

امکان سنجی و بررسی تولید نمونه $^{32}\text{C-SiC}$ به عنوان حس گر بلوری پیشینه دما

مصطفی حسن زاده*، محمدمین امیرخانی دهکردی، روح اله عادل و محمدرضا کاردان

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، تهران، ایران.

*تهران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته ای، کدپستی ۱۴۳۹۵۸۳۶.

پست الکترونیکی: mhasanzadeh@aeoi.org.ir

چکیده

یکی از روش‌هایی که به منظور طراحی و بهینه‌سازی موتورهای توربین‌های با بازده بالا در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته، استفاده از حس‌گرهای بلوری پیشینه دما است. این حس‌گرها معمولاً در ابعاد بسیار کوچک و از موادی مانند $^{32}\text{C-SiC}$ ، الماس، گرافیت و غیره ساخته می‌شوند و می‌توانند در محل مورد نظر در داخل توربین یا موتور قرار گیرند و دمای پیشینه ایجاد شده را اندازه‌گیری نمایند. با توجه به ابعاد کوچک این حس‌گرها و دقت بسیار بالای اندازه‌گیری، می‌توان توزیع مکانی بسیار دقیقی از دمای ایجاد شده به دست آورد. برای تولید این حس‌گرها جریان بسیار بالای نوترون‌های سریع مورد نیاز است. در این مقاله، ابتدا قلب فشرده شماره ۱۸ راکتور تحقیقاتی تهران شبیه‌سازی شد. سپس شار پیشینه نوترون سریع برای نمونه $^{32}\text{C-SiC}$ محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کانال F4 بیشترین شار نوترون سریع را برای این منظور در اختیار قرار خواهد داد. همچنین محاسبات پرتوزایی با استفاده از کد ORIGEN و نرخ دز از طریق کد MCNP6 انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار پرتوزایی نمونه بعد از ۴ ماه حدود ۶۵٪ کاهش می‌یابد و در این راستا، مقدار نرخ دز کل نیز به مقدار کمتر از معیار ۱۰ میکروسیورت^۱ بر ساعت می‌رسد. در ادامه، نمونه $^{32}\text{C-SiC}$ در قدرت ۵ MW در راکتور تحقیقاتی تهران تابش داده شد. سپس اندازه دانه و مقدار کرنش قبل و بعد از تابش دهی محاسبه شد. در نهایت با توجه به نتایج این مقاله، می‌توان گفت که نمونه $^{32}\text{C-SiC}$ به عنوان یک حس‌گر بلوری پیشینه دما مناسب خواهد بود.

کلیدواژه‌گان: حس‌گر پیشینه دما، $^{32}\text{C-SiC}$ ، کد MCNP6، شار، ساختار شبکه، نرخ دز و پرتوزایی.

۱. مقدمه

ساخت و طراحی موتورهای توربین‌ها با بازده بالا، به گونه‌ای که بتوانند حرارت بیشتری را تحمل نمایند، از چالش‌های مهم صنایع خودروسازی، توربین‌سازی و صنایع فضایی است. بازده موتورهای، با افزایش دمای کاری آن‌ها افزایش می‌یابد اما این افزایش با ویژگی‌های مواد به کار رفته محدود می‌شود. به عبارت دیگر برای داشتن کارایی بیشتر باید دمای کار موتور افزایش یابد

^۱ این معیار نرخ دز، بر اساس تعریف آژانس بین‌المللی اتمی که مقدار ۲۰ میلی‌سیورت در سال می‌باشد، در نظر گرفته شده است. البته با توجه به مقدار ۸ ساعت کاری در روز که معادل ۴۰ ساعت در هفته و به ازای ۵۰ هفته کاری در سال، مقدار ۲۰۰۰ ساعت کاری به دست می‌آید. بنابراین تقسیم این دو عدد، مقدار نرخ دز ۱۰ میکروسیورت بر ساعت به دست می‌آید.

استفاده شده‌اند. برای اندازه‌گیری بیشینه دما در حالت گذرا در صورتی که تغییرات دما با زمان را بدانیم، این حس‌گرها قابل استفاده هستند [۴-۲].

روش اندازه‌گیری MTCS مبتنی بر پدیده دمای بالا برای بازگرداندن تغییرات ایجاد شده در شبکه کریستالی که توسط تابش نوترون ایجاد شده‌اند، استوار است. مواد بسیاری وجود دارند که به دلیل تابش نوترونی، تغییر شبکه کریستالی را تجربه می‌کنند، از جمله: ${}^3\text{C-SiC}$ ، الماس، گرافیت و غیره.

