



محاسبات و آنالیز پارامترهای مؤثر جهت تولید نمونه الماس به عنوان حسگر بلوری بیشینه دما

مصطفی حسن‌زاده*^{ID}، محمد امین امیرخانی دهکردی^{ID}، عارف رحیمیان^{ID}، محسن اسدی اسدآباد^{ID}
پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران - ایران

*Email: mhasanzadeh@aeoi.org.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۸/۲۹ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۹

چکیده

در حال حاضر، حسگرهای بلوری بیشینه دما در طراحی و بهینه‌سازی موتورهای توربین‌های با بازده بالا بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این حسگرها در ابعاد بسیار کوچک ساخته می‌شوند و می‌توانند دمای بیشینه را در محل مورد نظر برای مثال در داخل توربین اندازه‌گیری نمایند. لازم به ذکر است که برای تولید این حسگرها فلوننس بالای نوترون‌های سریع مورد نیاز است. روش اندازه‌گیری حسگر بلوری بیشینه دما مبتنی بر پدیده دمای بالا برای بازگرداندن تغییرات ایجاد شده در شبکه کریستالی که توسط تابش نوترون ایجاد شده‌اند، استوار است. در این مقاله، ابتدا از طریق شبیه‌سازی قلب رآکتور تهران محاسبات شار بیشینه نوترون سریع برای نمونه الماس با کد MCNP۶ انجام گرفت. همچنین محاسبات پرتوای با استفاده از ORIGEN۲ و نرخ دز از طریق MCNP۶ و محاسبات دمایی با نرم‌افزار ANSYS در نقاط مختلف نمونه انجام شد. مقدار شار بیشینه نوترون سریع محاسبه شد و مقدار پرتوای نمونه بعد از ۴۰ روز کاهش چشمگیری یافته و نرخ دز در فاصله ۱ متری به مقدار $4/1 \mu\text{Sv/h}$ رسیده است. همچنین محاسبات دمایی نشان می‌دهد که بیشینه دما در کمترین سرعت کانال 402 K است که به لحاظ حرارتی مشکلی ایجاد نخواهد کرد. در ادامه، با استفاده از روش XRD عدد شبکه و حجم سلول واحد برای نمونه در این مقاله محاسبه شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که نمونه الماس می‌تواند از دیدگاه نوترونیک، دزیمتری، ترموهیدرولیکی و تغییرات ساختار شبکه بلوری در رآکتور تحقیقاتی تهران جهت تولید حسگر بلوری پیشنهاد شود.

کلیدواژه‌ها: حسگر بیشینه دما، الماس، MCNP۶، ORIGEN، ANSYS، شار، نرخ دز، پارامتر شبکه

Calculations and analysis of effective parameters for producing a diamond sample as a maximum temperature crystal sensor

M. Hassanzadeh*, M.A. Amirkhani-Dehkordi, A. Rahimian, M. Asadi Asadabad

Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.BOX: 14395-836, Tehran – Iran

Research Article

Received: 20.11.2023,

Revised: 17.2.2024,

Accepted: 28.2.2024

Abstract

At present, Maximum Temperature Crystal Sensors (MTCS) are of great interest in the design and optimization of engines and turbines with high efficiency. These sensors are made in very small dimensions and can measure the maximum temperature in the desired location, for example inside the turbine. It is worth mentioning that a high fluence of fast neutrons is required to produce these sensors. The MTCS method is based on the high temperature phenomenon to restore changes made in the crystal lattice caused by neutron irradiation. Calculations of the maximum fast neutron flux for the diamond sample were performed using MCNP6 with the simulation of the core of the Tehran Research Reactor (TRR). Activity calculations were done using ORIGEN2, dose rate calculations through MCNP6, and temperature calculations with ANSYS software at different points of the sample. The highest fast neutron flux was calculated, and the activity of the sample decreased significantly after 40 days, with the dose rate at a distance of one meter reaching $1.4 \mu\text{Sv/h}$. Temperature calculations showed that the maximum temperature at the lowest speed of the channel was 402 K , which would not cause any thermal problems. Additionally, using the X-Ray diffraction (XRD) method, the lattice number and unit cell volume were calculated for the sample. The results obtained suggest that the diamond sample, from the perspective of neutronics, dosimetry, thermohydraulics, and changes in crystal lattice structure, can be recommended as a crystal sensor in the Tehran Research Reactor.

Keywords: Maximum temperature sensor, Diamond, MCNP6, ORIGEN, ANSYS, Flux, Dose rate, Lattice parameter



۱. مقدمه

یکی از چالش‌های مهم در صنایع خودروسازی، توربین‌سازی و صنایع فضایی، ساخت و طراحی موتورهای و توربین‌ها با بازده بالا، به‌گونه‌ای که بتوانند حرارت بیشتری را تحمل نمایند، است. بازده موتورهای، با افزایش دمای کاری آنها افزایش می‌یابد اما این افزایش با ویژگی‌های مواد به کار رفته محدود می‌شود. از طرفی برای داشتن کارایی بیشتر، باید دمای کاری موتور افزایش یابد اما این افزایش تا حدی که خواص مواد به کار رفته دچار تغییر نکند، قابل قبول است. همچنین یافتن روشی مؤثر برای خنک‌سازی سیستم که به وسیله حسگرهای دمایی پایش می‌شوند، ضروری است. امروزه با پیچیده شدن دستگاه‌ها و سیستم‌ها، شرایط و الزاماتی که یک حسگر دمایی مناسب باید داشته باشد نیز سخت‌تر و پیچیده‌تر شده‌اند. لذا از الزامات یک حسگر دمایی مناسب، توان کاری در دمای بالا، قدرت تفکیک دمایی بالا، ابعاد کوچک و عدم تأثیر در کارکرد سیستم هستند [۱].

