مقایسه عملکرد کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌اتیلن سنگین و نیتريد بور برای کاربرد در حفاظ‌سازی نوترونی

سید جواد احمدی^۱، زهرا رفیعی سرمزده^{۲*}، سید مرتضی زاهدی دیزجی^۳، سید حسن جعفری^۴، یاسر کاسه‌ساز^۵

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

۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۳۴۸۶، تهران- ایران

۳. پژوهشکده پلاسما و گداحت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

۴. دانشکده مهندسی شیمی، پردیس فنی، دانشگاه تهران، صندوق پستی ۱۱۱۵۵-۴۵۶۳، تهران- ایران

۵. پژوهشکده رآکتور، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران- ایران

*Email: zarafiei.s@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۷/۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۰/۲۷

چکیده

در این پژوهش، کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌اتیلن سنگین با استفاده از نیتريد بور شش گوش (hBN) و نانوصفحات نیتريد بور (BNNSs) در درصدهای وزنی مختلف به روش اختلاط مذاب ساخته شد. ریخت‌شناسی، ویژگی‌ها و عملکرد مکانیکی و حرارتی کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده نیتريد بور بررسی شد. همچنین عملکرد حفاظتی کامپوزیت‌های طراحی شده در برابر نوترون با استفاده از ستون گرمایی رآکتور تهران به روش فعال‌سازی پولک طلا مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج مربوط به پلی‌اتیلن سنگین خالص مقایسه شد. نانوکامپوزیت‌های حاوی BNNSs، مدول و استحکام کششی بزرگتر، پایداری حرارتی بیشتر و عملکرد حفاظ‌سازی بهتری را در مقابل نوترون در مقایسه با کامپوزیت‌های حاوی hBN نشان داده‌اند. افزودن ۰.۵٪ وزنی از جاذب hBN به بستر پلی‌اتیلن، عملکرد حفاظتی کامپوزیت را در مقایسه با پلی‌اتیلن سنگین خالص ۲۵٪ افزایش می‌دهد؛ در حالی‌که عملکرد حفاظ‌سازی نانوکامپوزیت در همین درصد وزنی، بیانگر افزایش ۴۳٪ در جذب نوترون‌های گرمایی است. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش می‌تواند مقدمه‌ای برای تولید حفاظ‌های نوترونی سبک، ارزان و کارآمد باشد که امید است در آینده‌ای نزدیک مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: نانوکامپوزیت، نیتريد بور، پلی‌اتیلن سنگین، حفاظ نوترونی، نانوساختار

Comparison of performance of composites and nanocomposites based on high-density polyethylene and boron nitride for neutron shielding

S.J. Ahmadi¹, Z. Rafiei-Sarmazdeh^{2*}, S.M. Zahedi-Dizaji³, S.H. Jafari⁴, Y. Kasesaz⁵

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran- Iran

2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-3486, Tehran- Iran

3. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14399-51113, Tehran-Iran

4. School of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, P.O.Box: 11155-4563, Tehran- Iran

5. Reactor research school, Nuclear Science and Technology Research Institute of Iran, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran- Iran

Research Article

Received 30.9.2020, Accepted 16.1.2021

Abstract

In the present study, high-density polyethylene (HDPE)/hexagonal boron nitride (hBN) and HDPE/Boron nitride nanosheets (BNNSs) nanocomposites with different contents were fabricated using the melt mixing method. The morphology, properties, and mechanical and thermal performance of composites and nanocomposites containing boron nitride were investigated. Also, the neutron shielding performance of the designed composites was investigated using the thermal column of the Tehran Research Reactor and foil activation method. The results were compared with those of using pure HDPE. HDPE/BNNSs nanocomposites have shown higher modulus and tensile strength, higher thermal stability, and better neutron shielding performance than HDPE/hBN. The results showed that by reaching hBN content to 0.5 wt. %, the neutron shielding of the composite was improved by 25% compared with the pure HDPE. However, there is a 43% increase in neutron absorption by nanocomposites compared with HDPE. The result of this work is expected to cause a natural synergy between applied nanocomposite and neutron shields and lead to the commercial production of Leigh-weight, inexpensive, and effective neutron-shield nanocomposites.

Keywords: Nanocomposite, Boron nitride, High density polyethylene, Neutron shielding, Nanostructure.

۱. مقدمه

تولید انرژی هسته‌ای در مقایسه با دیگر سیستم‌های مبتنی بر سوخت‌های فسیلی به‌عنوان یک فناوری پاک شناخته می‌شود. با این حال، نشت پرتوزایی از نیروگاه‌های هسته‌ای می‌تواند خسارات مالی، جانی و زیست‌محیطی به‌همراه داشته باشد. اخیراً پژوهش‌های متعددی روی مسایل ایمنی و محیط‌زیست پرتویی انجام شده است. تا به امروز، مواد محافظ‌تابش، ترکیبات پایه سیمان حاوی بتن و بتن سنگین، با سرب یا بدون سرب بوده‌اند. این ترکیبات سیمانی به‌طور عمده از طریق کندن نوترون‌ها و مسدود کردن مسیرهای آن‌ها از پرتوزایی‌های هسته‌ای محافظت می‌کنند. با این حال جرم زیاد این حفاظ‌ها و حجم بالای اشغال شده، جابه‌جایی و مشکلات همراه با ساخت، کاربرد این حفاظ‌ها را محدود می‌سازد. علاوه بر این مشکلات زیادی در هنگام تخریب این حفاظ‌ها به‌وجود می‌آید [۱].

برای غلبه بر این کاستی‌ها، استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت. حفاظ‌های پلیمری به‌دلیل داشتن محتوای هیدروژن مناسب نه تنها از عملکرد حفاظ‌سازی خوبی در برابر نوترون برخوردار هستند، بلکه علاوه بر سهولت در ساخت و بهره‌برداری، به‌هنگام برچیدن و یا ادغام چند حفاظ نیز کاربری آسانی دارند. چندین کامپوزیت پلیمر با جاذب‌های نوترون به‌عنوان مواد محافظ در برابر پرتوی نوترونی پیشنهاد شده است [۲، ۳]. از جمله پلیمرهای مورد استفاده در تهیه این کامپوزیت‌ها می‌توان به پلی‌استایرن^۱ [۴]، پلی‌اورتان^۲ [۵]، پلی‌آیلین^۳ [۶] و رزین‌های اپوکسی^۴ [۷-۹] اشاره نمود که در آن‌ها از نانولوله‌های نیتريد بور^۵ [۱۰، ۶، ۵]، اکسیدبور^۶ [۱۱]، میکروذرات نیتريد بور [۱، ۱۲-۱۴]، بورات لیتیم^۷ [۹] و ... استفاده شده است.

