

مقایسه تجربی سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی در ذرات با مقیاس نانو و میکرو

ایمان طهماسبی، کمال حداد* و رضا فقیهی

بخش مهندسی هسته‌ای، دانشکده مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، فارس، ایران.

*فارس، شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، بخش مهندسی هسته‌ای، کد پستی: ۷۱۹۳۶-۱۶۵۴۸

پست الکترونیکی: hadadk@shirazu.ac.ir

چکیده

سطح مقطع برخورد نوترون با مواد در موارد استفاده از نوترون برای انجام یک کار خاص مثلاً نوترون تراپی یا حتی در رآکتورهای هسته‌ای، از اهمیت بالایی برخوردار است. در محاسبات کدهای محاسباتی مثل MCNP، تنها از اطلاعات سطح مقطع برخورد نوترون با توده ماده که در کتابخانه کد محاسباتی وجود دارد استفاده می‌شود، در صورتی که موادی که دارای ذرات در مقیاس نانو هستند در مقابل توده مواد و یا مواد دارای ذرات در مقیاس میکرو از خواص بهتری برخوردارند و حتی می‌توانند در برخی موارد سطح مقطع برخورد نوترون متفاوتی از خود نشان دهند. در این پژوهش مقدار جذب نوترون حرارتی در کامپوزیت اپوکسی و میکرو ذره نیتريد بور (BN) و کامپوزیت اپوکسی و نانوذره نیتريد بور هگزاگونال (h-BN) با اندازه ذرات ۸۰ نانومتر و فاصله صفحات ۲۰ نانومتر مقایسه شده است. کامپوزیت‌ها از روش فرآوری محلول ساخته شده‌اند، بدین صورت که محلول اپوکسی با پودر ذرات میکرو و یا نانو با به کار بردن دستگاه آلتراسونیک مخلوط و در نهایت محلول در قالب ریخته‌گری شده است. دودسته نمونه از کامپوزیت‌های با ذرات نانو و میکرو با درصد وزنی متفاوت، ۵٪ و ۱۰٪ در نظر گرفته شده و ساخته شده است. همچنین برای آشکارسازی نوترون‌های حرارتی از آشکارساز BF3 استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده تفاوت سطح مقطع جذب نوترون حرارتی در کامپوزیت میکرو نیتريد بور و کامپوزیت نانو نیتريد بور هگزاگونال است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و داده‌های به دست آمده نشان‌دهنده بهبود یا افزایش جذب نوترون‌های حرارتی در کامپوزیت با ذرات نانو نیتريد بور هگزاگونال نسبت به کامپوزیت با ذرات میکرو نیتريد بور است.

کلیدواژه‌گان: نوترون تراپی، نانو کامپوزیت، میکرو کامپوزیت، سطح مقطع جذب نوترون، نوترون حرارتی، نیتريد بور.

۱. مقدمه

است، به بیانی منظور از مقیاس نانو ابعادی حدود ۱ nm تا

۱۰۰ nm است [۱]. اولین جرعه فناوری نانو در سال ۱۹۵۹

فناوری نانو علم دستکاری و باز چینی اتم‌ها برای ساخت

مواد، ابزارها و سیستم‌های مفید در مقیاس یک میلیارد متر

توسط ریچارد فاینمن زده شد، وی نظریه‌ای ارائه کرد که در آینده می‌توان مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دست‌کاری کرد و در سال ۱۹۴۷ کلمه فناوری نانو برای اولین بار توسط استاد دانشگاه توکیو بیان شد [۲].

دو شاخص مهم که نانو ذرات را از توده مواد تمیز می‌دهد و توجیه‌کننده بسیاری از خواص نانو ذرات می‌باشد، عبارت‌اند از:

۱- تأثیرات سطحی (نسبت سطح به حجم بالا)

۲- تأثیرات کوانتومی (به دلیل ورود اندازه ذره به قلمرو اثرات کوانتومی)

نانو ذرات دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند، یعنی تعداد اتم‌ها در سطح نانو ذرات، نسبت به توده مواد بیشتر است. نسبت سطح به حجم، برای یک ذره با قطر ۶۰ نانومتر تقریباً ۱۰۰۰ برابر بیشتر از نسبت سطح به حجم برای یک ذره با قطر ۶۰ میکرومتر می‌باشد. از این رو در سطح نانو خاصیت‌ها و رفتار ذره تغییراتی خواهد داشت که برای به کار بردن نانوذرات در هر زمینه‌ای، رفتار نانوذره را باید به خوبی بررسی کرد. از جمله این موارد برخورد نوترون با نانوذرات است که در سطح نانو سطح مقطع‌های برخورد نوترون با سطح مقطع‌های برخورد نوترونی در مقیاس‌های بالاتر تفاوت‌هایی خواهد داشت [۳].