ابتدا ماده مورد نظر به عنوان حس‌گر لازم است به وسیله نوترون در یک راکتور هسته‌ای تابش داده شود (در این پژوهش ماده ${}^3\text{C-SiC}$ جهت پرتودهی در قلب راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان حس‌گر بلوری در نظر گرفته شده است). رشد تابشی ایجاد شده در اثر تابش نوترون سبب تغییر پارامتر شبکه ماده می‌شود. تغییرات حجم کریستال با شار نوترون و زمان تابش‌دهی متناسب است. همان طوری که می‌دانیم میانگین مربعات جابجایی اتم‌ها در شبکه کریستالی وابسته به مقدار جریان نوترون است. در شروع تابش‌دهی مقدار افزایش کم است. با افزایش دما تحرک عیوب ایجاد شده، افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل کاهش غلظت عیوب، تغییرات مشخصات فیزیکی و مکانیکی هم کمتر می‌شود. با اعمال حرارت به حس‌گر و بازگشت ماده به حالت پایدار خود، این انرژی آزاد می‌شود. در نهایت، تغییرات پارامتر شبکه و انرژی داخلی متناسب با میزان چگالی عیوب نقطه‌ای که ناشی از میزان بمباران نوترونی است [۱].

ماده ${}^3\text{C-SiC}$ قادر است دما را در محدوده از 100°C تا 1400°C اندازه‌گیری کند. جریان^۲ نوترون مورد نیاز $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ (برای $0.18 \text{ MeV} > E$) است که باعث افزایش حجم شبکه کریستالی ${}^3\text{C-SiC}$ از $2/5$ تا 3 درصد می‌شود. خطای افزایش حجم شبکه کریستالی $0.01 - 0.02\%$ است. کاربید سیلیکونی تک بلوری به دلیل خاصیت فیزیکی، شیمیایی

اما این افزایش تا حدی امکان‌پذیر است که خواص مواد به کار رفته دچار تغییر نشود. افزایش دما باعث کاهش استحکام می‌شود بنابراین یافتن روشی مؤثر برای خنک‌سازی سیستم که به وسیله حس‌گرهای دمایی پایش می‌شوند، ضروری است. معمولاً حداکثر دمای کار سیستم‌ها حدود 100°C درجه از بیشینه دمای مجاز مواد پایین‌تر است، در نتیجه در بسیاری از موارد، بیشینه دمایی که در یک نقطه ایجاد می‌گردد، اهمیت دارد. امروزه با پیچیده شدن دستگاه‌ها و سیستم‌ها، شرایط و الزاماتی که یک حس‌گر دمایی مناسب باید داشته باشد نیز سخت‌تر و پیچیده‌تر شده‌اند. برای مثال، توان کار کردن در دمای بالا، قدرت تفکیک دمایی بالا، ابعاد کوچک و عدم تأثیر در کارکرد سیستم از الزامات یک حس‌گر دمایی مناسب هستند [۱].

روش‌های اندازه‌گیری دما براساس مکانیسم قرائت آن به دو دسته تماسی و غیر تماسی تقسیم‌بندی می‌نمایند. استفاده از هر یک از این روش‌ها، بسته به نوع کاربرد آن مزایا و معایب خاص خود را دارد. روش‌های تماسی به روش‌هایی اطلاق می‌شود که حس‌گری که روی قطعه قرار گرفته با یک اتصال الکتریکی به قرائت‌گر متصل می‌شود. از مزایای این روش می‌توان به ثبت پیوسته دما و از معایب آن، پیچیدگی و هزینه‌بر بودن اشاره کرد. از این نوع حس‌گرها می‌توان به انواع ترموکوپل، حس‌گرهای مقاومتی و حس‌گرهای مقاومتی لایه نازک اشاره کرد. دستگاه‌های غیر تماسی شامل دماسنج‌های فلزی گداختی، رنگ‌های حرارتی و حس‌گر بلوری بیشینه دما (${}^1\text{MTCS}$) هستند. روش‌های غیر تماسی اجازه اندازه‌گیری بیشترین دما بعد از انجام آزمایش و خارج کردن حس‌گر از محل نصب شده و انجام آنالیز را می‌دهند. بنابراین یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های اندازه‌گیری دما، استفاده از حس‌گرهای بلوری بیشینه دما است. این حس‌گرها عمدتاً برای اندازه‌گیری بیشینه دما در شرایط ثابت

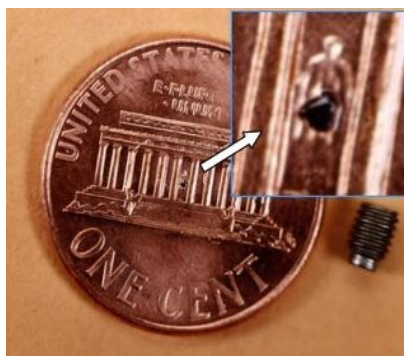
² Fluence

¹ Maximum Temperature Crystal Sensors

نمونه در زمان‌های مختلف خنک شوندگی محاسبه شده است. همچنین یک تست اولیه به‌منظور بررسی تغییرات ساختار شبکه این نمونه در قلب راکتور تحقیقاتی تهران از طریق پرتودهی انجام شد. در نهایت محاسبات اندازه حجم و ساختاری شبکه محاسبه و با نتایج تجربی قبل و بعد از پرتودهی مقایسه شد.