در سال‌های اخیر، استفاده از پلی‌الفین‌ها و به‌ویژه پلی‌اتیلن در دستور کار قرار گرفته است. پلی‌اتیلن از امتیازاتی هم‌چون قیمت پایین، در دسترس بودن، قابلیت درزگیری و مقاومت بالا در برابر مواد شیمیایی برخوردار است. امتیاز دیگر این ماده ماهیت آبگریزی آن است که امکان آلودگی سطحی را به کم‌ترین مقدار می‌رساند. پلی‌اتیلن سنگین^۸ (HDPE)، به‌عنوان یک پلیمر مهندسی گرما پلاستیک، به‌دلیل چگالی بالا،

ویژگی‌های مکانیکی مطلوب و سهولت در پردازش کاربردهای صنعتی زیادی دارد. با توجه به در نظر گرفتن محتوای هیدروژن بالا (۱۴٪ وزن پلی‌اتیلن)، ویژگی‌های مکانیکی مناسب و تخریب اندک این پلیمر در برابر تابش به‌دلیل ساختار خطی، پلی‌اتیلن سنگین گزینه بسیار مناسبی به‌عنوان محیط کندکننده برای ساخت حفاظ‌های پلیمری در برابر تابش‌های نوترونی است. پرتو نوترونی به‌دلیل خنثی بودن بار نوترون بسیار نفوذپذیر است و از این‌رو حفاظ‌سازی نوترونی به‌طور هم‌زمان نیازمند کاهش سرعت نوترون‌های پرتوزایی و جذب نوترون‌های کند شده توسط جاذب نوترون می‌باشد. بور یکی از چند عنصری است که ویژگی‌های هسته‌ای داشته و امروزه کاربرد زیادی در صنعت هسته‌ای یافته است. بور عنصری کمیاب است که به‌دلیل مسیر سخت تهیه و آماده سازی آن، مطالعات محدودی روی آن صورت گرفته است. این عنصر دارای دو ایزوتوپ ^{۱۱}B و ^{۱۰}B بوده که دارای سطح مقطع جذب نوترون گرمایی به‌ترتیب ۰/۰۰۵ و ۳۸۳۷ barn است. جذب نوترون توسط بور طبیعی که حاوی ۱۹٪ ^{۱۰}B است، در محدوده نوترون‌های گرمایی به اندازه کافی بالا (۷۵۲ barn) است و این ترکیب را گزینه مناسبی برای جذب نوترون گرمایی می‌سازد. با وجود آن که سطح مقطع جذب نوترون گرمایی توسط کادمیم بیش‌تر از بور است، با این حال بور گزینه بهتری برای حذف نوترون به‌شمار می‌رود. سطح مقطع جذب نوترون توسط ایزوتوپ ^{۱۱۳}Cd پنج برابر ^{۱۰}B است، اما ^{۱۱۳}Cd عنصری پرتوزا است، در حالی که هر دو ایزوتوپ بور غیرپرتوزا می‌باشند. محصولات واکنش بور و نوترون در واکنش (n, α) محصولات پایدار و غیرپرتوزا هستند. علاوه بر این، بور بعد از جذب نوترون، پرتو گامای ثانویه با انرژی ۰/۴۷۸ MeV تولید می‌کند که انرژی و قابلیت نفوذ کم‌تری در مقایسه با پرتو گامای ثانویه ناشی از جذب نوترون در کادمیم (۹ MeV) و سایر مواد جاذب دارد.

گزارش‌های مختلفی مبنی بر استفاده از کاربرد بور به عنوان جاذب نوترونی منتشر شده است اما استفاده از آن با مشکلات خاصی همراه است. به‌عنوان مثال این ترکیب در هنگام ساخت کامپوزیت و اختلاط مذاب دچار اکسیداسیون شده و ترکیب اکسید بور به‌عنوان ناخالصی به سیستم اضافه می‌شود که ویژگی‌های کامپوزیت را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر آن در هنگام اختلاط مذاب، ذرات کاربرد بور دچار درشت شدن حرارتی شده و ویژگی‌های پیش‌بینی شده

1. Polystyrene (PS)
2. Polyurethane (PU)
3. Polyaniline (PANI)
4. Epoxy Resin
5. Boron Nitride Nanotube (BNNT)
6. Boron Oxide
7. Lithium Borate
8. High Density Polyethylene (HDPE)

چندین کار پژوهشی در خصوص استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری بر پایه ترکیبات نیتريد بور به‌عنوان حفاظ نوترونی گزارش شده است. در این بین اما تاکنون گزارشی مبنی بر انجام یک پژوهش مقایسه‌ای برای بررسی عملکرد کامپوزیت‌های بر پایه پلی‌اتیلن سنگین/ نیتريد بور شش‌گوش و نانوکامپوزیت پلی‌اتیلن/نانوصفحات نیتريد بور وجود ندارد. نویسنده مقاله [۲۲] کار مقایسه‌ای را بین حفاظ‌های مبتنی بر پلی‌اتیلن با دو ترکیب نیتريد بور با اندازه متفاوت ($300 \mu\text{m}$ و 300 nm) گزارش کرده است که مقایسه بین میکرو و نانو در نظر گرفته نمی‌شود؛ زیرا براساس تعریف نانو و با توجه به تغییرات نسبت سطح به حجم تنها به موادی نانو گفته می‌شود که حداقل یکی از ابعاد آن کمتر از 100 nm باشند. در پژوهش‌های صورت گرفته [۲۱، ۱] نیز تنها از ترکیب hBN با اندازه میکرومتری در ساخت حفاظ پلی‌اتیلنی استفاده شده است.

از این‌رو این پژوهش با هدف تهیه حفاظ‌های کامپوزیتی جدید با ویژگی‌های بالای مکانیکی، حرارتی، ویژگی‌های حفاظ-سازی مناسب و مقرون به‌صرفه از نظر اقتصادی انجام شده است. در این پژوهش کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌اتیلن سنگین حاوی hBN و BNNSs با روش اختلاط مذاب ساخته و ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌ها و مقایسه شد. عملکرد این دو نوع کامپوزیت در برابر نوترون مورد بررسی قرار گرفت و نتایج با عملکرد پلی‌اتیلن سنگین مقایسه شد. به‌منظور طراحی یک حفاظ نوترونی کامپوزیتی بر پایه پلی‌اتیلن سنگین، اساس این کار بر حضور میکروصفحات hBN و نانوصفحات نیتريد بور به‌عنوان جاذب نوترونی قرار گرفته است.