توجه خواهد داشت. همچنین در کاربردهای پزشکی کاربرد نانو مواد گسترده شده و در کنار دیگر خصوصیات نانو ذرات، از جمله پخش‌شدگی مناسب در تومورها و غیره چون یکی از روش‌های درمان تومور با گیراندازی نوترون در تومور (توسط مواد تزریق‌شده در تومور) انجام می‌گیرد، برخورد نوترون با این نانو ذرات حائز اهمیت است و آگاهی از تفاوت بین سطح مقطع‌های برخورد میکرو ذرات و نانو ذرات به مطالعه تأثیر استفاده نانو ذرات کمک بسیاری خواهد کرد. به طوری که در شبیه‌سازی هایمونت کارلو داشتن داده‌های تجربی از سطح مقطع برخورد نوترون با نانو ذرات و یا تفاوت بین سطوح مقطع برخورد نوترون با نانو ذرات و میکرو ذرات به شبیه‌سازی‌های دقیق‌تر کمک شایانی خواهد کرد [۴، ۵].

در این پژوهش سعی شده تفاوت بین تضعیف نوترون‌های حرارتی در گذر از میان کامپوزیت ساخته شده از ترکیب اپوکسی با میکرو ذرات و کامپوزیت ساخته شده از ترکیب همان اپوکسی با نانو ذرات از جنس یکسان با میکرو ذرات مقایسه شود. از آنجایی که نانو ذرات در مواردی چون نابودی تومور سرطانی از روش گیراندازی نوترون حرارتی در تومور کاربرد بهتری دارند [۶]، این نکته حائز اهمیت خواهد بود که کاربرد نانو ذرات آیا به گیراندازی بیشتر نوترون‌های حرارتی کمک می‌کند یا خیر؟!

۱.۱. اهمیت سطح مقطع نوترون با نانو ذرات

نانو ذرات در بخش‌های مختلف صنعت و پزشکی کاربردهای زیادی پیدا کرده‌اند. در کنار کاربرد نانو مواد و خصوصیات بهبود یافته‌ها همچون بهبود انتقال حرارت، گاهی نیاز به توجه به جنبه‌های دیگر مسئله داریم، به طور مثال در راکتورهای هسته‌ای چون شار نوترون اهمیت فراوانی دارد در هنگام کاربرد نانو ذرات به طور مثال در سیستم خنک‌کننده یا کنترل راکتور سطح مقطع برخورد نوترون با مواد نانو نیاز به

۲. نانو کامپوزیت

نانو کامپوزیت، همان کامپوزیت است که یک یا چند جزء از آن، ابعاد کم‌تر از ۱۰۰ نانومتر دارد. نانو کامپوزیت‌ها از دو فاز تشکیل شده‌اند. فاز اولی که ساختار بلوری است که در واقع پایه یا ماتریس نانو کامپوزیت محسوب می‌شود و ممکن است از جنس پلیمر، فلز و یا سرامیک باشد. فاز دوم نیز ذراتی در مقیاس نانومتر هستند که به عنوان تقویت‌کننده و مواد پرکننده به منظور اهداف خاص از قبیل استحکام، مقاومت،

۱.۲.۲. مخلوط سازی مستقیم

در این روش ابتدا نانوذرات تهیه شده به صورت سوسپانسیون در یک حلال حل شده و سپس به محلول پلیمری اضافه می شود و مخلوط حاصله توسط یک پرس هیدرولیک در یک قالب اکستروژن می شود و در نهایت صفحات نازک به دست می آیند. در این روش انتخاب بستر پلیمری، انتخاب نوع ذرات و سازگاری این دو گونه با یکدیگر و نحوه توزیع ذرات از نکات حائز اهمیت است. معمولاً برای تولید نانو کامپوزیت های زمینه پلیمری حاوی نانو الیاف کربنی از این روش استفاده می شود. محدودیت این روش میزان فاز تقویت کننده یا همان مواد پرکننده است. به عنوان مثال برای تولید نانو کامپوزیت سیلیکا (پلی پروپیلن) حداکثر میزان نانو ذرات سیلیکا ۲۰ درصد وزنی می تواند باشد. البته به نظر می رسد آگلومره شدن (به هم چسبیدن) ذرات نیز از دیگر محدودیت های این روش باشد.