۲. مواد و روش کار

یک تصویر مقایسه‌ای از MTCS برای ماده $^{3}\text{C-SiC}$ در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات مورد نیاز این ماده در جدول ۱ لیست شده‌اند [۱].



شکل (۱): مقایسه اندازه ماده $^{3}\text{C-SiC}$.

جدول (۱): مشخصات ماده $^{3}\text{C-SiC}$.

محدوده اندازه‌گیری دما	$1400-100\text{ }^{\circ}\text{C}$
بیشترین دمای استفاده شده	$1450\text{ }^{\circ}\text{C}$
دقت اندازه‌گیری	$\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$
اندازه حس‌گر	$0.3 - 0.5\text{ mm}$
چگالی	3.21 g/cm^3
پایداری شیمیایی	پایدار

با توجه به ضرورت محاسبه شار نوترون، پرتوزایی، نرخ دز کل گاما و ساختار شبکه، استفاده از کدهای تخصصی مورد نیاز می‌باشد. بنابراین در این مقاله، برای تعیین شار نوترون و نرخ دز کل از کد MCNP^۶ [۹] و همچنین برای محاسبه پرتوزایی از کد ORIGEN^۲ [۱۰] استفاده شده است.

و مکانیکی بی‌نظیر، در کاربردهای بسیار مختلفی از جمله پره‌های توربین گازی و یا موتور اتمیبل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سیستم‌های الکترونیکی، ماده $^{3}\text{C-SiC}$ جایگزینی مناسب برای سیلیکون در دمای بالا، قدرت بالا و فرکانس بالا است. همچنین در اثر تابش نوترون، مقدار پرتوزایی زیادی در آن به وجود نمی‌آید. همه این ویژگی‌ها، این ماده را به‌منظور کاربرد حس‌گر دمایی جذاب‌تر می‌سازد [۶،۵،۱].

تولید و تحقیق بر روی ساخت حس‌گرهای MTCS در دنیا سابقه نسبتاً طولانی دارد. حس‌گر بلوری بیشینه دما اولین بار توسط نیکولانکو^۱ در سال ۱۹۸۶ در مؤسسه انرژی اتمی کورچتوف^۲ در مسکو، در کشور روسیه توسعه داده شده است [۶].

همچنین تحقیقات مختلفی بر روی خواص و ویژگی‌های $^{3}\text{C-SiC}$ صورت پذیرفته که در مراجع و اسناد معتبر ذکر شده است [۸،۷]. از جمله، تحقیقاتی به سرپرستی ولینسکی^۳ بر روی استفاده از این نوع از حس‌گرها در حفاظ حرارتی فضاپیماها صورت گرفته است. در این تحقیق، در حالی که فضاپیماها در مدار از $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ تا $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ دمای هوا را تجربه می‌کنند، سطح آن‌ها در هنگام فرود به جو به دلیل گرم شدن آیرودینامیکی به دمای بسیار بالا، بالاتر از $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ می‌رسند. سیستم‌های عایق پیچیده برای محافظت از حرارت در این فضاپیماها طراحی شده‌اند. یکی از مراحل طراحی سیستم حفاظت، اندازه‌گیری‌های آزمایشی دما است که این حرارت به‌وسیله حس‌گرهای بلوری بیشینه دما اندازه‌گیری می‌شود [۵،۱].

در این مقاله، ابتدا شار نوترون‌های سریع در کانال‌های مختلف راکتور تحقیقاتی تهران برای نمونه $^{3}\text{C-SiC}$ محاسبه شده است. سپس کانال‌های مورد نظر جهت پرتودهی بر اساس ملاحظات بهره‌برداری مشخص گردید. میزان پرتوزایی و دز

³ Volinsky

¹ Nikolaenko

² Kurchatov

می‌توان نشان داد که رابطه براگ برای آن‌ها به صورت زیر برقرار است [۳].

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

که λ طول موج اشعه X برخوردی، d فاصله بین صفحات شبکه موازی در کریستال، θ زاویه بین صفحات شبکه و پرتو X برخوردی و n مرتبه بازتاب که عددی صحیح (...و ۳، ۲، ۱) که معمولاً به این دلیل که بازتاب مرتبه اول برای اشعه X قوی‌ترین است بنابراین برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود.