۲. تجربی

۱.۲ مواد

hBN (ابعاد جانبی ۱ تا $5 \mu\text{m}$) از کمپانی آلدیچ خریداری و BNNSs با روش گزارش شده در [۲۳] سنتز شد (ابعاد جانبی $3 \mu\text{m}$ – 500 nm و ضخامت کمتر از 2 nm). پلی‌اتیلن سنگین مورد استفاده تولید پتروشیمی جم و با گرید HM 5010 T2N, EX3 است که با کد ساده EX3 شناخته می‌شود. سازگارکننده پلی‌اتیلن مالئیکه^۳ (HDMA) از شرکت کیمیا بسپار آسیا خریداری شده و مورد استفاده قرار گرفت.

را کاهش می‌دهد [۱۵]. نیتريد بور شش‌گوش^۱ (hBN) یک ماده همه‌کاره است که به‌دلیل دارا بودن ویژگی‌های منحصر به فرد، می‌توان از آن در زمینه‌های مختلفی استفاده نمود. ویژگی‌های فیزیکی نیتريد بور توسط ساختار اتمی آن تعیین می‌شود. این ترکیب با کربن ایزوالکتریک است و به‌دلیل مشابهت ساختاری با گرافیت، به‌عنوان «گرافیت سفید» و نانوصفحات نیتريد بور^۲ (BNNSs)، گرافن سفید نیز نامیده می‌شوند. شکل ۱ طرح‌واره‌ای از ساختار نیتريد بور شش‌گوش را نشان می‌دهد. نانوصفحات نیتريد بور یک فرم بلوری دوبعدی از نیتريد بور شش‌ضلعی است که دارای ضخامت یک تا چند لایه اتمی است.

ویژگی‌های هم‌چون قابلیت لغزش صفحات بر روی هم، ویژگی‌های ترشوندگی، ویژگی‌های مکانیکی فوق‌العاده، پایداری گرمایی بسیار بالا، مقاومت در برابر شوک‌های حرارتی، بی‌اثر بودن شیمیایی، سمیت پایین و ایمنی محیط‌زیست از ویژگی‌های مهم نیتريد بور است. وجود این ویژگی‌های همراه با سطح مقطع جذب بالای نوترون توسط بور در محدوده نوترون‌های گرمایی، نیتريد بور را ماده‌ای ایده‌آل برای استفاده در ساخت حفاظ‌های هسته‌ای به‌عنوان تقویت‌کننده و جاذب نوترون می‌سازد [۱۴، ۱۷–۲۱]. از سوی دیگر پلی‌اتیلن سنگین مستعد ترک‌خوردگی در نتیجه استرس است که با افزودن تقویت‌کننده نیتريد بور، افزایش مدول و استحکام کششی، این نقص تا حد زیادی مرتفع می‌شود. هم‌چنین حضور صفحات نیتريد بور، مقاومت این پلیمر را در برابر محیط‌های اکسیدکننده بالا می‌برد، علاوه بر این، حضور نیتريد بور در ساختار کامپوزیت منجر به کاهش انبساط حرارتی پلی‌اتیلن شده و کارایی این پلیمر را در دماهای بالا بهبود می‌بخشد.

شکل ۱. طرح‌واره ساختاری ترکیب نیتريد بور شش‌گوش [۱۶].

3. Maleic Anhydride-Grafted High Density Polyethylene (HDMA)

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 97, No 4, 2021, P 79-88

1. Hexagonal Boron Nitride (hBN)

2. Boron Nitride Nanosheets (BNNSs)

مجله علوم و فنون هسته‌ای

جلد ۹۷، شماره ۴، پاییز ۱۴۰۰، ص ۷۹–۸۸

$$sd = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi - \bar{x})^2}{N}} \quad (1)$$

که در آن xi مقدار پارامتر اندازه‌گیری شده برای هر نمونه، $\bar{x}$ مقدار میانگین مقادیر xi و N تعداد اندازه‌گیری‌ها است. آزمون توزین حرارتی به‌وسیله دستگاه STA 1500 TGA مدل Rheometric Scientific در محدوده حرارتی 25°C تا $^{\circ}\text{C}$ با سرعت گرمایش 10°C/min تحت گاز آرگون انجام پذیرفت.

انجام آنالیز نوترونی با بهره‌گیری از ستون گرمایی رآکتور تحقیقاتی تهران به‌عنوان منبع شار نوترون‌های گرمایی انجام شده و از روش فعال‌سازی پولک طلا برای اندازه‌گیری شار نوترونی استفاده شد. در پشت هر نمونه یک پولک طلا با جرم و مشخصات از قبل تعیین شده قرار داده شد. نمونه‌ها در کانال مرکزی اولین لایه ستون گرافیتی و در دهانه ورودی ستون گرمایی به مدت 90 min و توان 3 MW در دمای محیط پرتو دهی شدند. در شرایط آزمایش، نسبت کادمیومی $143/72$ ، شار نوترون‌های گرمایی $1.62 \times 10^7\text{ n.cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ و نسبت شار نوترون‌های گرمایی به شار کل در محل پرتو دهی $99/95$ اندازه‌گیری شده است. به‌منظور حذف بیشینه‌ای اثر انباشت، حذف نوترون‌های بازگشتی و جلوگیری از رسیدن این نوترون‌ها به پولک‌های طلا بدون عبور از نمونه، از یک موازی‌ساز کادمیم استفاده شده و نمونه‌ها همراه با پولک طلا در آن قرار داده شد. پولک‌ها پس از پرتو دهی و سرد شدن جهت شمارش به بخش فیزیک نوترون پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای منتقل شدند و فوتوپیک با استفاده از آشکارساز نیمه رسانای HPGe^6 با قدرت تفکیک بالا به مدت زمان Live time برابر 500 s توسط نرم افزار OMNIGAM مورد شمارش قرار گرفتند. آشکارساز توسط یک چشمه نقطه‌ای Eu-152 کالیبره شد و با استفاده از منحنی بازده آشکارساز، شمارش قله^۷ مدنظر به اکتیویته بر حسب بکرل تبدیل گردید. برای مقایسه اکتیویته پولک‌ها با یکدیگر، لازم است اکتیویته پولک‌ها به اکتیویته در زمان پایان پرتو دهی منتقل شوند. بدین‌منظور پس از مشخص کردن ناحیه ROI در طیف گاما و شمارش سطح زیر فوتوپیک، با استفاده از بازده نهایی آشکارساز در نهایت به اکتیویته پولک در زمان پایان پرتو دهی خواهیم رسید. شکل ۲ طیف گامای فعال‌سازی پولک استفاده شده و دو قله مربوط به فعال‌سازی نوترونی

۲.۲ ساخت کامپوزیت و نانوکامپوزیت حاوی جاذب نوترون

کامپوزیت‌های HDPE/hBN در محتوای ۰.۵، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی از hBN و نانوکامپوزیت‌های HDPE/BNNSs در ترکیب ۰.۵، ۱ و ۳ درصد وزنی از نانوصفحات به روش اختلاط مذاب ساخته شدند. با توجه به داده‌های به‌دست آمده از طریق آزمون‌های طیف‌سنجی فروسرخ^۱ (FTIR) و طیف سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس^۲ (XPS) [۲۳]، وجود گروه‌های هیدروکسیل روی سطح نانوصفحات و آبدوستی این صفحات، از ۱/۵٪ وزنی سازگارکننده برای اصلاح سطح در ساختار نانوکامپوزیت استفاده شد.