۲.۲.۲. فرآوری محلول

با استفاده از این روش می توان بر بعضی از محدودیت های روش مخلوط سازی مستقیم غلبه کرد، ضمن آنکه می توان میزان آگلومراسیون و کلوخه ای شدن نانو ذرات در ماده پلیمری را کاهش داد. در این روش به دو صورت می توان نانو کامپوزیت های پلیمری را تولید کرد. اگر ماده زمینه پلیمری و نانو ذرات تقویت کننده آن در یکدیگر قابل حل شدن باشند، محلول حاصل را می توان در یک قالب ریخته گری کرده و نانو کامپوزیت تولید نمود. در غیر این صورت مخلوط مواد نانو کامپوزیت در یک حلال حل شده و در نهایت با تبخیر حلال، نانو کامپوزیت مورد نظر به دست می آید.

هدایت الکتریکی، خواص مغناطیسی و ... در درون فاز اول (ماده پایه) توزیع می شوند. در بحث نانومواد، نانو کامپوزیت ها از جایگاه ویژه ای برخوردار هستند. حضور ذرات الیاف در ساختار نانو کامپوزیت ها معمولاً باعث ایجاد استحکام در ماده پایه می شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک ماده پایه توزیع شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به طور یکنواختی به ذرات یا الیاف منتقل می شود. با توزیع مواد پرکننده درون ماده پایه خصوصیات نظیر استحکام، سختی و تخلخل تغییر می کند. ماده پایه می تواند ذرات را به گونه ای از هم جدا نگه دارد که رشد ترک به تأخیر افتد. به علاوه اجزاء نانو کامپوزیت ها بر اثر برهمکنش سطحی بین ماده پایه و مواد پرکننده، از خواص بهتری برخوردار می شوند. نوع و میزان برهمکنش ها نقش مهمی در خواص مختلف نانو کامپوزیت ها همچون حلالیت، خواص نوری، خواص الکتریکی و مکانیکی آن ها دارد.

۱.۲. طبقه بندی نانو کامپوزیت ها

انواع نانو کامپوزیت را می توان بر اساس ماده پایه آن ها به شرح زیر طبقه بندی کرد:

۱. نانو کامپوزیت های پایه پلیمری

۲. نانو کامپوزیت های پایه سرامیکی

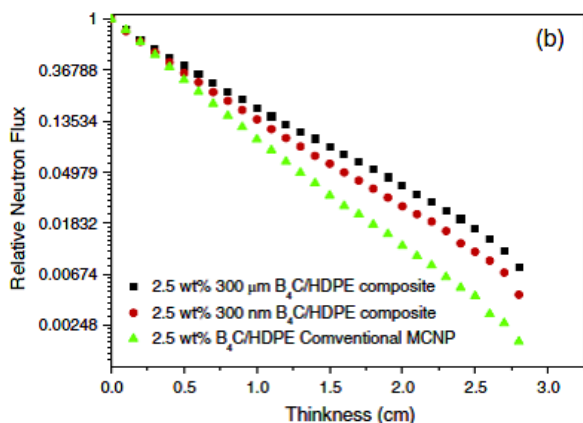
۳. نانو کامپوزیت های پایه فلزی

۲.۲. روش های تولید نانو کامپوزیت های زمینه پلیمری

به طور کلی چهار روش برای تولید نانو کامپوزیت های زمینه پلیمری وجود دارد؛ مخلوط سازی مستقیم، فرآوری محلول، پلیمریزاسیون درجا و تهیه پلیمر از مونومرها در حضور قالب هایی در مقیاس نانو [۷،۸،۹].

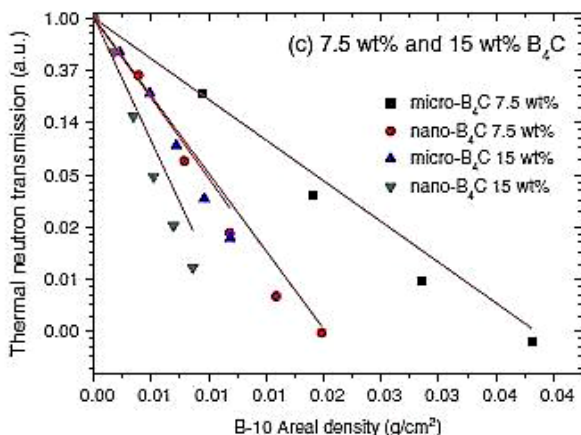
۳.۲.۲. پلیمریزاسیون درجا

در شکل ۱ جذب نوترون در ترکیب $B_4C/HDPE$ برای حالات $300\mu m$ و 300 nm ذرات B_4C و محاسبات معمول (همگن) با MCNP مقایسه شده است.



شکل (۱): مقایسه جذب نوترون حرارتی برای $300\mu m$ و 300 nm ذرات کاربرد بور و محاسبات معمول MCNP.

شکل ۲ عبور نوترون حرارتی را در درصد وزنی‌های متفاوت و در حالات استفاده از نانو ذرات و میکرو ذرات در ترکیبات $B_4C/HDPE$ نشان می‌دهد.