با اندازه‌گیری زاویه پراش صفحه‌های کریستالی مختلف از روی نمودار XRD^1 ، فاصله‌ی بین صفحه‌های کریستالی (d) از رابطه‌ی براگ (۱) به دست می‌آید. با داشتن d ، ثابت‌های شبکه با کمک روابط مربوطه قابل محاسبه است. رابطه براگ نشان می‌دهد که دقت در اندازه‌گیری d بستگی به دقت در اندازه‌گیری $\sin \theta$ دارد. تغییرات $\sin \theta$ با θ برای زوایای نزدیک به 90° (2θ) نزدیک به 180° به آهستگی صورت می‌گیرد. بنابراین برای تعیین دقیق ثابت‌های شبکه باید در الگوی XRD، پیک‌هایی که در زوایای بالاتر قرار دارند را نیز لحاظ کرد. به این ترتیب ثابت‌های اندازه‌گیری شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر خواهند بود [۱۲، ۱۳].

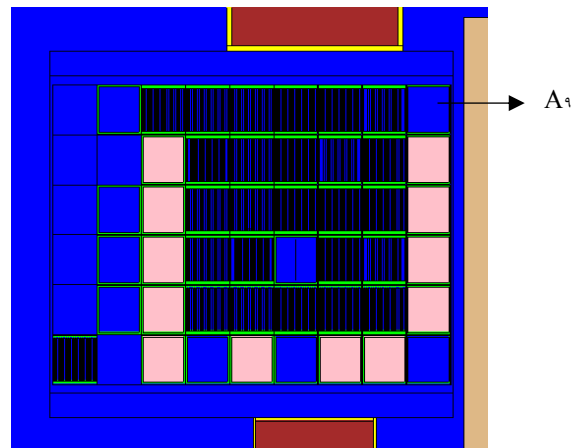
همچنین با استفاده از رابطه ویلیامسون-هال می‌توان اندازه دانه و کرنش ذرات پودر آسیاب شده را به دست آورد [۱۴].

$$\beta \cos \theta = \frac{1}{d} \lambda + 2A \epsilon \sin \theta \quad (2)$$

که β پهنای پیک در نیم ارتفاع، A مقدارش ثابت که معمولاً برابر با ۱ است و ϵ مقدار کرنش است.

نکته اصلی در این مقاله، پیدا کردن شار بیشینه نوترون سریع در انرژی بالای $E > 0.18 \text{ MeV}$ جهت امکان‌سنجی تولید حس‌گر بلوری بیشینه دما است. بنابراین ابتدا قلب راکتور تحقیقاتی تهران مطابق شکل ۲ با استفاده از کد MCNP۶ شبیه‌سازی شد سپس شار بیشینه در هر یک از کانال‌های مختلف با استفاده از تالی F۴ موجود در کد محاسبه شده است.

در این شکل، قلب شامل چیدمان سوخت صفحه‌ای از جنس U_3O_8Al با غنای کمتر از ۲۰٪ (رنگ مشکی)، آب به عنوان خنک کننده و حفاظ (رنگ آبی)، گرافیت به عنوان بازتابنده (رنگ صورتی) و کانال‌های مخصوص برای پرتودهی مانند A_9 در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): نمایی از قلب شماره ۱۸ شبیه‌سازی شده با کد MCNP۶ راکتور تحقیقاتی تهران.

۱.۲. روش محاسبه ساختار شبکه

زمانی که پرتو X به ماده برخورد می‌کند با ساختار کریستالی ماده برهمکنش کرده، موج‌های پراکنده شده از ماده می‌توانند با یکدیگر برهمکنش‌های سازنده و یا مخرب داشته باشند. در صورتی که اتم‌های ماده در جایگاه‌های منظمی قرار گرفته باشند،