روش‌های اندازه‌گیری دما براساس مکانیسم قرائت آن به دو دسته تماسی و غیرتماسی 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 غیرتماسی شامل دماسنج‌های فلزی گداختی، رنگ‌های حرارتی و حسگر بلوری بیشینه دما ($MTCS^1$) می‌باشند [۲].

حسگرهای بلوری بیشینه دما اجازه اندازه‌گیری بیشترین دما نقطه از جسم مورد نظر را بعد از انجام آزمایش و خارج کردن حسگر از محل نصب شده و انجام آنالیز را می‌دهند. لذا استفاده از حسگرهای بلوری بیشینه دما، یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های اندازه‌گیری دما، است. این حسگرها عمدتاً برای اندازه‌گیری بیشینه دما در شرایط ثابت استفاده شده‌اند. برای اندازه‌گیری بیشینه دما در حالت گذرا در صورتی که تغییرات دما با زمان را بدانیم، این حسگرها قابل استفاده هستند [۲-۵].

روندکار این حسگرها به این صورت است که شبکه بلوری کریستال در اثر پرتوهای نوترون منبسط می‌گردد و هنگامی که

حرارت می‌بیند، متناسب با بیشینه دما و زمانی که در آن دما بوده است، این انبساط کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری پارامترهای شبکه بلوری قبل و بعد از حرارت‌دهی می‌توان دما را با دقت حدود چند درجه تا دمای حدود $1400^{\circ}C$ تشخیص داد. برای تولید این حسگرها فلوتنس بسیار بالای نوترون‌های سریع مورد نیاز است. لذا روش حسگر بلوری بیشینه دما 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 و برای استفاده به عنوان حسگر مناسب هستند، از جمله: الماس، $3C-SiC$ ، گرافیت، اکسید بریلیم، اکسید آلومینا، نیتريد بور، کاربید بور و ... [۱، ۶-۸].

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

همچنین تحقیقاتی به سرپرستی Volinsky 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 $120^{\circ}C$ تا $110^{\circ}C$ دمای هوا را تجربه می‌کنند، سطح آنها در هنگام فرود به جو به دلیل گرم شدن آیرودینامیکی به دمای بسیار بالا، بالاتر از $1000^{\circ}C$ می‌رسند. سیستم‌های عایق پیچیده برای محافظت از حرارت در این فضاپیماها طراحی شده‌اند. یکی از مراحل طراحی سیستم حفاظت، اندازه‌گیری‌های آزمایشی دما است. شار نوترون باعث تشکیل و تجمع نقص نقطه‌ای در تک بلورهای الماس می‌شود که باعث انبساط کلی شبکه می‌گردد. در طی بازپخت حرارتی این فرایند معکوس می‌شود، بنابراین دما و زمان بازپخت منجر به کاهش پارامتر شبکه می‌شود. در صورت مشخص بودن زمان قرار گرفتن در تابش، با اندازه‌گیری پارامتر شبکه توسط پراش اشعه ایکس می‌توان حداکثر دما را تعیین کرد. در نهایت این مقاله استفاده از سنسورهای تک بلور تابش شده با درجه حرارت بالا برای اندازه‌گیری دما در سیستم‌های حفاظت حرارتی در هنگام فرود فضاپیما و همچنین سایر کاربردهای فضایی را توصیف می‌کند [۱].



۲. مواد و روش کار

الماس از کربن ساخته شده است و در اصل یکی از آلوتروپ‌های کربن است. شبکه بلوری الماس بر اساس اکثر منابع به صورت مکعبی است. در الماس هر اتم کربن با چهار پیوند یگانه به چهار اتم کربن دیگر اتصال یافته است. اتم کربن در این حالت ساختاری چهار وجهی با زاویه‌ی پیوندی 109.5° دارد و هر چهار اتم کربن متصل به آن در چهار گوشه یک چهار وجهی قرار گرفته‌اند. صفحات بلورشناسی اصلی الماس عبارتند از مکعب، دوازده وجهی و هشت ضلعی که در شکل ۱ نشان داده شده است. قابل ذکر است شکل الماس یک شکل آلوتروپیک از کربن می‌باشد [۹].

با توجه به غلظت ترکیبات ناخالصی حاضر در نمونه الماس از طریق اندازه‌گیری تجربی با روش XRF^1 مطابق جدول ۱، ناخالصی‌ها در نمونه اندازه‌گیری شده است. لذا خلوص آن در حدود 99.14% است. با مطالعه و بررسی منابع مشخص می‌شود این مقدار ناخالصی در ترکیب شیمیایی الماس بیشتر از حد متعارف نیست. معمولاً در حدود 0.10 تا 0.05 درصد ناخالصی برای الماس ذکر می‌شود [۹].



شکل ۱. شکل الماس طبیعی.