شکل (۲): مقایسه مقدار گذر نوترون‌های حرارتی از کامپوزیت‌های میکرو و نانو کاربرد بور با درصد وزنی‌های ۷/۵٪ و ۱۵٪.

در این روش پلیمریزاسیون بستر پلیمری در حضور نانو ذرات انجام می‌شود و مونومر در حین رشد، ذرات پرکننده را در برمی‌گیرد. نکته کلیدی در این روش نحوه توزیع نانو ذرات در مونومر است. با کنترل پیوند بین نانو ذرات و ماده زمینه، می‌توان توزیع موردنظر را به دست آورد. بسیاری از نانو کامپوزیت‌های زمینه پلیمری را می‌توان با این روش تولید کرد.

۴.۲.۲. تهیه پلیمر از مونومرها در حضور قالب‌هایی در مقیاس نانو

در این روش مونومرها را درون قالب‌هایی با مقیاس نانو ریخته و سپس فرآیند پلیمری شدن درون این قالب‌ها رخ می‌دهد. در نتیجه به علت محدود بودن فضا (در حد نانومتر) پلیمرهای ساخته‌شده در ابعاد نانو تشکیل می‌شوند.

۳. پژوهش انجام‌شده در مورد تضعیف نوترون توسط نانو ذرات

در تحقیقی که کیم و همکارانش [۱] انجام داده‌اند تفاوت تضعیف نوترون حرارتی را در نمونه‌های پلیمری که با نانوذره و میکرو ذرات بورون کاربرد B_4C ترکیب‌شده‌اند، بررسی شده است. برای انجام این آزمایش از پرتوی نوترونی با انرژی حدود 0.025 eV استفاده کردند که نتایج حاصل نشان داده است که در پلی‌اتیلن‌هایی که نانو ذرات با آن‌ها ترکیب‌شده در مقایسه با حالت ترکیب با میکرو ذرات تضعیف نوترون بسیار بیشتر شده‌است. و این نتایج با شبیه‌سازی مونت کارلو MCNP با مدل‌سازی ساختار شبکه‌ای مقایسه شده است.

قرار گرفتن محلول بوراکس شده است. دو سوراخ برای وارد کردن محلول به این قسمت نیز در یک‌طرف استوانه تعبیه شده است. طول این استوانه در حدود ۱۹ سانتیمتر است تا آشکارساز کاملاً احاطه شود و همچنین از قسمت جلوی استوانه کمی فاصله داشته باشد. بدین ترتیب یک حجم از ماده بوراکس در اطراف آشکارساز ایجاد شده که مانع از رسیدن نوترون‌های حرارتی حاصل از پراکندگی در محیط به آشکارساز می‌شود [۱۴، ۱۵].

۲.۴. داده‌برداری

نمونه‌ها به ترتیب برای اندازه‌گیری به دهانه کالیمتور چسبانده شده و برای آشکارسازی از آشکارساز BF3 استفاده شده است. آشکارساز از طرف دیگر داخل کالیمتور قرار داده و آماده اندازه‌گیری شده است. همچنین دوربین فیلم‌برداری طوری بر روی شمارنده تنظیم شده که از شمارنده در طول آزمایش فیلم‌برداری کند.

قبل از قرار دادن اولین نمونه در جلوی کالیمتور ابتدا مقدار شار نوترون‌های حرارتی حاصل از چشمه و عبوری از کند کننده و رسیده به آشکارساز حداقل به مدت ۵ دقیقه شمارش شده‌اند. سپس تمام نمونه‌ها به ترتیب برای شمارش و اندازه‌گیری مورد استفاده قرار گرفته و هر کدام به مدت حداقل ۵ دقیقه پرتو دهی شده و شمارش شمارنده در طول این مدت برای هر نمونه توسط دوربین ضبط شده است.

برای داشتن یک شار میانگین پرتو دهی به هر نمونه حداقل به مدت ۵ دقیقه انجام شده و پس از اتمام روند آزمایش با در نظر گرفتن بازه زمانی ۵ ثانیه‌ای در فیلم ضبط شده از شمارنده برای هر نمونه، داده‌های شمارنده برای هر نمونه تشکیل شده است. از میانگین این داده‌ها برای هر نمونه، یک داده مربوط به میانگین شار نوترون عبوری از نمونه به دست آمده است.

همچنان که از نتایج تحقیق کیم و همکارانش مشاهده می‌شود با افزایش چگالی مساحتی B-10 مقدار عبور نوترون کاهش می‌یابد و این کاهش برای نانو-سیستم در مقایسه با میکرو-سیستم بیشتر است.