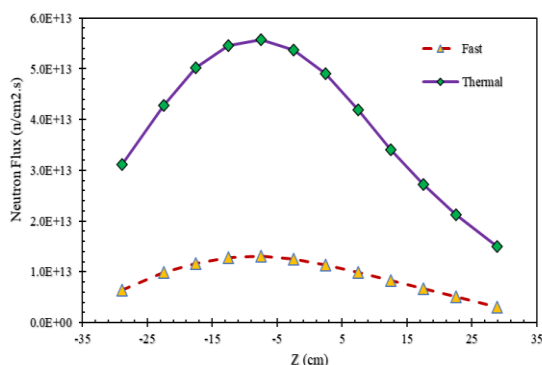
¹ X-Ray diffraction

۳. نتایج و بحث

۱.۳. محاسبه شار نوترون

با توجه به نتایج ارائه شده در اسناد و مراجع معتبر [۱]، پیدا کردن شار بیشینه نوترون سریع در انرژی بالای 0.18 MeV جهت امکان‌سنجی ساخت حس‌گر بلوری بیشینه دما لازم است. بنابراین ابتدا مقادیر شار نوترون‌های حرارتی و سریع برای قلب شبیه‌سازی شده مطابق شکل ۲ برای کانال‌های مختلف پرتودهی محاسبه شده است که نتایج به‌دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که کانال F۸ بیشترین شار نوترون سریع $3.31 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2\text{s}$ را دارد. با این وجود، از آنجایی که این کانال به‌منظور اهداف پرتودهی در نظر گرفته شده است. برای مثال، تولید رادیوایزوتوپ، بنابراین با توجه به شکل ۳، کانال F۸ در جایگاه دوم بیشترین مقدار شار نوترون است که می‌تواند برای حس‌گر بلوری مناسب باشد. در این کانال، مقادیر شار نوترون‌های حرارتی و سریع به ترتیب $3.17 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2\text{s}$ و $7.09 \text{ E}12 \text{ n/cm}^2\text{s}$ هستند. قابل ذکر است نتایج شار به‌دست آمده در محدوده SAR^۱ راکتور تحقیقاتی تهران است.

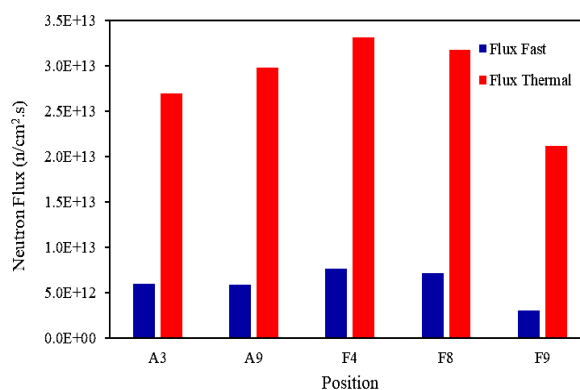
در ادامه مقادیر شار نوترون‌های سریع در راستای محوری برای قلب شماره ۱۸ و برای کانال F۸ در راکتور تحقیقاتی تهران محاسبه شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد بیشینه شار نوترون سریع در فاصله بین ۰ تا ۱۰- سانتی‌متر است که مقدار بیشینه آن تقریباً $5.13 \text{ E}13 \text{ n/cm}^2\text{s}$ و در فاصله ۵ سانتی‌متری پایین قلب قرار دارد. قابل ذکر است مقدار بیشینه شار نوترون به موقعیت میله‌های کنترل و فاصله تا مرکز قلب بستگی دارد. مقدار خطای محاسبات شار نوترون سریع حاصل از کد کمتر از ۱٪ است و از کتابخانه ENDF/VII موجود در کد استفاده شده است.



شکل (۴): مقادیر شار نوترون‌های سریع و حرارتی در راستای محوری برای قلب فشرده و برای کانال F۸ در راکتور تحقیقاتی تهران.

۲.۳. محاسبه پرتوزایی

در این بخش، آنالیز اکتیویته نمونه ^{31}Si -C با استفاده از کد ORIGEN انجام شده است. برای این منظور ۵ gr از این ماده در شار با مقدار تجربی حدود $1.0^{13} \text{ n/cm}^2\text{s}$ قرار داده شده است. محاسبات شار نوترون از طریق کد MCNP^۶ و با تالی F۴ موجود در کد انجام شده است. با توجه به این که مقدار تابش‌دهی مورد نیاز برای حس‌گر بیشینه دما، $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ است، بنابراین زمان مورد نیاز برای تابش‌دهی ماده ^{31}Si -C



شکل (۳): مقادیر شار نوترون‌های حرارتی و سریع برای کانال‌های مختلف پرتودهی در راکتور تحقیقاتی تهران.

^۱ Safety Analysis Reactor

حاصل از این آنالیز عنصری در جدول ۴ برحسب ppm نشان داده شده است.

جدل (۴): مقدار ناخالصی به دست آمده در نمونه SiC از روش فعال سازی نوترونی.

ردیف	عنصر	غلظت ppm	خطا ±
۱	Al	۵۴۶۱/۰	۳/۵
۲	Na	۱۴۱/۰	۵/۱
۳	Ti	۹۹/۶	۵/۸
۴	V	۳/۹	۱۵/۴
۵	As	۰/۷	۱۶/۳
۶	Ce	۸۲/۳	۵/۰
۷	La	۳۴/۱	۲/۹
۸	Sc	۰/۷	۳/۹
۹	Sm	۱/۵	۳/۰
۱۰	Th	۱۲/۳	۳/۲
۱۱	U	۱/۵	۱۶/۲
۱۲	Cr	۵/۹	۱۳/۲
۱۳	Fe	۴۶۲/۰	۱۳/۹
۱۴	Hf	۶/۲	۴/۷
۱۵	Lu	۰/۱	۳/۷
۱۶	Nd	۲۱/۰	۸/۱

