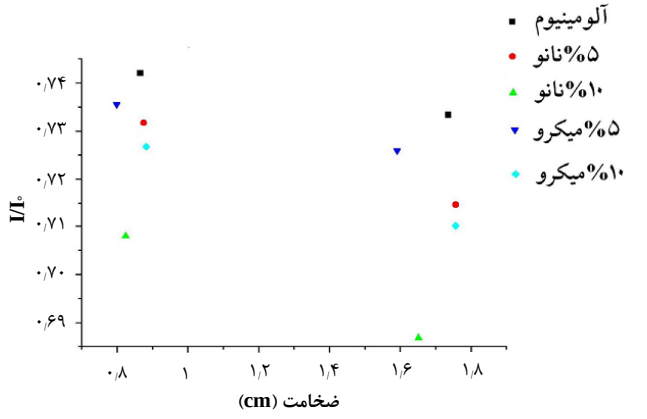
متأثر از چسبندگی فصل مشترک زمینه/ ذرات تقویت‌کننده و هم‌چنین درجه بلورینگی زمینه پلیمری است [۲۵]. ذرات کاربید بور در اندازه میکرومتری، مانند یک ناخالصی در زمینه پلیمری رفتار کرده و در نتیجه باعث افت چسبندگی فصل مشترک و هم‌چنین کاهش درجه بلورینگی پلیمر می‌شود و در نتیجه به طور هم‌زمان استحکام و ازدیاد طول کامپوزیت کاهش و تردی آن افزایش می‌یابد [۲۷]. در حالتی که اندازه ذرات کاربید بور، نانومتری است، این ذرات تأثیر منفی بر خواص مکانیکی با تأثیرگذاری بر عواملی مانند چسبندگی فصل مشترک و درجه بلورینگی زمینه پلیمری نخواهند داشت.

### ۳.۳ ویژگی‌های هسته‌ای کامپوزیت آلومینیم-کاربید بور

در این پژوهش به منظور بررسی مشخصه‌ی هسته‌ای قطعات کامپوزیت Al-$B_4C$ با مقادیر ۵ و ۱۰٪ وزنی کاربید بور به عنوان تقویت‌کننده، از آزمون میزان عبور تابش نوترون از قطعات حفاظ استفاده شده است. نتایج مربوط به آزمون مقدار عبور نوترون از قطعات نانو و میکروکامپوزیت Al-$B_4C$ در جدول ۵ و شکل ۵ آمده است.

**جدول ۵.** نتایج به‌دست آمده از آزمایش عبور نوترون از نمونه‌های فلزی

| نمونه | ضخامت (mm) | تکرار ۱ | تکرار ۲ | تکرار ۳ | میانگین | انحراف معیار | عبور (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| آلومینیوم | ۸٫۶۶ | ۸۶۸۶ | ۸۶۰۵ | ۸۶۷۲ | ۸۶۵۴ | ۲۰ | ۷۴٫۲۰ |
| | ۱۷٫۳۶ | ۸۵۵۵ | ۸۵۷۹ | ۸۵۲۵ | ۸۵۵۳ | ۱۳ | ۷۳٫۳۳ |
| نانوکامپوزیت Al-5%$B_4C$ | ۸٫۷۵ | ۸۴۶۳ | ۸۵۵۵ | ۸۵۸۳ | ۸۵۳۴ | ۲۶ | ۷۳٫۱۷ |
| | ۱۷٫۵۷ | ۸۳۸۱ | ۸۳۴۱ | ۸۲۸۳ | ۸۳۲۰ | ۳۵ | ۷۱٫۳۴ |
| نانوکامپوزیت Al-10%$B_4C$ | ۸٫۲۴ | ۸۲۵۳ | ۸۲۹۴ | ۸۲۲۲ | ۸۲۵۶ | ۱۷ | ۷۰٫۷۹ |
| | ۱۶٫۵۱ | ۷۹۷۷ | ۸۰۵۰ | ۸۰۰۲ | ۸۰۱۰ | ۱۷ | ۶۸٫۶۸ |
| میکروکامپوزیت Al-5%$B_4C$ | ۷٫۹۹ | ۸۵۵۲ | ۸۵۸۷ | ۸۵۹۶ | ۸۵۷۸ | ۱۱ | ۷۳٫۵۵ |
| | ۱۵٫۹۱ | ۸۴۴۹ | ۸۴۸۴ | ۸۴۳۸ | ۸۴۵۷ | ۱۱ | ۷۲٫۵۱ |
| میکروکامپوزیت Al-10%$B_4C$ | ۸٫۸۲ | ۸۴۵۱ | ۸۵۱۱ | ۸۴۶۶ | ۸۴۷۶ | ۱۵ | ۷۲٫۶۷ |
| | ۱۷٫۵۶ | ۸۲۵۹ | ۸۳۲۲ | ۸۲۶۵ | ۸۲۸۲ | ۱۶ | ۷۱٫۰۱ |