۴. آزمایش‌ها

ساخت نمونه‌های حاوی ذرات میکرو نیتريد بور micro-BN و نمونه‌های حاوی ذرات نانو h-BN در آزمایشگاه مواد و به روش ترکیب پودرهای میکرو و یا نانو با پلیمر اپوکسی و سپس ریخته‌گری در قالب انجام شده است. برای تهیه نمونه‌ها از رزین اپوکسی و ذرات میکرو نیتريد بور با اندازه ۱۰۰ میکرومتر و نانو ذرات نیتريد بور هگزائگونال با اندازه ذرات ۸۰ نانومتر و فاصله صفحات ۲۰ نانومتر استفاده شده است. میکرو کامپوزیت و نانو کامپوزیت‌ها در دودسته با درصد وزنی ۵٪ و ۱۰٪ وزنی میرو ذره یا نانوذره و در سه ضخامت ۱/۰ میلی‌متر، ۰/۵ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر ساخته شده‌اند. برای تولید نوترون حرارتی از یک چشمه Pu-Be استفاده شده است. در مقابل این چشمه کند کننده از جنس پلکسی برای تبدیل نوترون‌های سریع به نوترون‌های حرارتی قرار گرفته شد [۱۱، ۱۲، ۱۳].

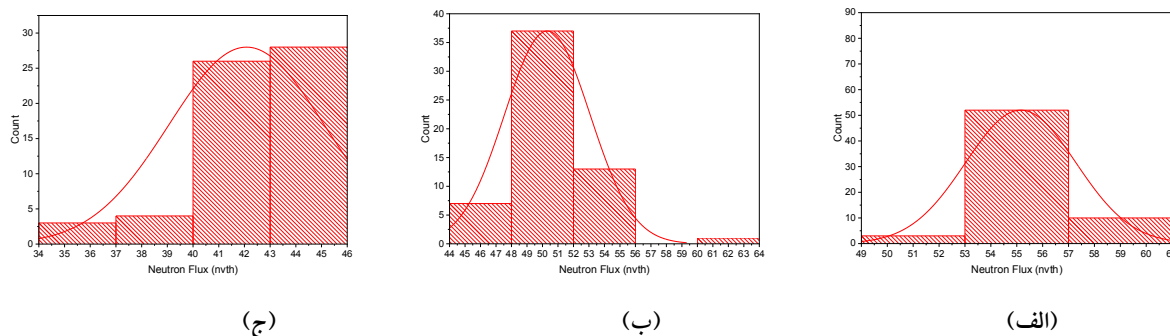
۱.۴. ساخت کالیمتور

برای کاهش نوترون‌های حرارتی پراکنده شده از محیط که به آشکارساز می‌رسند یک کالیمتور به شکل استوانه ساخته شده است. کالیمتور از دو استوانه هم‌مرکز ساخته شده است. استوانه کوچک مرکزی یک لوله به قطر ۳ سانتی‌متر است که محل قرار گرفتن آشکارساز است و این لوله توسط یک لوله دیگر به قطر ۲۵ سانتیمتر احاطه شده است. دو طرف این لوله‌ها با صفحات پلاستیکی طوری پوشانده شده که لوله مرکزی از دو طرف باز است و بین دو لوله، محفظه‌ای برای

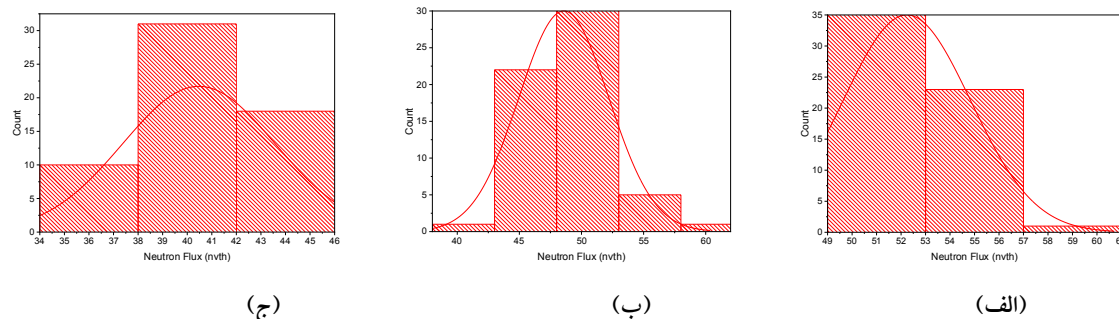
۵. نتایج

به‌دست‌آمده‌آمده است. شکل‌های ۳، ۴، ۵ و ۶ نمودار داده‌های ثبت‌شده از آشکارسازی پرتوهای گذر کرده از نمونه‌های میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور و نانو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور هگزآگونال را در درصد‌های وزنی ۵٪ و ۱۰٪ و ضخامت‌های ۰/۳ و ۰/۵ و ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