در تکنیک MTCS لازم است، پس از پرتو دهی آنالیز XRD انجام پذیرد. انجام این آنالیز به منظور تعیین میزان تغییرات در حجم نمونه ^{۳۰}C-SiC است. چالشی که در این مرحله با آن مواجه هستیم میزان دز نمونه پس از ترخیص از راکتور است. بدین منظور ابتدا طیف فوتونی نمونه (طیف پیوسته) ۱۸ گروه فوتونی در بازه زمانی ۷، ۱۵، ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ روز از زمان خنک‌شوندگی با استفاده از کد ORIGEN^۲ استخراج و سپس به عنوان ورودی جهت محاسبات دزیمتری به کد MCNP^۶ داده شد. داده‌های ورودی کارت ماده نیز از خروجی کد ORIGEN^۲ در هر یک از بازه‌های زمانی در برنامه شبیه‌سازی MCNP^۶ استفاده شد. شبیه‌سازی در دو مد الکترون و فوتون و تا پاس شدن تمامی پارامترهای آماری ادامه یافت.

حدود ۲۳۱ day است. محاسبات اکتیویته برای چهار ماه پس از اتمام تابش دهی انجام شده است. جدول ۳ مقدار اکتیویته نمونه در بازه زمانی چهار ماه خنک‌سازی را نمایش می‌دهد. همان طور که نتایج نشان می‌دهد مقدار اکتیویته نمونه بعد از ۴ ماه کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کند یعنی مقدار اکتیویته پس از ۴ ماه از ۱۴۰ میکروکوری به ۴۸ میکروکوری می‌رسد که حدود ۶۵٪ کاهش یافته است. پس می‌توان گفت زمان خنک‌شوندگی برای نمونه ^{۳۰}C-SiC حدود ۴ ماه مناسب است.

جدول (۳): مقدار اکتیویته کل در پایان هر ماه خنک‌شوندگی برای ماده ^{۳۰}C-SiC.

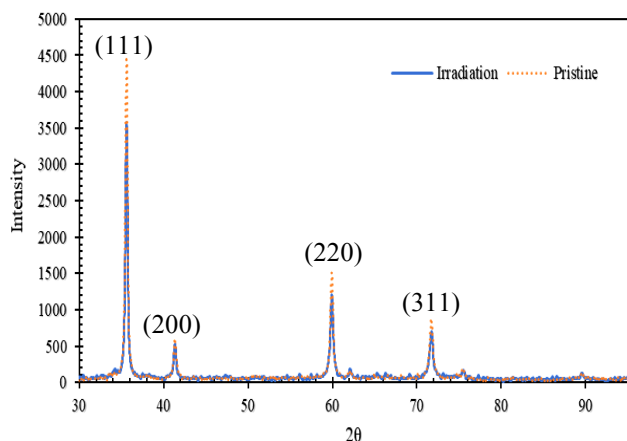
Time (Month)	Radioactivity (μCi)
۱	۱۴۰/۰
۲	۹۱/۳
۳	۶۴/۵
۴	۴۸/۶

۳.۳. محاسبه نرخ دز کل

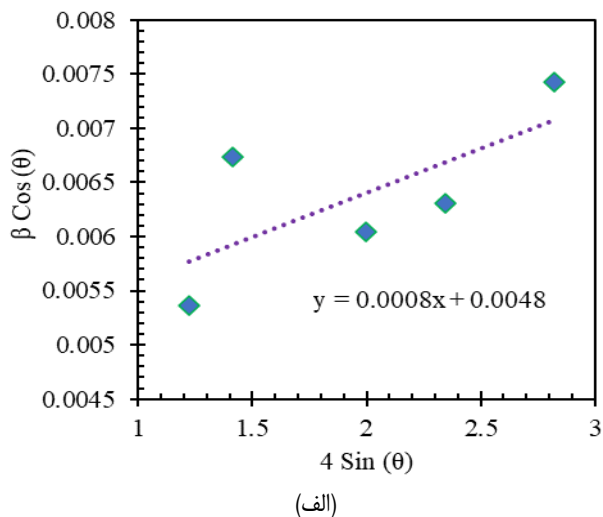
در این قسمت از کار تحقیقاتی، میزان دز نمونه پرتو دهی شده در زمان‌های مختلفی از زمان‌های خنک‌شوندگی مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که در تکنیک MTCS در صورت تهیه نمونه ^{۳۰}C-SiC ممکن است تحت پرتو دهی نوترونی قرار گیرد، اکتیو شدن نمونه‌ها (به دلیل حضور ناخالصی‌ها) امری اجتناب ناپذیر است که روی نرخ دز نمونه‌ها مؤثر است.