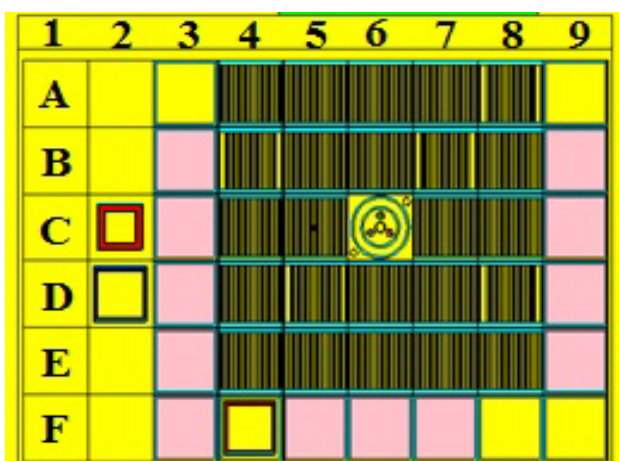
جدول ۱. نتایج آنالیز XRF انجام شده از نمونه الماس در این پژوهش

ردیف	عنصر	غلظت (ppm)	شدت
۱	SiO_2	۰.۴۹	۳۷.۷
۲	SO_2	۰.۱۶	۲۷.۹
۳	CaO	۰.۱۳	۱۳۶.۷
۴	Fe_2O_3	۳۵۰	۱۵۸.۶
۵	CuO	۲۵۰	۴۸.۲
۶	ZnO	۱۰۰	۲۶.۱
۷	ZrO_2	۱۰۰	۱۲۹.۳

با توجه به ضرورت محاسبه شار نوترون، نرخ دز کل، حرارت تولید شده و پارامتر شبکه، استفاده از کدهای تخصصی مورد نیاز می‌باشد. در این مقاله، برای تعیین شار نوترون و نرخ دز کل از کد MCNP۶ [۱۰] و برای محاسبه پرتوزایی از کد ORIGEN۲ [۱۱] و همچنین نرم‌افزار ANSYS [۱۲] برای محاسبات دمایی استفاده شده است.

به منظور ساخت حسگرهای بلوری بیشینه دما، بایستی نمونه تا جریان 2 نوترون $n/cm^2 \times 10^{20}$ در یکی از کانال‌های پرتودهی قلب رآکتور با شار نوترون سریع در محدوده انرژی بالای $0.18 \text{ MeV} > E$ قرار گیرد [۱، ۳، ۵]. همچنین بایستی میزان شار نوترون سریع جهت تعیین زمان پرتودهی، تغییرات دمایی در داخل کانال پرتودهی، میزان اکتیویته نمونه الماس پس از پرتودهی محاسبه گردد [۱، ۳، ۹].

نکته اصلی در این مقاله، پیدا کردن شار بیشینه نوترون سریع است. لذا، ابتدا قلب رآکتور 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 F_4 موجود در کد محاسبه شده است. در شکل ۲، قلب شماره ۱۸ شامل چیدمان سوخت صفحه‌ای از جنس U_2O_8Al با غنای کمتر از 20% ، آب به عنوان خنک‌کننده و حفاظ، گرافیت به عنوان بازتابنده، کانال‌های مخصوص برای پرتودهی در نظر گرفته شده است. برای مثال، کانال‌های C_2 و C_6 و یا A_3 و A_9 و غیره.



شکل ۲. قلب شماره ۱۸ رآکتور تحقیقاتی تهران.

رنگ‌ها به ترتیب آبی: آب، سبز: آلومینیوم، صورتی: باکس گرافیت و صفحات مشکی: صفحات سوخت.



اندازه‌گیری زاویه پراش صفحه‌های کریستالی مختلف از روی نمودار XRD^1 ، فاصله بین صفحه‌های کریستالی (d) از رابطه براگ (۱) به دست می‌آید. با داشتن d، ثوابت 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° (۲۰) نزدیک به 180° به آهستگی صورت می‌گیرد. لذا برای تعیین دقیق ثوابت شبکه باید در الگوی XRD، پیک‌هایی که در زوایای بالاتر قرار دارند را نیز لحاظ کرد. به این ترتیب ثوابت اندازه‌گیری شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر خواهند بود [۱۴-۱۵].

با پارامتر شبکه با استفاده از رابطه زیر (برای شبکه‌های مکعبی) به دست آورده می‌شود [۳].

$$d = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3)$$

حجم سلول واحد در سیستم کریستالی از رابطه زیر به دست می‌آید [۳].

$$V = a_0 b_0 c_0 \sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta - \cos^2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma} \quad (4)$$

محاسبات پارامتر شبکه و حجم سلول واحد برای تعیین و بررسی میزان تغییرات ساختار شبکه ماده کریستالی قبل و بعد از پرتو دهی با استفاده روش XRD انجام می‌شود. در واقع زمانی که شبکه بلوری تحت تابش نوترون قرار می‌گیرد در اثر پرتو دهی این شبکه منبسط می‌گردد و هنگامی که دوباره حرارت می‌بیند، متناسب با بیشینه دما و زمانی که در آن دما بوده است، این انبساط کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری پارامترهای شبکه بلوری قبل و بعد از پرتو دهی و حرارت‌دهی می‌توان حسگرهای دمایی با دقت حدود چند درجه تا دمای حدود $900^\circ C$ برای الماس را تولید کرد.

۳. نتایج و تحلیل

۳.۳ محاسبه شار نوترون سریع

با توجه به نتایج ارائه شده در اسناد و مراجع معتبر [۱]، پیدا کردن شار بیشینه نوترون سریع در انرژی بالای $E > 0.18 \text{ MeV}$ جهت امکان‌سنجی ساخت حسگر بلوری بیشینه دما لازم است. لذا ابتدا مقادیر شار نوترون‌های سریع برای کانال‌های مختلف پرتو دهی با استفاده از دستور F4 موجود در کد MCNP6

قابل ذکر است در این مقاله، محاسبات اولیه شامل محاسبات نوترونیک، دزیمتری، ترموهیدرلیکی و ساختار شبکه بلوری نمونه الماس قبل از پرتو دهی جهت امکان‌سنجی و قرار دادن نمونه در داخل قلب بوده است و تنها بررسی پارامترهای اولیه الماس پیش از تابش‌دهی مد نظر بوده است. اما باید در نظر داشت که اصول اساسی ساخت حسگر بلوری استفاده از تغییرات ایجاد شده در ریزساختار ماده است و از تغییرات ایجاد شده در ریز ساختار ماده در اثر افزایش دما برای تعیین دمای بیشینه استفاده می‌شود.