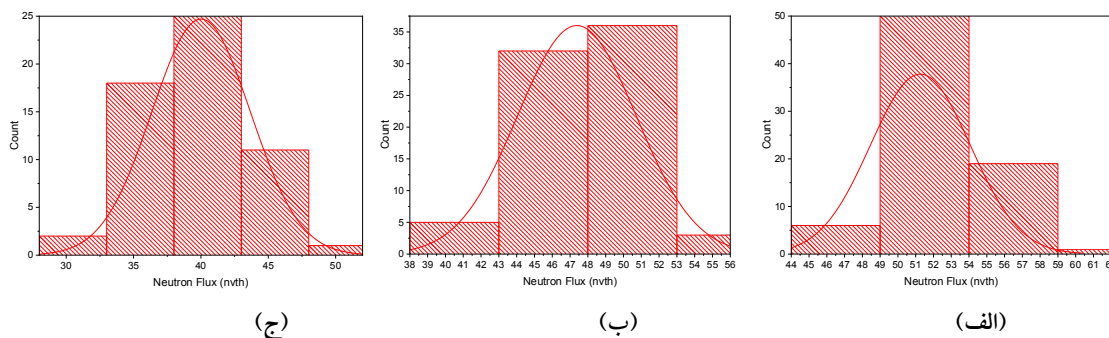
شار نوترون‌های حرارتی بعد از گذر از نمونه‌ی موردنظر به آشکارساز می‌رسند، به دلیل نوسانات شار نشان داده‌شده توسط شمارنده آشکارساز، با در نظر گرفتن بازه‌ی زمانی ۵ ثانیه‌ای در فیلم که در طول آشکارسازی در آزمایشگاه ضبط شده است، در هر بازه زمانی مقدار شار ثبت شده است. از این شارها میانگین گرفته‌شده و یک مقدار برای هر نمونه



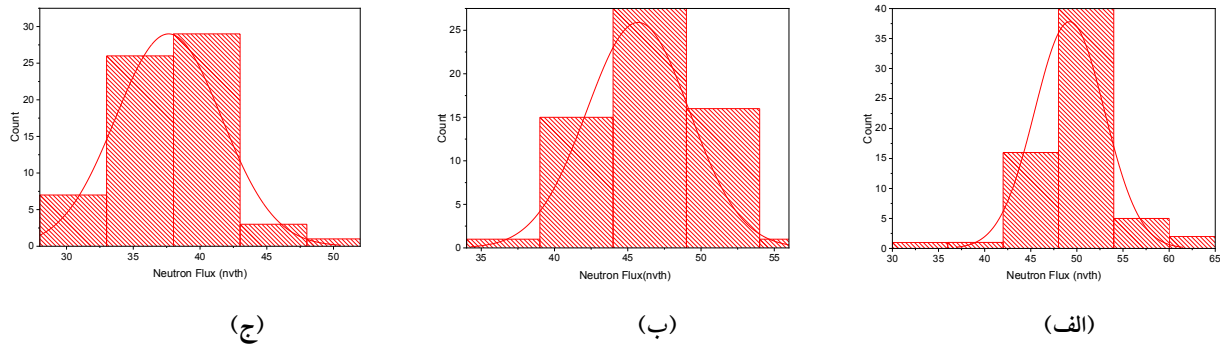
شکل (۳): نمودار هیستوگرام شار نوترون‌های حرارتی گذر کرده از نمونه میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور با درصد وزنی ۵٪ با ضخامت (الف) ۰/۳ میلی‌متر، (ب) ۰/۵ میلی‌متر، (ج) ۱ میلی‌متر.



شکل (۴): نمودار هیستوگرام شار نوترون‌های حرارتی گذر کرده از نمونه نانو کامپوزیت نیتريد بور هگزآگونال با درصد وزنی ۵٪ با ضخامت (الف) ۰/۳ میلی‌متر، (ب) ۰/۵ میلی‌متر، (ج) ۱ میلی‌متر.



شکل (۵): شار نوترون‌های حرارتی گذر کرده از نمونه میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور با درصد وزنی ۱۰٪ با ضخامت (الف) ۰/۳ میلی‌متر (ب) ۰/۵ میلی‌متر (ج) ۱ میلی‌متر.