بنابراین در این پژوهش، برای محاسبه مقدار ناخالصی موجود در نمونه SiC از روش فعال‌سازی نوترون (^۱NAA) استفاده شده است. این آزمایش برای دو نمونه صورت گرفته است، نمونه اول به وزن ۱۳۱/۲ mgr و دیگری به وزن ۶۸ mgr بوده است. نمونه اول به مدت ۳۰ min و نمونه دوم به مدت ۵ s در قدرت ۵ MW در راکتور تابش داده شده‌اند. نتایج

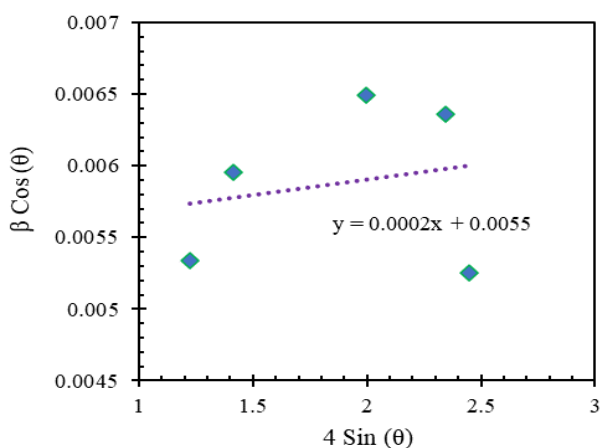
^۱ Neutron Activation Analysis



شکل (۶): طیف XRD نمونه‌ها قبل و بعد از تابش دهی.



(الف)



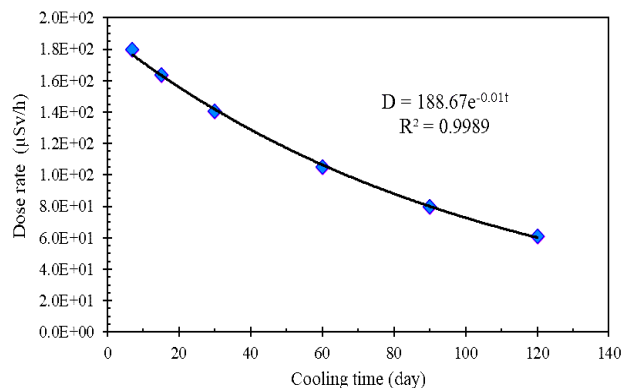
(ب)

شکل (۷): نمودارهای Williamson-Hall از نمونه‌ها (الف) قبل و

(ب) بعد از تابش دهی.

محاسبات دزیمتری فوتون برای ۵ gf از نمونه، در ناحیه چسبیده از نمونه انجام پذیرفت.

شکل ۵، نمودار افت آهنگ دز را در نقطه چسبیده به نمونه و در زمان‌های خنک شونده بین ۵ تا ۱۲۰ روز نشان می‌دهد.



شکل (۵): نمودار افت آهنگ دز نمونه ۳C-SiC چسبیده به نمونه.

داده‌های شکل ۵، بیان می‌کنند که آهنگ دز نمونه پس از گذشت ۱۲۰ روز از زمان خنک شونده، در حدود ۶۰ μSv/h افت خواهد کرد.

۴.۳. محاسبه ساختار شبکه

در این بخش، به بررسی ساختار شبکه ماده پرداخته می‌شود. برای این بررسی از تست XRD استفاده شده است. مقداری از ماده، قبل و بعد از تابش دهی (تابش به مدت ۳۰ دقیقه) بررسی شده است. شکل ۶ طیف حاصل از دو نمونه قبل (Pristine) و بعد از تابش دهی (Irradiation) را نمایش می‌دهد.

طیف با استفاده از نرم‌افزار X'Pert بررسی شده است و نزدیک‌ترین ساختار پیشنهاد شده ساختار مکعبی SiC بوده است. از آنجایی که این نرم‌افزار، طیف نتایج تجربی را استخراج می‌کند بنابراین طیف نمونه‌ها قبل و بعد از پرتو دهی استخراج شده است. در ادامه با استفاده از روابط براگ و Williamson-Hall [۱۴] اندازه دانه و مقدار کرنش^۱ ساختار قبل و بعد از تابش دهی مطالعه شده است (شکل ۷ و جدول ۵).

¹ Strain

نظر انجام گرفت و نتایج نشان می‌داد که با گذشت حدود ۴ ماه میزان نرخ دز کل و اکتیویته نمونه به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج به دست آمده از تست XRD نشان از کاهش اندازه دانه و مقدار کرنش این ماده دارد.

در نهایت می‌توان گفت برای رسیدن به مقدار جریان نوترون $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ، با توجه به بیشینه شار نوترون سریع حدود $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ در کانال F8، مدت زمان مورد نیاز جهت پرتودهی پیوسته نمونه $^{35}\text{C-SiC}$ که به عنوان حسگر بلوری بیشینه دما در داخل قلب راکتور تحقیقاتی تهران قرار گیرد، حداقل ۲۱۷ روز است. قابل ذکر است، در حال حاضر پرتودهی نمونه‌ها در راکتور تحقیقاتی تهران انجام شده و نتایج تجربی به دست آمده و نمونه‌ها جهت آنالیز به منظور بررسی طیف ارسال شده است.