برای ساخت نمونه‌ها، دمای 180°C ، سرعت 60 rpm و زمان 10 min به‌عنوان شرایط فرآوری انتخاب شد. در ابتدا پلی‌اتیلن سنگین به مخلوط‌کن داخلی^۳ افزوده شده و بعد از گذشت 90 s و ثابت شدن گشتاور، تقویت‌کننده نیتريد بور به سیستم افزوده شده و به سیستم $8/5\text{ min}$ دیگر زمان داده شد تا اختلاط به‌طور کامل صورت پذیرد. در حضور سازگارکننده، پلی‌اتیلن سنگین و سازگارکننده با هم مخلوط شده و به مخلوط‌کن افزوده شدند.

۳.۲ دستگاه‌ها و روش‌های مورد استفاده

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیت از دستگاه مخلوط‌کن داخلی برابندر^۴ ساخت آلمان استفاده شد. نمونه‌های موردنیاز آزمون‌های کشش و بررسی خواص نوترونی، با استفاده از دستگاه پرس Laboratory Platen Press مدل P200P ساخت شرکت Dr. Collin کشور آلمان قالب‌گیری و ساخته شدند.

برای تعیین ساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۵ (SEM) Ziess مدل Evo18 ساخت آلمان استفاده شد. تصاویر در فشار 10^{-5} torr ، بیشینه ولتاژ دستگاه 30 kV و با استفاده از تفنگ الکترونی تنگستن ثبت شد. آزمون مکانیکی بر اساس استاندارد ASTM D638، با تعداد ۵ عدد نمونه دمبلی‌شکل جهت تعیین ویژگی‌های مکانیکی توسط دستگاه کشش چندکاره HIWA/Material Testing مدل Hiwa-200 ساخت ایران با سرعت 50 mm/min انجام گردید. مقدار انحراف استاندارد بر اساس رابطه زیر برای هر سری نمونه محاسبه و گزارش شد:

1. Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)
2. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS)
3. Internal Mixer
4. Brabender
5. Scanning Electron Microscope (SEM)

6. High Pure Germanium

7. ROI

شکل ۲. طیف گامای پولک طلای ساخته شده پس از پرتودهی.

شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی کامپوزیت بر پایه پلی اتیلن حاوی (الف) ۱٪، (ب) ۳٪، (ج) ۵٪ وزنی از hBN و نانوکامپوزیت حاوی (د) ۵٪، (و) ۱٪ و (ه) ۳٪ وزنی از BNNSs. مقیاس مشخص شده در عکسها ۲ μm است.

جدول ۱. نتایج تخریب حرارتی کامپوزیت‌های بر پایه پلی اتیلن در حضور تقویت‌کننده‌های hBN و BNNSs.

نوع جاذب	درصد جاذب (%/wt.)	دمای شروع تخریب (°C)	بیشینه دمای تخریب (°C)
پلی اتیلن سنگین	۰	۳۴۹	۴۷۳
کامپوزیت حاوی hBN	۱	۳۹۸	۴۶۹
نانوکامپوزیت حاوی BNNSs	۱	۴۰۱	۴۷۳

در محتوای وزنی ۱٪، دمای شروع تخریب برای نانوکامپوزیت حاوی BNNSs در مقایسه با کامپوزیت حاوی hBN افزایش بیشتری یافته است، به طوری که دمای آغاز

ایزوتوپ Au-197 در محدوده ۴۰۰ keV و ۶۸۰ keV را به خوبی نشان می‌دهد. قله ۴۰۰ keV به واسطه درصد احتمال واپاشی بسیار بالاتر (۹۹٪) و همچنین بیش‌تر بودن بازده آشکارساز در شمارش آن، مورد توجه بوده و در آشکارسازی به عنوان ROI در نظر گرفته می‌شود. شمارش این قله انرژی، معیاری از میزان فعال شدن پولک طلا و همچنین بیان‌گر شار نوترونی در محل پولک است.

۳. بحث و نتایج

۳.۱. بررسی ریخت‌شناسی

شکل ۲ ریخت‌شناسی و توزیع تقویت‌کننده‌های نیتريد بور را در ساختار کامپوزیت و نانوکامپوزیت ساخته شده در درصدهای وزنی مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳ (الف تا ج) مشخص است، توزیع صفحات hBN در بستر پلیمر همگون است اما با افزایش محتوای تقویت‌کننده از ۱ به ۳ و ۵٪ وزنی، کلوخه‌هایی از hBN، به‌ویژه در ۵٪ وزنی، در بستر پلیمری دیده می‌شود. با این حال صفحات گیر افتاده در سطح مشترک به‌طور همگن در فاز پلیمری پراکنده شدند که نشان‌دهنده چسبندگی مناسب بین پلی اتیلن و hBN است که از شباهت ماهیت آبریز سطح تقویت‌کننده با بستر پلی اتیلن ناشی می‌گردد.

شکل ۳ (د تا ه) پراکندگی تقویت‌کننده BNNSs در بستر پلی اتیلن را در محتوای ۰٫۵، ۱ و ۳٪ وزنی نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش محتوای وزنی BNNSs، این صفحات به‌خوبی در بستر پلی اتیلن پراکنده شده و پلی اتیلن توانسته صفحات را به خوبی از هم جدا کند. این امر به دلیل چسبندگی مناسب بین بستر و فاز پراکنده به‌علت حضور سازگارکننده به‌وجود می‌آید.

۳.۲. بررسی پایداری گرمایی

پایداری گرمایی در کامپوزیت‌های پلیمری نقش مهمی را در تعیین محدوده دمای کاری و شرایط دمایی سازه بازی می‌کند که به دمای تخریب کامپوزیت و سرعت تخریب آن مرتبط است. منحنی تخریب حرارتی کامپوزیت‌های حاوی نیتريد بور توده و نانوصفات نیتريد بور همانند منحنی پلی اتیلن خالص می‌باشد؛ اما در حضور تقویت‌کننده نیتريد بور تخریب حرارتی و بیشینه دمای تخریب در دمای بالاتر آغاز می‌شود. نتایج مربوط به آزمون پایداری گرمایی در جدول ۱ خلاصه شده است.