۱.۲ روش محاسبه پارامتر شبکه

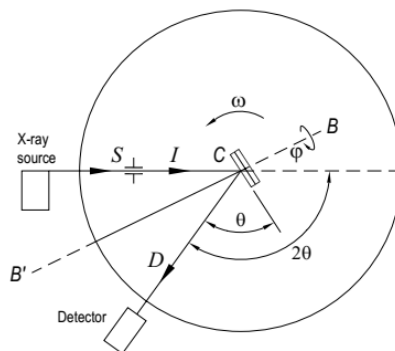
زمانی که پرتو X به ماده برخورد می‌کند (شکل ۳) با ساختار کریستالی ماده برهم‌کنش کرده، موج‌های پراکنده شده از ماده می‌توانند با یکدیگر برهم‌کنش‌های سازنده و یا مخرب داشته باشند. در صورتی که اتم‌های ماده در جایگاه‌های منظمی قرار گرفته باشند، می‌توان نشان داد که رابطه براگ برای آنها به صورت زیر برقرار است [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 (۱، ۲، ۳ و ...) می‌باشد و معمولاً بازتاب مرتبه اول برای اشعه X قوی‌ترین بازتاب است، لذا این مقدار برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. فاصله بین صفحه‌های d با استفاده از رابطه براگ و پارامترهای شبکه (a, c) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۳، ۱۳].

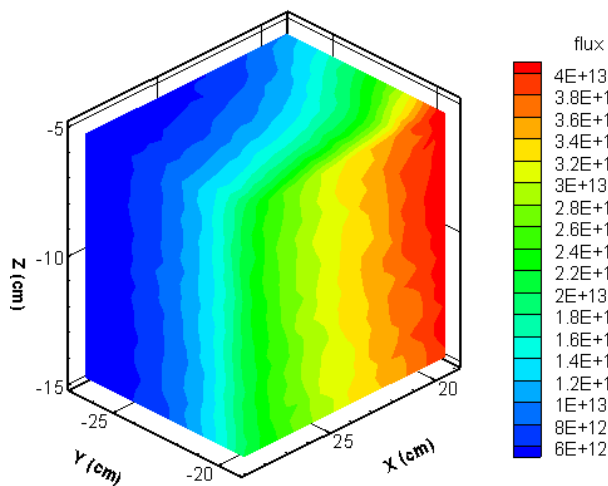
$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

که در آن k و h ثابت‌های میلر است. با محاسبه پارامترهای شبکه می‌توان حجم سلول واحد را به دست آورد.



شکل ۳. ساختار آنالیز پراش پرتو ایکس (زاویه بین بیم فرودی و محور عمود بر سطح نمونه (ω)، محور (BB) نسبت به سطح نمونه، I بیم فرودی، D بیم پراکنده، C نمونه و S شکاف است) [۲].





شکل ۵. مقادیر شار نوترون‌های سریع در راستای محوری برای قلب شماره ۱۸ و برای باکس F۸ در رآکتور تحقیقاتی تهران.

۲.۳ محاسبه نرخ دز کل

در ادامه، میزان دز نمونه الماس در زمان‌های مختلف خنک‌شوندگی مورد بررسی قرار گرفت. از آن‌جا که در تکنیک MTCS نمونه الماس تحت پرتودهی نوترونی قرار می‌گیرد، اکتیو شدن نمونه (به دلیل حضور ناخالصی‌ها) امری اجتناب‌ناپذیر است. چالشی که در این مرحله با آن مواجه هستیم میزان دز نمونه پس از ترخیص از رآکتور می‌باشد.

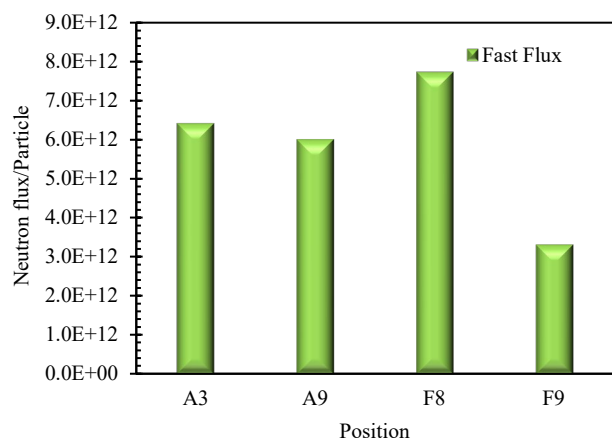
بدین‌منظور ابتدا طیف فوتونی نمونه (طیف پیوسته) ۱۸ گروه فوتونی در بازه زمانی ۰ و ۴۰ روز از زمان خنک‌شوندگی با استفاده از کد ORIGEN۲ استخراج و سپس به عنوان ورودی جهت محاسبات دزیمتری به کد MCNP۶ داده شد. شبیه‌سازی در دو مد الکترون و فوتون و تا پاس شدن تمامی پارامترهای آماری ادامه یافت. محاسبات دزیمتری فوتون برای ۱/۶ g از نمونه الماس طبیعی، در فواصل مختلف از نمونه انجام پذیرفت. شکل ۶ نمودار افت آهنگ دز را در فواصل مختلف از نمونه و در زمان‌های خنک‌شوندگی بین ۰ تا ۴۰ روز را نشان می‌دهد. داده‌های شبیه‌سازی بیان می‌کنند که آهنگ دز نمونه پس از گذشت ۰ و ۴۰ روز از زمان خنک‌شوندگی، در فاصله ۱ متری از آن به ترتیب $21 \mu\text{Sv/h}$ و $1/4 \mu\text{Sv/h}$ بر ساعت خواهد بود.