**شکل ۵.** عبور نسبی تابش نوترون برحسب ضخامت حفاظ Al-$B_4C$.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار $B_4C$، کاهش اندازه ذرات $B_4C$ از گستره‌ی میکرومتری به گستره‌ی نانومتری و افزایش ضخامت قطعات حفاظ، میزان عبور نوترون از قطعات حفاظ تهیه شده از کامپوزیت Al-$B_4C$ کاهش می‌یابد. تابش نوترون فرودی به هنگام عبور از درون کامپوزیت Al-$B_4C$ با اتم‌های آلومینیم که به‌عنوان زمینه‌ی کامپوزیت است برخورد کرده، مسیر حرکت پرتو تغییر می‌نماید. در اثر این برخورد مقداری از انرژی نوترون فرودی کاهش یافته و در نتیجه هنگام برخورد با ذرات کاربید بور که به‌عنوان تقویت‌کننده‌ی کامپوزیت می‌باشد، از آن‌جایی‌که سطوح مقطع جذب نوترون حرارتی برای Al و $^{10}B$ در $B_4C$ به ترتیب ۰٫۲۳ و ۳۸۳۷ بارن است [۲۸]، جذب می‌شوند. این رفتار پیش از این نیز در سامانه‌های مشابهی هم‌چون ۶۰۶۱Al-$B_4C$ [۶] و Al-٪۱۵$B_4C$+Gd [۲۹] گزارش شده است.

### ۴.۳ ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی کامپوزیت آلومینیم-کاربید بور

از نکات مهم و کلیدی در بحث طراحی قطعات مربوط به حفاظت در برابر تابش نوترون، افزایش همگنی این ساختارها می‌باشد. بنابراین یکی از پارامترهای مهم در فرایند تهیه این قطعات جلوگیری از ایجاد حفره در ساختار این قطعات است. با توجه به این موضوع، بررسی چگالی قطعات تهیه شده به عنوان حفاظ در برابر تابش نوترون، بخش مهمی را در پژوهش‌های انجام شده در شاخه‌ی حفاظت در برابر انواع تابش‌های هسته‌ای به خود اختصاص داده است [۳۰]. درصد حفره‌های موجود در قطعات آلومینیم خالص و کامپوزیت‌های آلومینیم تقویت‌شده به‌وسیله نانوذرات و میکروذرات کاربید بور بر اساس اختلاف بین مقادیر چگالی تجربی و چگالی نظری نمونه‌ها محاسبه شده و در جدول ۴ فهرست شده است.

مطابق داده‌های جدول ۶ چگالی نمونه‌ها با افزایش مقدار ذرات کاربید بور صرف‌نظر از اندازه ذرات کاهش می‌یابد. از آن‌جایی‌که مقدار ماده‌ی تقویت‌کننده و چگالی آن تأثیر قابل‌توجهی بر چگالی کامپوزیت‌ها دارد، بنابراین با توجه به این‌که چگالی ذرات $B_4C$ (۲٫۵۲ $g/cm^3$) از چگالی ذرات Al (۲٫۶۹ $g/cm^3$) کم‌تر است، بنابراین کاهش چگالی کامپوزیت با افزایش مقدار ذرات کاربید قابل پیش‌بینی است. کسر حجمی حفره‌ها نیز از اختلاف بین مقادیر تجربی و مقادیر نظری چگالی قابل استنتاج است. با افزایش مقدار ذرات کاربید بور از یک سو و افزایش اندازه آن‌ها از سوی دیگر چگالی و درصد حفره‌ها در کامپوزیت Al-$B_4C$ به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. این رفتار در سامانه‌های مشابه هم‌چون Al۲۰۲۴-$B_4C$ [۴] و Al۱۱۰۰-$B_4C$ [۳۱] گزارش شده است. شکل‌گیری مقداری حفره در حین فرایند تهیه کامپوزیت‌های زمینه فلزی به‌دلیل زمان هسته‌زایی ذرات و افزایش مساحت سطحی آن‌ها در تماس

با هوا بدیهی است. این سازوکار را می‌توان با رشد مساحت سطح نانوذرات کاربید بور به علت مقدار بیش‌تر حفره و سطح لایه‌ای گاز احاطه‌کننده نانوذرات که ناحیه کاملی برای هسته‌زایی حفره متجانس می‌باشد توصیف نمود [۳۱].