۵) خطا در اندازه‌گیری ابعاد آزمون، نشانه‌گذاری طول مبنا، طول مبنا اولیه اکستنسومتر، اندازه‌گیری نیرو و افزایش طول، دمای آزمون و سرعت بارگذاری در مراحل آزمون.

شکل ۴ روند تغییرات مدول و استحکام کششی را با تغییر محتوای hBN و BNNSs نشان می‌دهد. مدول یانگ که نشان‌دهنده سفتی ماده است، به‌طور مستقیم متناسب با محتوای BN بوده و افزایش محتوای تقویت‌کننده باعث افزایش مدول کامپوزیت‌ها نسبت به پلی‌اتیلن خالص می‌شود. افزودن صفحات با مدول بالا به پلی‌اتیلن سنگین سبب بهبود مدول کامپوزیت می‌گردد. مدول بالاتر نانوکامپوزیت به دلیل بالا بودن مدول BNNSs نسبت به hBN است که منجر به بهبود این ویژگی در نانوکامپوزیت‌ها می‌گردد. حضور این نانوصفات تحرک زنجیره‌های پلیمر تحت بارگذاری را محدود کرده و جهت‌گیری لایه‌های نیتريد بور و شاخه‌های پلیمر با توجه به جهت بارگذاری به اثر سفت شدن کمک می‌کند.

جدول ۲. میانگین و مقدار انحراف استاندارد ویژگی‌های مکانیکی کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های حاوی تقویت‌کننده hBN و BNNS.

درصد، نوع جاذب	مدول کششی (MPa)	استحکام کششی (MPa)	کرنش شکست (%)	انرژی شکست (MJ/m ²)
-	297.37 ±0.1	33.46 ±0.9	1.96665 ±4.07	2224.09 ±254.06
hBN, (0.5%)	300 ±0.2	30.46 ±0.8	985.75 ±15	2024.12 ±400
hBN, (1%)	313.05 ±0.6	29.70 ±0.8	930.33 ±21.97	17378.32 ±524.48
hBN, (3%)	345.89 ±0.8	23.75 ±1.32	766.21 ±51.02	12919.50 ±1080.63
BNNSs, (0.5%)	323.97 ±0.5	32.07 ±0.52	960.36 ±93.78	14052.88 ±2011.19
BNNSs, (1%)	327.02 ±0.3	31.30 ±0.76	942.1 ±24.17	21416.43 ±900.39
BNNSs, (3%)	350.97 ±0.6	27.64 ±1.01	905.87 ±20.45	14661.75 ±1823.5

تخریب پلی‌اتیلن از ۳۴۹ °C به ۴۰۱ °C رسیده و بیش از ۵۰ درجه افزایش را نشان می‌دهد، در حالی که در حضور hBN، تخریب در دمای ۳۹۸ °C شروع شده است.

بیشینه دمای تخریب پلی‌اتیلن در حضور hBN کاهش دو درجه‌ای را نشان می‌دهد، اما حضور BNNSs موجب کاهش بیشینه دمای تخریب نشده است. در آزمون آنالیز حرارتی، میزان خطای سیستماتیک را با انجام یک آزمایش بلنک^۱ به صفر می‌رسانند. در مورد خطای تصادفی در انجام این آزمون، به‌طور کلی درصد خطای ۰.۰۴٪ برای هر نمونه وجود دارد که مقدار بسیار پایینی است و از این‌رو تغییر یک درجه‌ای در دما نیز می‌تواند قابل تأمل باشد. این خطا می‌تواند به دلایل مختلفی مانند بی‌دقتی کاربر، کالیبره نبودن دستگاه و یا خطای ذاتی دستگاه وارد سیستم شود. بر مبنای این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که افزودن تقویت‌کننده‌های نیتريد بور باعث افزایش پایداری حرارتی پلی‌اتیلن سنگین می‌شود. این اثر می‌تواند به دلیل پایداری حرارتی بالای صفحات BN و همچنین اثر سدکنندگی این ترکیبات باشد که منجر به مقاومت کامپوزیت در برابر تخریب گرمایی می‌شود. با این حال حضور BNNSs پایداری گرمایی نانوکامپوزیت را به مقدار بیشتری نسبت به hBN در ساختار کامپوزیت افزایش می‌دهد که ناشی از پایداری گرمایی بالاتر نانوصفات و پراکندگی بهتر نانوصفات در بستر پلیمری است.

۳.۳ بررسی ویژگی‌های مکانیکی

برای بررسی تأثیر نوع تقویت‌کننده و ترکیب درصد بر ویژگی‌های مکانیکی، آزمون کشش بر روی نمونه‌های پلی‌اتیلن سنگین، کامپوزیت‌های حاوی hBN و نانوکامپوزیت‌های حاوی BNNSs انجام شد. جدول ۲ میانگین و عدم قطعیت استحکام کششی، مدول، کرنش شکست و انرژی موردنیاز برای شکست کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های حاوی نیتريد بور را در محتوای وزنی ۰.۵، ۱ و ۳٪ خلاصه کرده است. عدم قطعیت‌های اندازه‌گیری شده به‌طور عمده می‌توانند ناشی از دلایل زیر باشند: (۱) بعضی از درجه‌های ناهمگنی که حتی در مواد حاصل از یک ذوب دیده می‌شود، (۲) شکل هندسی آزمون^۲، روش آماده‌سازی، (۳) روش گرفتن آزمون توسط فک دستگاه کشش و هم-محوری نیروی اعمالی، دستگاه آزمون و سیستم‌های متعلقه اندازه‌گیری، (۴) سفتی، حرکت، کنترل، روش کار،

1. Blank Measurement
2. Sample

۴.۳ بررسی خواص نوترونی

هرگاه یک پولک در میدان نوترونی قرار گیرد، اکتیویته آن در پایان مدت پرتودهی از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$A = N\phi\sigma(1 - e^{-\lambda t}) \quad (2)$$

که در آن A تعداد واپاشی در واحد زمان (Bq)، N تعداد هسته‌های موجود در پولک، ϕ شار نوترون در میدان نوترونی ($\text{n/cm}^2\text{s}$)، σ سطح مقطع واکنش (cm^2)، t مدت زمان پرتودهی (s) و λ ثابت واپاشی (s^{-1}) است. شار پرتو نوترونی اولیه و شار نوترون بعد از عبور از حفاظ با استفاده از اکتیویته پولک طلا مرجع و پولک تعبیه شده در پشت هر نمونه کامپوزیتی محاسبه شده و نسبت شار (I/I_0) به دست می‌آید. کسر عبور نوترون، I/I_0 معیاری برای ارزیابی توانایی حفاظ سازی نوترون است.