قابل ذکر است مقدار تجربی آهنگ دز نمونه الماس پس از دو ماه تابش‌دهی پیوسته در محل چسبیده به نمونه با استفاده دزیمتر گاما ALNOR اندازه‌گیری شد که حدود 5 mSv/h بود. محدوده اندازه‌گیری این دزیمتر از $0/05 \mu\text{Sv/h}$ تا 10 Sv/h می‌باشد. میزان دقت اندازه‌گیری آن $\pm 15\%$ است. در نتایج شبیه‌سازی این مقدار در همان محل با همان مدت

محاسبه شده که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده است. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که کانال F۸ بیشترین شار نوترون سریع ($7/74 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2.\text{s}$) را دارد که می‌تواند برای حسگر بلوری مناسب باشد.

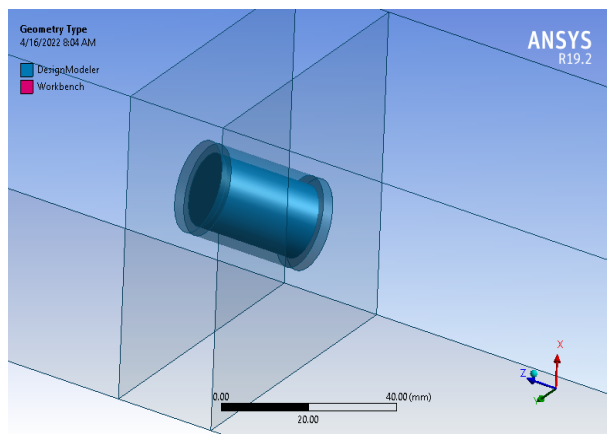
در ادامه مقادیر شار نوترون‌های سریع در راستای محوری برای قلب شماره ۱۸ و برای کانال F۸ در رآکتور تحقیقاتی تهران محاسبه شده است که در شکل ۵ نشان داده شده است. ارتفاع فعال صفحه سوخت تقریباً $61/5 \text{ cm}$ است. ابعاد باکس پرتودهی $7/7 \times 8/1 \times 89/7 \text{ cm}^3$ می‌باشد. بیشینه شار نوترون سریع با توجه به محاسبات انجام شده، در ارتفاع روبه‌روی قلب یعنی در ارتفاع 10 cm در فاصله از 5 cm تا 15 cm نزدیکی قلب قرار دارد (این ارتفاع بهینه نسبت به مرکز ارتفاع صفحه سوخت در قلب است) که مقدار بیشینه آن تقریباً $4 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2.\text{s}$ می‌باشد. البته قابل ذکر است مقادیر شار نوترون به موقعیت میله‌های کنترل و فاصله تا مرکز قلب بستگی دارد که هر چه فاصله از مرکز قلب کمتر باشد، مقادیر آن بالاتر خواهد بود. در این محاسبات، مقدار خطای شار نوترون سریع حاصل از کد کمتر از ۱٪ است و از کتابخانه ENDF/VII موجود در کد استفاده شده است.

همان‌طوری که در مقاله بیان شد، مقدار فلوننس نوترون موردنیاز برای تولید این حسگر $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ می‌باشد. بنابراین با توجه به بیشینه شار نوترون سریع حدوداً $1 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2.\text{s}$ برای کانال F۸ رآکتور تهران محاسبه شده، لذا حداقل مدت زمان مورد نیاز جهت پرتودهی پیوسته نمونه‌های الماس در داخل قلب رآکتور تهران، ۲۳۲ روز است.

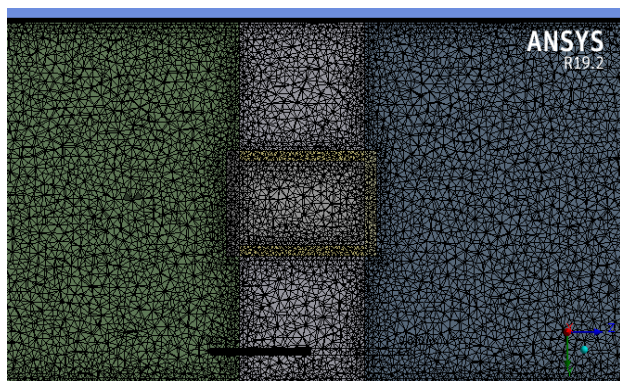


شکل ۴. مقادیر شار نوترون سریع برای کانال‌های مختلف پرتودهی در رآکتور تحقیقاتی تهران.





شکل ۷. هندسه کن آلومینیمی و نمونه الماس در کانال رآکتور تهران.



شکل ۸. شبکه‌بندی کن آلومینیمی و نمونه الماس به همراه کانال آب اطراف آن.

جریان داخل کانال بر اساس سرعت متوسط خنک‌کننده در رآکتور تهران که 0.02 m/s است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. از آنجایی که سرعت در کانال‌های پرتودهی پایین‌تر از سرعت متوسط خنک‌کننده می‌باشد، لذا سرعت 0.02 m/s بر ثانیه برای این کانال در نظر گرفته شده است. کانتور دما (الف)، خطوط جریان در اطراف کن (ب) و خطوط جریان در خروجی کانال پرتودهی (ج)، در جریان ورودی با سرعت 0.02 m/s بر ثانیه در شکل ۹ نشان داده شده است.