۵. تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از گروه بهره‌برداری راکتور تحقیقاتی تهران جهت پرتودهی و از آزمایشگاه مرکز مواد در فردو جهت آنالیز XRD و همچنین از پژوهشکده لیزر و فتونیک جهت حرارت‌دهی نمونه‌ها به منظور پیشبرد پژوهش که نقش داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند. قابل ذکر است این موضوع برای اولین بار در پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای در قالب یک پروژه امکان‌سنجی تولید حسگر بلوری بیشینه دما انجام شده است.

جدول (۵): اندازه دانه و کرنش ساختار SiC قبل و بعد از تابش‌دهی.

اندازه دانه (Å)	کرنش (%)	پارامتر
۲۹۲/۱	۰/۰۸	تابش ندیده
۲۵۴/۹	۰/۰۲	تابش دیده

نتایج به دست آمده نشان از کاهش اندازه دانه و مقدار کرنش ماده دارد. از آنجایی که نتایج تنها از یک تابش‌دهی به دست آمده است، بنابراین برای صحت‌سنجی نیاز به تابش‌دهی بیشتری است، که در آینده این مورد در نظر گرفته می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، ابتدا اسناد، مدارک و گزارش‌های معتبر در زمینه حسگرهای بلوری بیشینه دما مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. سپس بر اساس مطالعات انجام شده، ماده $^{35}\text{C-SiC}$ به عنوان ماده حسگر بلوری برای اندازه‌گیری دما به صورت غیرتماسی انتخاب شد. کاربرد این حسگرها می‌تواند در مکان‌های غیرقابل دسترس برای مثال، داخل توربین یا موتور قرار گیرند و دمای بیشینه ایجاد شده را اندازه‌گیری نمایند. بنابراین با توجه به ابعاد این حسگرها و دقت بسیار بالای اندازه‌گیری، می‌توان توزیع مکانی بسیار دقیقی از دمای ایجاد شده به دست آورد.

در ادامه، شبیه‌سازی قلب راکتور و محاسبات مربوط به شار نوترون به منظور پیدا نمودن شار سریع بیشینه و کوتاه شدن زمان پرتودهی انجام شد. همچنین محاسبات نرخ دز جهت پیش‌بینی مقدار اکتیویته پس از پرتودهی در داخل کانال با کدهای مورد

۶. مراجع

1. A. A. Volinsky, V. Nikolaenko, V. Morozov, V. Timoshenko. Irradiated single crystals for high temperature measurements in space applications. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 851, 2004.
2. V. K. Rai. Temperature sensors and optical sensors. *Appl. Phys. B* 88 (2007) 297-303.
3. V. G. Kuryachiy. *Irradiated Single Crystal $^{35}\text{C-SiC}$ as a Maximum Temperature Sensor*. University of South Florida, Florida, 2008.
4. E. Haile, J. Lepkowski. *Oscillator Circuits for RTD Temperature Sensors*. AN895. Microchip Technology Inc., DS00895, 2004.

5. A. Volinsky, L. Ginzbursky. Irradiated cubic single crystal SiC as a high temperature sensor. *MRS Online Proceedings Library* 792 (2003) 51-56.
6. V. Nikolaenko, V. Karpukhin. *Temperature Measurement by Means of Irradiated Materials*. USSR: Ehnergoizdat, Moscow, 1986.
7. D. J. Sprouster, T. Koyanagi, E. Dooryhee, S. Ghose, Y. Katoh, L. E. Ecker. Microstructural evolution of neutron irradiated 3C-SiC. *Scripta Materialia* 137 (2017) 132-136.
8. R. Devanathan, W. Weber, F. Gao. Atomic scale simulation of defect production in irradiated 3C-SiC. *J. Appl. Phys.* 90 (2001) 2303-2309.
9. D. Pelowitz, T. Goorley, M. James, T. Zukaitis. *MCNP6TM User's Manual*. Version 1.0, Los Alamos National Laboratory Report LA-CP-13-00634, 2013.
10. A. G. Croff. User's manual for the ORIGEN2 computer code, Oak Ridge National Lab. 1980.
11. R. Krishna, J. Wade, A. N. Jones, M. Lasithiotakis, P. M. Mummery, B. J. Marsden. An understanding of lattice strain, defects and disorder in nuclear graphite. *Carbon* 124 (2017) 314-333.
12. A. T. Atul Sheth. Uniform Crystal Temperature Sensor (Ucts) Application to Validation, Verification and Technical Comparison Processes, 2015.
13. G. C. Meijer, G. Wang, F. Fruett. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology. *IEEE sensors J.* 1 (2001) 225-234.
14. V. D. Mote, Y. Purushotham, B. N. Dole. Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. *J. Theor. Appl. Phys.* 6 (2012) 6.