هنگامی که پرتو نوترون‌های گرمایی با شدت I_0 به جاذب با ضخامت x برخورد می‌کند و شدت نوترون‌های عبوری اندازه گیری می‌شود (I)، می‌توان میزان جذب نوترون‌ها را توسط رابطه زیر محاسبه نمود:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (3)$$

که در آن x ضخامت حفاظ و μ ضریب تضعیف خطی حفاظ ساخته شده است.

نمونه‌های حاوی جاذب بور در چندین مرحله مجزا مورد پرتودهی قرار گرفتند؛ در هر مرحله یک پولک به عنوان شاهد انتخاب شده و به منظور تعیین شار مطلق نوترونی مورد پرتودهی قرار گرفت و اکتیویته دیگر پولک‌ها نسبت به پولک شاهد در آن مرحله از پرتودهی برازش شد. در نهایت با استفاده از رابطه‌های ۲ و ۳ نسبت شار برای هر نمونه گزارش شد. با تکرار آزمایش‌ها برای ۹ سری از نمونه‌ها، میزان انحراف استاندارد بر اساس رابطه ۱ برای آزمون نوترونی ± 0.03 برآورد شد. عدم قطعیت در آزمایش‌های شار نوترونی می‌تواند ناشی از خطا در طول تابش‌دهی در داده‌های پولک طلا (وزن و ترکیب)، خطا در شمارش گاما، جابجایی نمونه‌ها نسبت به آشکارساز و خطا در بازده آشکارساز باشد.

۴.۴ تأثیر غلظت بر قدرت حفاظ سازی

به منظور بررسی تأثیر افزایش غلظت جاذب نوترونی بر قدرت حفاظ سازی نوترونی، نمونه‌هایی از کامپوزیت و نانوکامپوزیت های تقویت شده با hBN و BNNSs در درصدهای وزنی مختلف تولید شدند. ضخامت همه نمونه‌ها ۷ mm انتخاب شد

شکل ۴. تغییرات مدول کششی در (الف) کامپوزیت‌های حاوی hBN، (ب) نانوکامپوزیت‌های حاوی BNNSs و استحکام کششی با افزایش (ج) محتوای hBN و (د) BNNSs در کامپوزیت‌های بر پایه پلی اتیلن سنگین.

با این حال استحکام کششی کامپوزیت‌ها با افزایش محتوای hBN کاهش می‌یابد، به نحوی که کاهش ۲۹٪ استحکام در محتوای ۳٪ وزنی مشاهده می‌شود. روند کاهش استحکام در نمونه‌های حاوی BNNSs نیز مشاهده می‌شود. در محتوای ۱٪ و ۳٪ وزنی از این نانوصفحات، کاهش ۶٪ و ۱۷٪ در استحکام وجود دارد. علت کاهش بیش‌تر استحکام در کامپوزیت‌ها را می‌توان در ضخامت و ابعاد بالاتر hBN جستجو نمود. این ذرات بزرگ به عنوان آغازگر ترک عمل کرده و موجب کاهش استحکام شده و باعث می‌شود شکست در تنش کم‌تری رخ می‌دهد.

با افزایش درصد وزنی hBN، کرنش شکست و در نتیجه چکش‌خواری کاهش می‌یابد. این کاهش بر این اساس می‌تواند توجیه شود که صفحات BN به عنوان آغازگر ترک یا افزایش دهنده تنش عمل کرده و موجب کاهش کرنش شکست با افزایش محتوای hBN می‌شود. از سوی دیگر حضور صفحات نیتريد بور از حرکت زنجیره‌های پلیمری ممانعت کرده و از این‌رو کرنش شکست با افزایش محتوای صفحات کاهش می‌یابد. اما روند تغییرات کرنش شکست برای نمونه‌های حاوی BNNSs شیب زیادی نداشته و به صورت ملایم کاهش می‌یابد. بیشینه کاهش برای این نمونه‌ها در ۳٪ وزنی رخ داده و معادل ۱۷٪ است.

انرژی مورد نیاز برای شکست کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های حاوی صفحات نیتريد بور از محاسبه سطح زیر نمودارهای تنش-کرنش به دست می‌آید. در حالی که انرژی مورد نیاز برای شکست پلی اتیلن سنگین 22240.90 MJ/m^3 است، با افزایش محتوای hBN میزان انرژی مورد نیاز برای شکست کاهش یافته و نمونه شکننده می‌شود. در حضور BNNSs، روند کاهشی تا ۵٪ وزنی از نانوصفحات ادامه داشته و با افزایش محتوای نانوصفحات به ۱٪ وزنی، انرژی مورد نیاز برای شکست افزایش یافته و به مقدار چقرمگی پلی اتیلن سنگین خالص نزدیک می‌گردد.

روند در مورد نانوکامپوزیت‌های حاوی BNNSs نیز دیده می‌شود. علت این امر احتمالاً به دلیل ضخامت کم حفاظ بوده که موجب می‌شود نوترون‌ها در طی برخوردهای متوالی با هسته‌ها، فرصت چندانی برای جذب توسط بور را نداشته باشد و احتمال خروج آن‌ها از کامپوزیت/نانوکامپوزیت افزایش یابد؛ از این‌رو تغییر درصد وزنی جاذب تأثیر زیادی بر قدرت حفاظ‌سازی در ضخامت‌های کم ندارد.

شکل ۵. تأثیر محتوای وزنی (الف) hBN و (ب) BNNSs بر میزان تضعیف باریکه نوترونی توسط حفاظ‌های کامپوزیتی بر پایه پلی‌اتیلن سنگین با ضخامت ۷ mm. تصویر الحاقی: مقایسه هم‌زمان تغییرات غلظت بر روند بازدهی حفاظ‌سازی کامپوزیت و نانوکامپوزیت.

شکل ۶. تأثیر ضخامت حفاظ بر قدرت حفاظ‌سازی نوترونی (الف) کامپوزیت‌های حاوی hBN و (ب) نانوکامپوزیت‌های BNNSs.

و در نهایت نسبت شار (I/I_0) مرتبط با هر نمونه کامپوزیتی نسبت به شار اولیه پرتو نوترونی محاسبه شد.