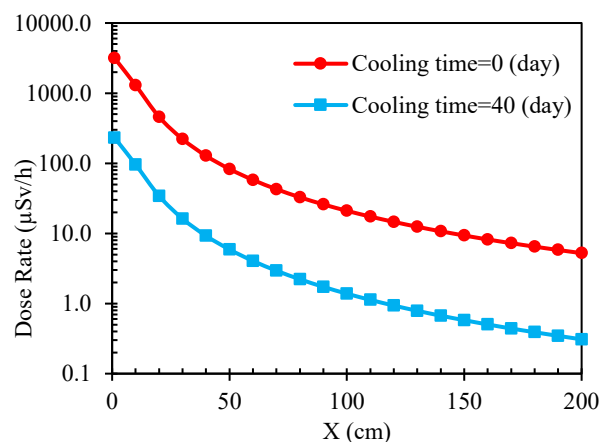
دمای ورودی به کانال 311 K در نظر گرفته شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد بیشینه دما در با سرعت کانال 0.02 m/s به 402 K می‌رسد و با توجه به این که دمای تغییر شکل آلومینیم در حدود 770 K است [۱۶]، به لحاظ حرارتی مشکلی در نمونه کن آلومینیمی ایجاد نخواهد کرد.

تابش‌دهی حدود $3/2 \text{ mSv/h}$ به‌دست آورده شده است که در مقایسه با مقادیر نتایج تجربی بسیار کمتر می‌باشد. دلایل خطا می‌تواند موارد متعددی باشد من جمله، اکتیو شدن ظرف نمونه با وجود آلومینیم، خطای محاسبات، تفاوت در محل اندازه‌گیری، خطای دزیمتر و شخص اندازه‌گیری‌کننده، خطای در مقدار توان رآکتور، مدت زمان دقیق پرتودهی و شرایط فیزیکی دیگر برای مثال، اکتیویته شدن تجهیزات حمل نمونه موجود در قلب رآکتور روی نرخ دز کل است.

۳.۳ محاسبه دمای نمونه در هنگام تابش‌دهی

جهت انجام محاسبات ترموهیدرولیکی و دما با کد ANSYS نقاط مختلف نمونه، ابتدا هندسه کن آلومینیمی، نمونه الماس و کانال آب اطراف آن مشخص گردید و سپس در یک کانال پرتودهی قرار داده شد. قابل ذکر است ابعاد داخلی کن شامل ۲ سانتی‌متر قطر و ۳ سانتی‌متر ارتفاع است و نمونه الماس تا ارتفاع ۲ سانتی‌متری در داخل کن قرار داده شده است و ۱ سانتی‌متر باقی‌مانده، هوا در نظر گرفته شده است. هندسه ایجاد شده در شکل ۷ نشان داده شده است. در ایجاد شبکه، لایه‌های مرزی و میزان $Y+$ مورد توجه قرار گرفته و همچنین مطالعات شبکه نیز با چند بار افزایش تعداد مش انجام شده است.

لازم به ذکر است پارامترهای کیفیت شبکه مانند اورتوگونالیتی و غیره نیز در این کار تحقیقاتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین، جریان به صورت آشفته بوده و معادلات پیوستگی، ممثوم، توربولنس و حرارت به طور هم‌زمان برای این مورد حل گردیده‌اند. مدل آشفته $k-\epsilon$ در نظر گرفته شده و حل تا هم‌گرایی کامل دنبال شده است. شکل ۸ شبکه‌بندی کن آلومینیمی و کانال آب اطراف آن را نشان می‌دهد.



شکل ۶. نمودار افت آهنگ دز نمونه الماس در فواصل مختلف بر اساس زمان خنک‌شوندگی.



۴.۳ محاسبه پارامتر شبکه

برای شناسایی فازهای موجود در یک ماده به کمک الگوهای XRD، حداقل نیاز به ۲ یا ۳ پیک قابل تشخیص می‌باشد. الگوی XRD نمونه تهیه شده برای نمونه الماس قبل از پرتودهی در شکل ۱۰ به دست آمده است. با اندازه‌گیری زاویه پراش صفحه‌های کریستالی مختلف از روی نمودار XRD، فاصله بین صفحه‌های کریستالی (d) از رابطه براگ به دست می‌آید. با داشتن d، ثوابت شبکه با کمک روابط مربوطه قابل محاسبه است. برای تعیین دقیق ثوابت شبکه باید در الگوی XRD، پیک‌هایی که در زوایای بالاتر قرار دارند را نیز لحاظ کرد. به این ترتیب ثوابت اندازه‌گیری شده به مقادیر واقعی نزدیک‌تر خواهند بود.

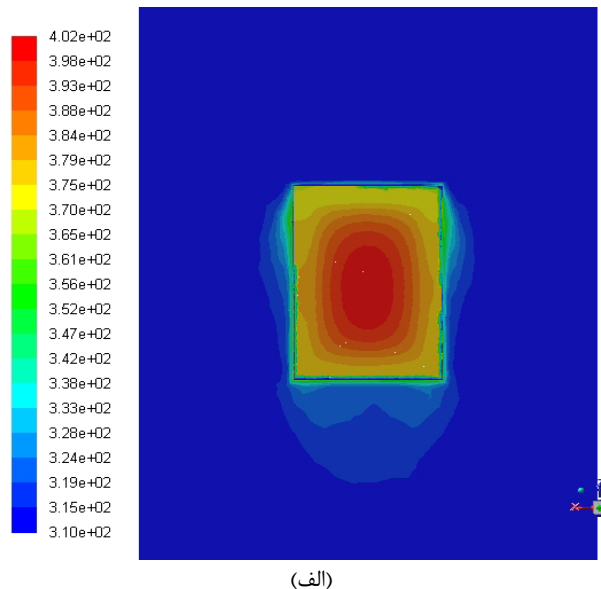
اما ثبت یک پیک در زوایای بالا غالباً امکان‌پذیر نیست. برای مثال، در روش پراش‌سنجی معمولاً شمارشگر تنها در محدوده زاویه تا 160° حرکت می‌کند. روش متداول این است که مقادیر ثابت شبکه برحسب 2θ رسم شود و نمودار به دست آمده تا زاویه 180° ادامه داده شود تا مقدار ثابت شبکه تا زاویه 180° نیز به دست آید. اما از آنجا که نمودار به دست آمده خطی نیست، برون‌یابی دقیق منحنی به نحو فوق امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا می‌توان مقدار ثابت شبکه را به جای 2θ برحسب تابعی از θ رسم کرد به طوری که نمودار به صورت خط مستقیم درآید.