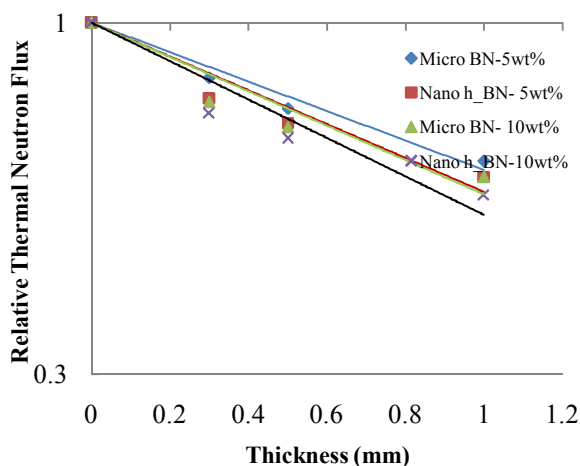
شکل (۶): نمودار هیستوگرام شار نوترون‌های حرارتی گذر کرده از نمونه نانو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور هگزاگونال با درصد وزنی ۱۰٪

با ضخامت (الف) ۰/۳ میلی‌متر، (ب) ۰/۵ میلی‌متر، (ج) ۱ میلی‌متر

جدول (۲): میانگین شار و انحراف معیار استاندارد نمونه‌های میکرو و

نانو با درصد وزنی ۱۰٪

انحراف معیار استاندارد (nvth)	میانگین شار عبوری (nvth)	نمونه کامپوزیت پلیمری با درصد وزنی ۱۰٪
2.8	51	نمونه میکرو با ضخامت ۰/۳mm
3.3	47	نمونه میکرو با ضخامت ۰/۵mm
3.6	40	نمونه میکرو با ضخامت ۱mm
3.7	49	نمونه نانو با ضخامت ۰/۳mm
3.5	45	نمونه نانو با ضخامت ۰/۵mm
3.7	37	نمونه نانو با ضخامت ۱mm



شکل (۷): مقایسه جذب نوترون حرارتی برای ذرات میکرو نیتريد بور

با اندازه ۱۰۰ میکرومتر و ذرات نانو نیتريد بور هگزاگونال با اندازه ۸۰

نانومتر و فاصله‌ی صفحات ۲۰ نانومتر در کامپوزیت‌های با درصد وزنی

۵٪ و ۱۰٪ و ضخامت متفاوت.

میانگین شار و انحراف معیار استاندارد برای هر یک از نمونه‌های میکرو و نانو کامپوزیت با درصد وزنی ۵٪ بر اساس داده‌های نمودارها در جدول ۱ و میانگین شار و انحراف معیار استاندارد برای هر یک از نمونه‌های میکرو و نانو کامپوزیت پلیمری با درصد وزنی ۱۰٪ بر اساس داده‌های نمودارها در جدول ۲ آورده شده‌اند.

در شکل ۷ شار نسبی برحسب ضخامت برای نمونه‌های نانو و میکرو و با درصد وزنی ۵٪ و ۱۰٪ با یکدیگر مقایسه شده است. محور عمودی نمودار شار نسبی و محور افقی ضخامت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول (۱): میانگین شار و انحراف معیار استاندارد نمونه‌های میکرو و

نانو با درصد وزنی ۵٪

انحراف معیار استاندارد (nvth)	میانگین شار عبوری (nvth)	نمونه کامپوزیت پلیمری با درصد وزنی ۵٪
2.1	56	نمونه میکرو با ضخامت ۰/۳mm
2.7	50	نمونه میکرو با ضخامت ۰/۵mm
3	42	نمونه میکرو با ضخامت ۱mm
2.6	52	نمونه نانو با ضخامت ۰/۳mm
3.6	48	نمونه نانو با ضخامت ۰/۵mm
3.1	40	نمونه نانو با ضخامت ۱mm

با درصد وزنی ۱۰٪ را نشان داده است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش داده‌ها مربوط به نمونه‌های ساخته‌شده با ضخامت‌های زیر ۱ میلی‌متر بوده که در پژوهش پیشین انجام‌شده توسط کیم و همکارانش داده‌های مربوط به این ضخامت‌ها به‌وضوح نشان داده نشده است. این پژوهش نشان داده که تضعیف نوترون‌های حرارتی گذر کرده از نانو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور هگزاگونال به‌مراتب از تضعیف نوترون حرارتی در میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور دربه‌مراتب از تضعیف نوترون حرارتی در میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور در شرایط ضخامت و درصد وزنی یکسان بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده بهبود عملکرد نانو کامپوزیت در تضعیف پرتو نوترون‌های حرارتی یا جذب نوترون‌های حرارتی در مقابل میکرو کامپوزیت است. دلیل این بهبود می‌تواند بهبود پخش ذرات نانو در بستر اپوکسی نسبت به ذرات میکرو باشد یا به ذات ذرات نانو در برخورد با نوترون مربوط باشد. همچنین نشان داده شد که مقدار تضعیف پرتو نوترون گذر کرده از نمونه نانو کامپوزیت نیتريد بور هگزاگونال با میکرو کامپوزیت نیتريد بور با ضخامت یکسان و درصد وزنی دو برابر نزدیک به هم است و شاید بتوان گفت برابری می‌کند.