شکل ۵ نتایج این آنالیز را برای محتوای وزنی ۰/۵، ۱، ۳، ۵ و ۱۵٪ از hBN و غلظت ۰/۵، ۱ و ۳٪ وزنی از BNNSs نشان می‌دهد. نتایج آنالیز، نسبت شار عبوری ۰/۶۷ را برای پلی‌اتیلن سنگین نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، با افزایش محتوای بور به واسطه افزایش درصد وزنی جاذب نیتريد بور، I/I_0 کامپوزیت نیز کاهش می‌یابد. با وارد کردن ۱٪ وزنی از hBN میزان I/I_0 نسبت به پلی‌اتیلن خالص ۳۶٪ کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۵-الف، روند نزولی میزان I/I_0 در درصد‌های وزنی پایین از hBN، شیب بیش‌تری نسبت به درصد‌های بالا دارد، به‌طوری که با افزودن ۳٪ وزنی نیتريد بور توده، میزان کاهش I/I_0 نسبت به پلی‌اتیلن خالص ۵۷٪ است. این در حالی است که با افزودن ۱۵٪ وزنی نیتريد بور کاهش ۸۶٪ در نسبت شار دیده می‌شود. با افزودن BNNSs، روند کاهشی مشابه با کامپوزیت‌های حاوی hBN مشاهده می‌گردد. روند کاهشی تا محتوای ۰/۵٪ وزنی شدید است و با افزایش محتوای نانوصفحات I/I_0 با شیب ملایم‌تری کاهش می‌یابد. برای I/I_0 با افزودن ۰/۵، ۱ و ۳٪ وزنی به ترتیب کاهش ۴۳، ۴۶ و ۶۷٪ مشاهده می‌شود. علت این امر را می‌توان به میزان پراکنش صفحات نسبت داد. در درصد‌های پایین وزنی، میزان کلوخه شدن صفحات کم بوده، سطح بیش‌تری در معرض پرتو نوترونی قرار دارد و لذا امکان جذب نوترون‌های گرمایی بالا رفته و I/I_0 کاهش می‌یابد. با افزایش محتوای BNNSs و تمایل بالای این نانوصفحات به تجمع و کلوخه شدن، سطح برهم‌کنش نانوصفحات با نوترون کم‌تر شده و کاهش میزان I/I_0 با شیب کم‌تری صورت می‌گیرد.

۲.۴.۳ تأثیر ضخامت حفاظ بر قدرت حفاظ‌سازی

شکل ۶ تأثیر ضخامت بر تضعیف شار خروجی از حفاظ کامپوزیتی بر پایه پلی‌اتیلن سنگین با محتوای ۱ و ۳٪ وزنی از جاذب hBN و BNNSs با ضخامت متناظر ۲، ۷ و ۹ mm را نشان می‌دهد.

با افزایش ضخامت حفاظ، میزان شار خروجی از حفاظ کاهش می‌یابد. روند کاهش بین ضخامت‌های ۲ تا ۷ mm شدید بوده اما با افزایش ضخامت، روند کاهش شار با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد. همچنین روند تغییرات شار خروجی در درصد‌های وزنی بررسی شده برای کامپوزیت و نانوکامپوزیت مشابه است. نکته قابل توجه در بررسی این پارامتر آن است که در ضخامت پایین (۲ mm) رفتار حفاظ‌سازی کامپوزیت‌های تقویت شده با ۱ و ۳٪ وزنی از hBN تقریباً برابر است. همین

این نانوساختارها نسبت به hBN، منجر به بهبود عملکرد مکانیکی و حرارتی نانوکامپوزیت در مقایسه با کامپوزیت و پلی-اتیلن خالص می‌گردد. بررسی عملکرد حفاظسازی کامپوزیت-های طراحی شده نشان داد که حضور BNNSs در ساختار نانوکامپوزیت به‌ویژه در درصدهای وزنی پایین، که ذرات پخش بهتری دارند و احتمال کلوخه شدن آنها پایین است، منجر به افزایش جذب نوترون توسط نانوکامپوزیت در مقایسه با کامپوزیت می‌گردد. می‌توان مزایای استفاده از مواد با ابعاد نانو را در طراحی حفاظهای تابش‌های هسته‌ای به‌صورت زیر خلاصه کرد: در درصد وزنی مشخص، کاهش ابعاد جاذب به مقیاس نانو منجر به افزایش چشم‌گیر نسبت سطح به حجم در نانوصفحات شده که باعث افزایش سطح برهم‌کنش نانوصفحات در مقایسه با میکروصفحات می‌گردد. علاوه بر این، در محتوای وزنی مشابه، با کاهش ابعاد تقویت‌کننده، فضای بین ذرات در ساختار نانوکامپوزیت به‌طور مؤثرتری نسبت به میکروکامپوزیت‌ها پر می‌گردد که این امر منجر به بهبود عملکرد نانوکامپوزیت در تضعیف پرتو نوترونی خواهد شد. به شرط نمونه‌سازی صحیح و جداسازی مؤثر نانوصفحات جاذب در بستر پلیمری، بازدهی جذب نوترون در حفاظ افزایش می‌یابد، ضمن آن‌که سبب کاهش ضخامت و نهایتاً کاهش وزن حفاظ نیز خواهد شد. توزیع همگن ذرات جاذب نوترونی در محیط حفاظ، تأثیر به سزایی در قدرت حفاظ طراحی شده خواهد داشت. توزیع همگن ذرات جاذب نوترونی در محیط حفاظ، تأثیر به سزایی در قدرت حفاظ طراحی شده خواهد داشت.

شکل ۷. تأثیر نوع ذره جاذب بر قدرت حفاظسازی نوترونی کامپوزیت‌های با ضخامت ۷ mm (الف) کامپوزیت حاوی hBN و (ب) نانوکامپوزیت حاوی BNNS.

بررسی این آزمون برای نمونه پلی‌اتیلن خالص با ضخامت ۲ mm شار نسبی ۰/۹۷ را نشان داد. مشاهده می‌گردد که رفتار حفاظسازی نمونه حاوی ۱٪ وزنی hBN در همین ضخامت تفاوت کمی با پلی‌اتیلن خالص دارد. با این حال کامپوزیت حاوی BNNSs در همین درصد وزنی قدرت حفاظ سازی بیش‌تری نسبت به کامپوزیت حاوی hBN دارد که احتمالاً به نسبت سطح به حجم^۱ (S/V) نانوصفحات و میزان سطح جاذب در دسترس برای جذب پرتو نوترونی مرتبط است [۲۴].