شکل ۱۰ الگوی پراش اشعه ایکس نمونه الماس را نشان می‌دهد. دو پیک در زاویه‌های حدود $2\theta = 44^\circ$ و $2\theta = 75^\circ$ شناسایی شد. با استفاده از اندیس‌های میلر (رابطه ۲) مربوط به الماس که در حدود $2\theta = 44^\circ$ برابر با (۱۱۱) و در حدود $2\theta = 75^\circ$ برابر با (۲۲۰) می‌باشد، α یا پارامتر شبکه توسط رابطه (۳) که در جدول ۲ نشان داده شده، به دست آورده می‌شود. جهت به دست آمدن پارامتر شبکه از روش مجذور جمع مربعات استفاده می‌شود. در نتیجه مقدار پارامتر شبکه به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

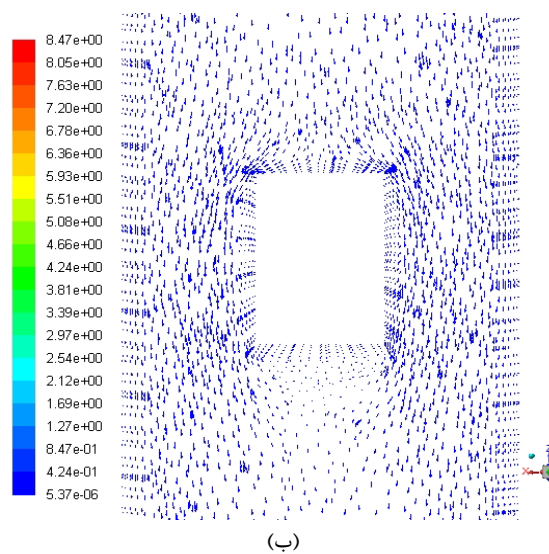
برای سلول واحد مکعبی، پارامترهای شبکه عبارتند از: $a=b=c$ و $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ ؛ بنابراین، حجم سلول واحد مکعبی $V=\alpha^3$ خواهد بود.

$$V=(3/5544)^3=44/9054 (\text{\AA})$$

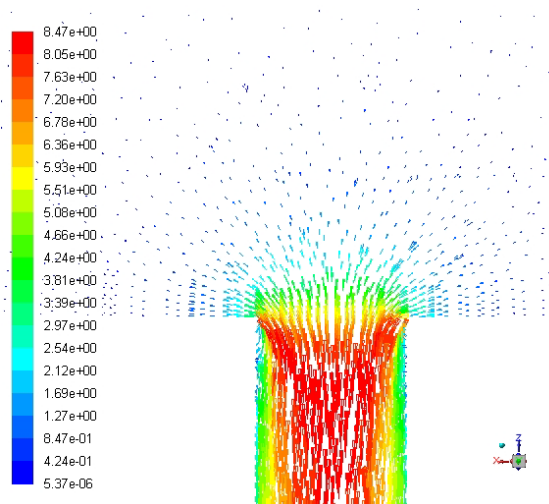
بنابراین پارامتر شبکه و حجم سلول واحد قبل از پرتودهی محاسبه شده و با نتایج حجم سلول و پارامتر شبکه بعد از پرتودهی مقایسه شده و در نهایت میزان تغییرات پارامتر شبکه در اثر تابش برحسب دما و زمان به دست آورده می‌شود.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. الف) کانتور دما، ب) خطوط جریان در اطراف کن، ج) خطوط جریان در خروجی کانال پرتودهی، در جریان ورودی با سرعت ۰/۰۲ متر بر ثانیه.



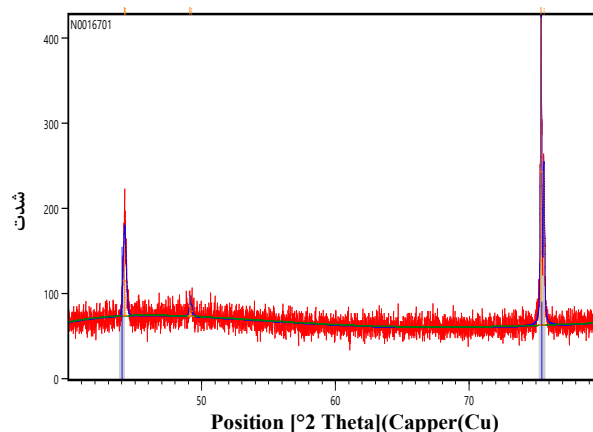
می‌توان گفت برای رسیدن به مقدار فلوئنس نوترون $2 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2$ ، با توجه به بیشینه شار نوترون سریع حدود $1 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ ، مدت زمان مورد نیاز جهت پرتو دهی پیوسته نمونه الماس در داخل قلب رآکتور تهران، حداقل ۲۳۲ روز می‌باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از گروه بهره‌برداری رآکتور تحقیقاتی تهران جهت پرتو دهی نمونه الماس در داخل قلب رآکتور و از آزمایشگاه مواد در مرکز فردو به منظور به دست آوردن طیف XRD نمونه‌ها همکاری نموده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