سختی قطعات کامپوزیت Al-$B_4C$ تهیه شده در این پژوهش به عنوان یکی از ویژگی‌های مکانیکی مهم در بحث حفاظت در برابر تابش نوترون مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر اندازه‌گیری شده و مقدار انحراف معیار میکروسختی آلومینیم خالص و نانو و میکروکامپوزیت Al-$B_4C$ در جدول ۷ فهرست شده‌اند. برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۵ و ۱۰٪ وزنی نانوذرات کاربیدبور، میانگین سختی نمونه‌ها به ترتیب ۱۰۳٫۶ و ۱۵۷٫۵ HV و برای نمونه‌های تقویت‌شده با ۵ و ۱۰٪ وزنی میکروذرات کاربیدبور، میانگین سختی نمونه‌ها به ترتیب ۹۲٫۱ و ۱۳۹٫۰ HV به‌دست آمده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر مربوط به سختی تمام نمونه‌ها بزرگ‌تر از سختی آلومینیم، ۶۱٫۷ HV می‌باشد. مقادیر سختی کامپوزیت Al-$B_4C$ همبستگی مثبتی با درصد وزنی نانوذرات و میکروذرات کاربیدبور دارند، زیرا ذرات $B_4C$ باعث استحکام‌بخشی به ماده می‌شوند. پژوهش‌های بسیاری بر تأثیر افزودن ذرات سرامیکی سخت هم‌چون $B_4C$ [۳۲]، $Al_2O_3$ [۳۳] و SiC [۳۴] در افزایش سختی کامپوزیت‌های زمینه آلومینیمی انجام شده است.

بر اساس این نتایج تقویت کامپوزیت زمینه آلومینیم با ذرات نانو منجر به پیدایش سختی بیش‌تری نسبت به همتای میکروذرات خود شده است. بر اساس مدل هال- پچ [۳۵] از آن‌جایی‌که مرزدانه‌ها توانایی ایجاد اختلال در حرکت نابه‌جایی‌ها را دارند بنابراین اندازه‌دانه‌ها به‌شدت بر سختی کامپوزیت‌ها تأثیرگذار هستند. به‌جز موردی که ذکر شد افزایش بیش‌تر سختی کامپوزیت تقویت شده با نانوذرات را می‌توان علاوه بر سختی بسیار زیاد $B_4C$ نسبت به Al، به تشکیل فصل مشترک خوب بین Al و $B_4C$ و توزیع همگن نانوذرات $B_4C$ در زمینه Al نسبت داد.

**جدول ۶.** چگالی تجربی و نظری کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با نانوذرات و میکروذرات کاربید بور

| نمونه | چگالی میانگین ($g/cm^3$) | انحراف معیار | چگالی نظری ($g/cm^3$) | درصد حفره |
|---|---|---|---|---|
| Al | ۲٫۶۳۴۶ | ۰٫۰۰۱۸ | ۲٫۷۰ | ۲٫۴۲ |
| نانوکامپوزیت Al-٪۵$B_4C$ | ۲٫۵۷۷۶ | ۰٫۰۱۳ | ۲٫۶۸ | ۳٫۸۲ |
| نانوکامپوزیت Al-٪۱۰$B_4C$ | ۲٫۴۹۴۹ | ۰٫۰۰۲۷ | ۲٫۶۷ | ۶٫۵۶ |
| میکروکامپوزیت Al-٪۵$B_4C$ | ۲٫۵۴۳۴ | ۰٫۰۰۱۳ | ۲٫۶۸ | ۵٫۱۰ |
| میکروکامپوزیت Al-٪۱۰$B_4C$ | ۲٫۴۷۵۰ | ۰٫۰۰۱۶ | ۲٫۶۷ | ۷٫۳۰ |
| Al۲۰۲۴-٪۱۰$B_4C$ [۴] | ۲٫۶۹۱ | | ۲٫۷۶۲ | ۲٫۵۷۱ |

**جدول ۷.** مقادیر سختی اندازه‌گیری شده کامپوزیت آلومینیم تقویت شده با نانوذرات و میکروذرات کاربید بور

| نمونه | سختی میانگین (HV) | انحراف معیار |
|---|---|---|
| Al | ۶۱٫۷ | ۰٫۸ |
| نانوکامپوزیت Al-٪۵$B_4C$ | ۱۰۳٫۶ | ۱٫۶ |
| نانوکامپوزیت Al-٪۱۰$B_4C$ | ۱۵۷٫۵ | ۱٫۲ |
| میکروکامپوزیت Al-٪۵$B_4C$ | ۹۲٫۱ | ۲٫۶ |
| میکروکامپوزیت Al-٪۱۰$B_4C$ | ۱۳۹٫۰ | ۳٫۲ |
| [۳۱] Al-٪۵$B_4C$ | ۹۳ | - |

## ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و هسته‌ای دو نوع کامپوزیت زمینه پلیمری و زمینه فلزی حاوی ذرات کاربید بور مورد بررسی تجربی قرار گرفت و نقش اندازه ذرات در مقیاس نانو و میکرو بر این خواص مقایسه گردید. به‌ترتیب از رزین اپوکسی و آلومینیم به‌عنوان زمینه کامپوزیت و درصد وزنی کاربید بور ۵ و ۱۰ درصد استفاده شد.

مشاهده شد که نمونه‌های پلیمری تقویت شده با نانوذرات $B_4C$ در مقایسه با کامپوزیت تقویت شده با میکروذرات میزان عبور نوترون کم‌تری را نشان می‌دهند. هم‌چنین آزمون کشش نقش مؤثر نانوذرات کاربید بور در بهبود ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت زمینه پلیمری در مقایسه با میکروذرات را نشان می‌دهد.

نانوکامپوزیت زمینه فلزی Al-$B_4C$ نیز در مقایسه با میکروکامپوزیت Al-$B_4C$ در واکنش به آزمون عبور تابش نوترون، مشخصه‌ی هسته‌ای بهتری را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری چگالی نمونه‌های فلزی نشان داد که صرف‌نظر از اندازه و مقدار افزودن ذرات کاربید، چگالی تمام نمونه‌های کامپوزیتی کم‌تر از آلومینیم است و این کاهش چگالی در نمونه‌های نانو کم‌تر است. هم‌چنین اندازه‌گیری سختی نمونه‌های کامپوزیت زمینه فلزی نشان داد با افزایش درصد فاز تقویت‌کننده سختی کامپوزیت به‌ویژه در نمونه‌های نانوکامپوزیت افزایش یافته است.

## مراجع


1. R. Zboray, et al., *Development of a fast neutron imaging system for investigating two-phase flows in nuclear thermal–hydraulic phenomena: A status report*, Nucl. Eng. Des., **273**, 10 (2014).
2. Y. Huang, et al., *A Sandwich type of neutron shielding composite filled with boron carbide reinforced by carbon fiber*, Chem. Eng. J., **220**, 143 (2013).
3. I. Topcu, et al., *Processing and mechanical properties of $B_4C$ reinforced Al matrix composites*, J. Alloys Compd., **482**, 516 (2009).
4. A. Canakci, F. Arslan, *Abrasive wear behaviour of $B_4C$ particle reinforced Al2024 MMCs*, Int. J. Adv. Manuf. Technol., **63 (5-8)**, 785 (2012).