با توجه به شکل ۷ با زیاد شدن ضخامت نمونه هدف شار نوترون حرارتی عبور کرده کاهش می‌یابد، این نتیجه از قبل مورد انتظار بود. همچنین نمونه کامپوزیت پلیمری ساخته‌شده با ذرات نانو نیتريد بور هگزاگونال در مقایسه با نمونه‌ی ساخته‌شده با ذرات میکرو با اندازه ذرات ۱۰۰ میکرون با ضخامت یکسان و درصد وزنی برابر، جاذب بهتری برای نوترون‌های حرارتی هستند و شار گذر کرده از این نمونه‌ها کمتر است؛ یعنی به عبارتی سطح مقطع جذب نوترون حرارتی نانو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور هگزاگونال در شرایط ضخامت و درصد وزنی یکسان، بیشتر از سطح مقطع جذب نوترون حرارتی میکرو کامپوزیت پلیمری نیتريد بور است.

همین‌طور با توجه به شیب نمودار مربوط به نمونه‌های نانو با درصد وزنی ۵٪ و نمودار مربوط به نمونه‌های میکرو با درصد وزنی ۱۰٪، می‌توان نتیجه گرفت که سطح مقطع جذب نوترون حرارتی برای یک ضخامت یکسان در نانو کامپوزیت پلیمری با ذرات نانو نیتريد بور هگزاگونال با درصد وزنی ۵٪ از سطح مقطع جذب نوترون حرارتی میکرو کامپوزیت پلیمری با ذرات میکرو نیتريد بور با درصد وزنی دو برابر یعنی ۱۰٪ تقریباً برابری می‌کند.

به‌طور مثال در ضخامت ۰/۵ میلی‌متر نمونه نانو کامپوزیت نیتريد بور هگزاگونال با درصد وزنی ۵٪ تضعیف نوترونی نزدیک به نمونه میکرو کامپوزیت نیتريد بور

۷. مراجع

- [1] C. Buzea, I.I. Pacheco, K. Robbie. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases* 2. (2007).MR17–MR71.
- [2] ASTM E 2456 - 06 Standard Terminology Relating to Nanotechnology.
- [3] G. Schmid, (Ed.). *Nanoparticles: from theory to application*. John Wiley & Sons. (2011).
- [4] K. Hadad, A. Hajizadeh, K. Jafarpour, B.D. Ganapol. Neutronic study of nanofluids application to VVER-1000 *Annals of Nuclear Energy*. 37 (2010) 1447–1455.
- [5] K. Hadad, K., A. Rahimian, MR. Nematollahi. Numerical study of single and two-phase models of water/Al₂O₃ nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*. 60 (2013) 287–294.
- [6] I. Porras. Sulfur-33 nanoparticles: A Monte Carlo study of their potential as neutron capture for enhancing boron neutron capture therapy of cancer. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(12) (2011). 1838–1841.
- [7] J. Gou, J. Zhuge, F. Liang. Processing of polymer nanocomposites. In *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)* (2012) 95–119.
- [8] G. Bystrzejewska-Piotrowska, G. Jerzy, P.L. Urban. Nanoparticles: their potential toxicity, waste and environmental management. *Waste management* 29, no. 9 (2009) 2587–2595.
- [9] Masuda Y., *NanocrystalInTech*. (2011) 56–58.
- [10] J. Kim, B.C. Lee, Y.R. Uhm, W.H. Miller. Enhancement of thermal neutron attenuation of nano-B₄C-BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites. *Journal of Nuclear Materials*. 453(1) (2014) 48–53.
- [11] K.C.Hwang, P.D. Lai, C.S. Chiang, P.J. Wang, C.J. Yuan. Neutron capture nuclei-containing carbon nanoparticles for destruction of cancer cells. *Biomaterials*. 31(32) (2010) 8419–8425.
- [12] H. Ichikawa, T. Uneme, T. Andoh, Y. Arita, T. Fujimoto, M. Suzuki, Y. Fukumori. Gadolinium-loaded chitosan nanoparticles for neutron-capture therapy: Influence of micrometric properties of the nanoparticles on tumor-killing effect. *Applied Radiation and Isotopes*. 88 (2014) 109–113.
- [13] E. Matemáticas. Low energy neutrons from a ²³⁹PuBe isotopic neutron source inserted in moderating media. *Revista Mexicana de fisica*. 48(5) (2002) 405–412.
- [14] P. Rinard. Neutron Interactions with Matter. Federation of American Scientists. Web. 9May (2013).
- [15] G.F. Knoll. *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons. (2010).