- Volinsky A.A, Nikolaenko V, Morozov V, Timoshenko V. Irradiated Single Crystals for High Temperature Measurements in Space Applications. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 2004;851.
- Rai V.K. Temperature sensors and optical sensors. *Applied Physics B*. 2007;88:297-303. DOI: 10.1007/s00340-007-2717-4.
- Kuryachiy V.G. Irradiated single crystal 3C-SiC as a maximum temperature sensor. 2008. DOI: 10.1557/PROC-792-R5.3.
- Haile E, Lepkowski J. Oscillator circuits for RTD temperature sensors. *Application note AN8, Microchip Technology Inc*. 2004;21-22.
- Volinsky A, Ginzburysky L. Irradiated cubic single crystal SiC as a high temperature sensor. *Materials Research Society Symposium Proceedings*. 2004;273-278. DOI: 10.1063/1.1389523.
- Nikolaenko V, Karpukhin V. Temperature measurement by means of irradiated materials. 1986.
- Sprouster D.J, Koyanagi T, Dooryhee E, Ghose S, Katoh Y, Ecker L.E. Microstructural evolution of neutron irradiated 3C-SiC. *Scripta Material*. 2017 Aug;137:132-136. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.02.030>.
- Devanathan R, Weber W, Gao F. Atomic scale simulation of defect production in irradiated 3C-SiC. *Journal of Applied Physics*. 2001;90:2303-2309.
- Raafat A. Radiation Damage of Diamond and its Application to The Determination of the Temperature in Pile. *Nuclear Research Institute. BeS near Prague*. 1977.
- Pelowitz D, Goorley T, James M, Zukaitis T. MCNP6TM User's Manual, Version 1.0. *Los Alamos National Laboratory report LA-CP-13-2013*; 00634.



شکل ۱۰. الگوی پراش اشعه ایکس نمونه الماس قبل از پرتو دهی.

جدول ۲. مقادیر اندازه‌گیری شده d ، 2θ و α_0

d	2θ	α_0
۱٫۲۵۹۶۲	۷۵٫۴۰۰۷	۳٫۵۶۲۷۴۳
۲٫۰۴۶۲۸	۴۴٫۲۲۶۵	۳٫۵۴۴۲۶۱
۲٫۰۴۷۸۹	۴۴٫۱۸۹۹	۳٫۵۴۷۰۵
۱٫۲۵۹۹۱	۷۵٫۳۸۰۶	۳٫۵۶۳۵۶۴

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، بر اساس مدارک، اسناد و گزارش‌های معتبر مطالعه شده، ماده الماس به عنوان ماده حسگر بلوری بیشینه دما به صورت غیرتماسی انتخاب شد. کاربرد این حسگرها این است که 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.

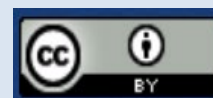
در ادامه، شبیه‌سازی قلب رآکتور و محاسبات مربوط به شار نوترون به منظور پیدا نمودن شار سریع بیشینه و کوتاه شدن زمان پرتو دهی انجام شد. همچنین محاسبات نرخ دز جهت پیش‌بینی مقدار اکتیویته پس از پرتو دهی در داخل کانال با کدهای مورد نظر انجام گرفت و نتایج نشان می‌داد که با گذشت حدود ۴۰ روز میزان نرخ دز کل و اکتیویته نمونه به شدت کاهش می‌یابد. علاوه بر این، نتایج محاسبات دمایی نشان می‌دهد که چنانچه بیشینه دما در کمترین سرعت کانال ۴۰۲ کلین باشد و با توجه به این که دمای تغییر شکل آلومینیم در حدود ۷۷۰ کلین است، به لحاظ حرارتی مشکلی در نمونه کن آلومینیمی ایجاد نخواهد کرد. همچنین بر اساس نتایج تست XRD پارامتر شبکه و حجم سلول واحد محاسبه شد. در نهایت



11. Croff A.G. User's manual for the ORIGEN2 computer code. [Oak Ridge National Lab](#). 1980.
12. ANSYS-Fluent. ANSYS CFD-Solver Manager User's Guide. [Release](#) 19.2, 2021.
13. Krishna R, Wade J, Jones A.N, Lasithiotakis M, Mummery P.M, Marsden B.J. An understanding of lattice strain, defects and disorder in nuclear graphite. [Carbon](#).2017;124:314-333. DOI:10.1016/j.carbon.2017.08.070.
14. Atul Sheth A.T. Uniform Crystal Temperature Sensor (Ucts) Application to Validation, [Verification and Technical Comparison Processes](#). 2015. DOI:10.1115/GT2012-68197.
15. Meijer G.C, Wang G, Fruett F. Temperature sensors and voltage references implemented in CMOS technology. [IEEE Sensors Journal](#). 2001;1:225-234. DOI:10.1109/JSEN.2001.954835.
16. Du Z, Deng Z, Cui X, Xiao A. Deformation behavior and properties of 7075 aluminum alloy under electromagnetic hot forming. [Materials](#) 14. 2021;17:49-54. DOI. 10.3390/ma14174954.

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

حسن زاده، مصطفی، امیرخانی دهکردی، محمدامین، رحیمیان، عارف، اسدی اسدآبادی، محسن. (۱۴۰۴)، محاسبات و آنالیز پارامترهای مؤثر جهت تولید نمونه الماس به عنوان حسگر بلوری بیشینه دما. مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای، ۱۱۱(۱)، ۹-۱. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1635>

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1635.html