۳.۴.۳ تأثیر نوع جاذب بر قدرت حفاظسازی

تأثیر نوع جاذب به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر بحث برانگیز بر قدرت حفاظسازی بررسی شد. شکل ۷ میزان تضعیف شار خروجی از حفاظ کامپوزیتی نمونه‌های حاوی hBN و BNNSs با ضخامت ۷ mm و محتوای ۱ و ۳٪ وزنی را نشان می‌دهد. استفاده از BNNSs به جای ساختار hBN در محتوای ۰/۵٪ وزنی، عملکرد حفاظسازی نانوکامپوزیت را نسبت به کامپوزیت بهبود داده و I/I_0 را از ۰/۶۷ به ۰/۳۸ کاهش می‌دهد که به معنای افزایش ضریب تضعیف نوترونی برای نانوکامپوزیت نسبت به کامپوزیت حاوی hBN است.

در توضیح این رفتار می‌توان این‌گونه استنباط کرد که هرچند سطح مقطع میکروسکوپی جذب نوترون توسط جاذب نوترون، یک ویژگی ذاتی هسته‌ای به‌شمار می‌آید که تابع شرایط شیمیایی و یا فیزیکی نیست، اما در نهایت آن‌چه که رفتار یک قطعه را تعیین خواهد کرد، سطح مقطع ماکروسکوپی آن ماده است؛ سطح مقطع ماکروسکوپی علاوه بر رابطه‌ای که با سطح مقطع میکروسکوپی دارد، با تعداد اتم‌های روی سطح ماده نیز رابطه مستقیم دارد. با افزایش محتوای بور، رفتار حفاظسازی کامپوزیت حاوی hBN و BNNSs به هم نزدیک می‌گردد. علت این رفتار را می‌توان در تجمع نانوصفحات و کاهش میزان سطح برخورد نوترون با جاذب جستجو نمود.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش کامپوزیت و نانوکامپوزیت‌های بر پایه پلی‌اتیلن سنگین حاوی hBN و BNNSs به روش اختلاط مذاب ساخته شد و ویژگی‌های حرارتی، مکانیکی و حفاظسازی آن‌ها در برابر نوترون‌های گرمایی در مقایسه با پلی‌اتیلن سنگین مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی نتایج نشان داد که حضور BNNSs در بستر پلی‌اتیلن سنگین، به‌دلیل ویژگی‌های مکانیکی و حرارتی بهتر

مراجع

1. C. Harrison et al., *Polyethylene/Boron Nitride Composites for Space Radiation Shielding*, *J. Appl. Polym. Sci.* **109**, 2529 (2008).
2. S.J. Park, J.G. Jang, and H.K. Lee, *Computational investigation of the neutron shielding and activation characteristics of borated concrete with polyethylene aggregate*, *J. Nucl. Mater.* **452**, 205 (2014).
3. M.H. Kharita, S. Yousef, and M. AlNassar, *Review on the addition of boron compounds to radiation shielding concrete*, *Prog. Nucl. Energy*, **53**(2), 207 (2011).
4. C. Zeitlin et al. *Measurements of materials shielding properties with 1 GeV/nuc ^{56}Fe* , *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, **252**, 308 (2006).
5. L. Li, Y. Chen, and Z.H. Stachurski, *Boron nitride nanotube reinforced polyurethane composites*, *Prog. Nat. Sci.: Mater. Int.* **23**(2), 170 (2013).
6. C. Zhi et al. *Characteristics of boron nitride nanotube-polyaniline composite*, *Angew. Chem. Int.* **44**, 7929 (2005).
7. J. Yu et al. *Interfacial modification of boron nitride nanoplatelets for epoxy composites with improved thermal properties*, *Polymer*, **53**(2), 471 (2012).
8. A.M. Sukegawa et al. *Flexible heat resistant neutron shielding resin*, *J. Nucl. Mater.* **417**, 850 (2011).
9. G. Eid et al. *Neutron shielding using Li_3BO_3 /Epoxy Composite*, *Researcher*, **3**, 85 (2011).
10. C. Zhi et al. *Boron nitride nanotubes/polystyrene composite*, *J. Mater. Res.* **21**(11), 2794 (2006).
11. Y. Mülazim, C. Kızılkaya, and M. Kahraman, *Thermal and neutron shielding properties of $10\text{B}_2\text{O}_3$ /polyimide hybrid material*, *Polym. Bull.* **67**(9), 1741 (2011).
12. C. Harrison et al. *Polyethylene/Boron Composites for Radiation Shielding Applications*, *AIP*, 969, 484 (2008).
13. J. Jung et al. *Preparations and thermal properties of micro- and nano-BN dispersed HDPE composites*, *Thermochim. Acta*, 499, 8 (2010).
14. Y.K. Shin et al. *Effect of BN filler on thermal properties of HDPE matrix composites*, *Ceram. Int.* **39**, S569 (2013).
15. J. Ahn et al. *Microstructural and Mechanical Properties of Boron Carbide Ceramics by Methanol Washed Powder*, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1224**, 1224 (2009).
16. Z. Rafiei-Sarmazdeh, S.M. Zahedi-Dizaji, and A.K. Kang, in: *Nanostructures*, Edited by S. Ameen, (IntechOpen, London, 2019), pp.1-15.
17. Y. Lin, and J.W. Connell, *Advances in 2D boron nitride nanostructures: nanosheets, nanoribbons, nanomeshes, and hybrids with graphene*, *Nanoscale*, **4**(22), 6908 (2012).
18. X. Wang et al. *Boron Nitride Nanosheets: novel Syntheses and Applications in polymeric Composites*, *J. Phys. Conf. Ser.* **471**, 012003 (2013).
19. D. Golberg et al. *Boron nitride nanotubes and nanosheets*, *ACS Nano*, **4**(6), 2979 (2010).
20. Q. Weng et al. *Functionalized hexagonal boron nitride nanomaterials: emerging properties and applications*, *Chem. Soc. Rev.* **45**, 3989 (2016).
21. J.W. Shin et al. *Polyethylene/boron-containing composites for radiation shielding*, *Thermochim. Acta*, **585**, 5 (2014).
22. J. Kim et al. *Enhancement of thermal neutron attenuation of nano- B_4C , -BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites*, *J. Nucl. Mater.* **453**(1), 48 (2014).
23. Z. Rafiei-Sarmazdeh et al. *Large-scale exfoliation of hexagonal boron nitride with combined fast quenching and liquid exfoliation strategies*, *J. Mater. Sci.* **51**, 3162 (2016).
24. E. Mansouri et al. *A review on neutron shielding performance of nano-composite materials*, *Int. J. Radiat. Res.* **18**(4), 611 (2020).

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

ابراهیم عابدی، حسین خلفی، سیدمحمد میروکیلی (۱۴۰۰)، تحلیل ایمنی پرتو دهی مجتمع سوخت آزمایشی HWRR در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران با استفاده از تجهیز آزمون مدار باز، ۹۷، ۷۹-۸۸

DOI: 10.24200/nst.2021.1299

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1299.html