5. S.K. Tiwari, et al., *Characterization of Mechanical Properties of Al-$B_4C$ Composite Fabricated by Stir Casting*, Int. J. Appl. Eng. Res., **14**, 139 (2019).
6. A. Sathishkumar, et al., *Investigation of mechanical properties on Al 6061-$B_4C$ composite by squeeze casting process technique*, Int. Res. J. Multidiscip. Techno, **1(1)**, 38 (2019).
7. G. Manohar, K.M. Pandey, S.R. Maity, *Effect of Sintering Mechanisms on Mechanical Properties of AA7075/$B_4C$ Composite Fabricated by Powder Metallurgy Techniques*, Ceram. Int., **47**, 15147 (2021).
8. W.S. Rubink, et al., *Spark plasma sintering of $B_4C$ and $B_4C$-$TiB_2$ composites: Deformation and failure mechanisms under quasistatic and dynamic loading*, J. Eur. Ceram. Soc., **41**, 3321 (2021).
9. M. Dutto, et al., *The effect of microwave heating on the microstructure and the mechanical properties of reaction bonded boron carbide*, Int. J. Appl. Ceram. Technol., **17**, 751 (2020).
10. R. Casati, M. Vedani, *Metal Matrix Composites Reinforced by NanoParticles—A Review*, Metals, **4**, 65 (2014).
11. T. Özdemir, et al., *Neutron shielding of EPDM rubber with boric acid: Mechanical, thermal properties and neutron absorption tests*, Prog. Nucl. Energy, **89**, 102 (2016).
12. J. Kim, J. Jun, M. Lee, *Particle Size-Dependent Pulverization of $B_4C$ and Generation of $B_4C$/STS Nanoparticles Used for Neutron absorbing Composites*, Nucl. Eng. Technol., **46(5)**, 675 (2014).
13. A.M. Sukegawa, et al., *Flexible heat resistant neutron shielding resin*, J. Nucl. Mater., **417**, 850 (2011).
14. K. Okuno, *Neutron shielding material based on colemanite and epoxy resin*, Radiat. Prot. Dosim., **115**, 258 (2005).
15. J.J. Park, et al., *Enhancement in the microstructure and neutron shielding efficiency of sandwich type of 6061Al-$B_4C$ composite material via hot isostatic pressing*, Nucl. Eng. Des., **282**, 1 (2015).
16. J. Kim, et al., *Enhancement of thermal neutron attenuation of nano-$B_4C$, -BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites*, J. Nucl. Mater., **453**, 48 (2014).
17. P. Zhang, et al., *The design, fabrication and properties of $B_4C$/Al neutron absorbers*, J. Nucl. Mater., **437**, 350 (2013).
18. R. Adeli, S.P. Shirmardi, S.J. Ahmadi, *Neutron irradiation tests on $B_4C$/epoxy composite for neutron shielding application and the parameter sassay*, Radiat. Phys. Chem., **127**, 140 (2016).
19. Z. Soltani, et al., *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**, 182 (2016).
20. Y. Huang, et al., *A Sandwich type of neutron shielding composite filled with boron carbide reinforced by carbon fiber*, Chem. Eng. J., **220**, 143 (2013).
21. B. Ellis, *In Chemistry and Technology of Epoxy Resins*, 1st ed. (Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1993).
22. J.W. Krumpfer, et al., *Make it nano-Keep it nano*, Nanotoday, **8(4)**, 417 (2013).
23. S.D. Kaloshkin, et al., *Radiation-protective polymer-matrix nanostructured composites*, J. Alloys Compd. 536S, S522 (2012).
24. J. Jun, et al., *Enhancement of dispersion and adhesion of $B_4C$ particles in epoxy resin using direct ultrasonic excitation*, J. Nucl. Mater., **416**, 293 (2011).
25. K. Wang, et al., *Mechanical properties and toughening mechanisms of polypropylene/barium sulfate composites*, Composites, Part A, **34**, 1199 (2003).
26. Sh. Fu, et al., *Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites*, Composites, Part B, **39**, 933 (2008).
27. Y. Nakamura, et al., *Effects of Particle Size on Mechanical and Impact Properties of Epoxy Resin Filled with Spherical Silica*, J. Appl. Polym. Sci., **45**, 1281 (1992).
28. P. Zhang, et al., *The design, fabrication and properties of B4C/Al neutron absorbers*, J. Nucl. Mater., **437**, 350 (2013).
29. Z.G. Xu, et al., *The design of a novel neutron shielding $B_4C$/Al composite containing Gd*, Mater. Des., **111**, 375 (2016).
30. E. Ghasali, et al., *Investigation on microstructural and mechanical properties of $B_4C$-aluminum matrix composites prepared by microwave sintering*, J. Mater. Res. Technol., **4(4)**, 411 (2015).
31. R.M. Mohanty, K. Balasubramanian, S.K. Seshadri, *Boron carbide- reinforced aluminum 1100 matrix composites: Fabrication and properties*, Mater. Sci. Eng., A, **498**, 42 (2008).
32. Y.K. Çelik, K. Seçilmiş, *Investigation of wear behaviours of Al matrix composites reinforced with different $B_4C$ rate produced by powder metallurgy method*, Adv. Powder Technol., **28(9)**, 2218 (2017).
33. S. Singh, R. Singh, *Effect of process parameters on microhardness of Al–$Al_2O_3$ composite prepared using an alternative reinforced pattern infused deposition modelling assisted investment casting*, Rob. Comput. Integr. Manuf., **37**, 162 (2016).
34. M. Montoya-Dávila, M.A. Pech-Canul, Pech-Canul, *Effect of bi- and trimodal size distribution on the superficial hardness of Al/SiCp composites prepared by pressureless infiltration*, Powder Technol., **176**, 2 (2007).
35. N.J. Petch, *The cleavage strength of polycrystals*, J. Iron. Steel Res. Int., **174**, 25 (1953).


**COPYRIGHTS**
©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

**استناد به این مقاله**
محمدجواد نصر اصفهانی، محسن اسدی اسدآباد، فریدون پیامی (۱۴۰۱)، بررسی تجربی ویژگی‌های ساختاری، مکانیکی و هسته‌ای کامپوزیت‌های جاذب نوترون حاوی بور، ۱۰۲، ۱-۸
**DOI**: 10.24200/nst.2022.1461 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1495.html