



مقایسه کندکننده آب سنگین و گرافیت به منظور آرایش (دوپینگ) سیلیکون در راکتور تحقیقاتی تهران

کاردان، محمدرضا - غلامزاده، زهره* - باورنگین، الهام - جزویری، عطیه - کاسه ساز، یاسر - عزتی، ارسلان - صادقی، ناهید - علیزاده، فاطمه

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

ناخالص‌سازی سیلیکون به روش NTD یکی از مهمترین استفاده‌های تجاری راکتورهای تحقیقاتی است ضمن اینکه نیمه رسانای تولید شده به این روش از کیفیت بسیار بالاتری نسبت به روش شیمیایی برخوردار است. به دلیل اهمیت تولید این نیمه رسانا پرکاربرد در صنعت الکترونیک، موجب گردید پتانسیل تولید آن در راکتور تحقیقاتی تهران مورد بررسی قرار گیرد. کد محاسباتی MCNPX با قابلیت ترابرد نوترون و مدلسازی راکتور به منظور بررسی‌های تئوری پرتودهی کریستال سیلیکون مورد استفاده قرار گرفت. به جهت حفظ برخی از پارامترهای نوترونی مهم، حضور کندکننده زیاد اطراف کانال پرتودهی کریستال مهم است. لذا دهانه ستون حرارتی راکتور تهران برای این امر انتخاب شد و تاثیر دو ماده گرافیت و آب سنگین در هندسه دهانه مقایسه شد. نتایج نشان داد هرچند انتهای دهانه آب سنگین، نسبت شار حرارتی به سریع بسیار مطلوب تر از دهانه گرافیتی است ولی تنها افزایش حدود ۲۲٪ شار نوترون حرارتی و نیز تولید تریتیوم در آب سنگین، استفاده آن را نسبت به گرافیت چندان قابل توجه نمی‌سازد.

کلمات کلیدی: راکتور تحقیقاتی تهران، آرایش سیلیکون، آب سنگین، گرافیت، کد MCNPX

Comparison of heavy water and graphite moderators for silicon doping in Tehran research reactor

M. R. Kardan, Z. Gholamzadeh*, E. Bavarnegin, A. Joz-Vaziri, Y. Kasesaz, A. Ezati, N. Sadeghi, F. Alizadeh

Abstract

Silicon doping by NTD method is one of the most important commercial uses of research reactors, while the semiconductor produced by this method has a much higher quality than the chemical method. Due to the importance of producing this widely used semiconductor in the electronics industry, its production potential in Tehran research reactor was investigated. The MCNPX computational code with neutron transport capability and reactor modeling was used to investigate theoretically the silicon crystal irradiation. In order to maintain some important neutron parameters, the presence of a large moderator around the crystal irradiation channel is important. Therefore, the thermal column orifice of Tehran research reactor was selected for this purpose and the effect of graphite and heavy water on the orifice geometry was compared. The results showed that although the end of the heavy water orifice, the ratio of thermal to fast flux is much more favorable than the graphite, but only because of an increase of about 22% of the thermal neutron flux and the production of tritium in heavy water, its use compared to graphite is not significant.

Keywords: Tehran Research Reactor, Silicon doping, Heavy Water, Graphite, MCNPX Code

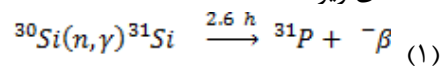
Email: cadmium_109@yahoo.com

۱. مقدمه

نیمه‌رساناها در درون کامپیوترها، دستگاه‌های عکس برداری پزشکی، باتری خورشیدی، سلول‌های فوتولتائیک، و پخش‌کننده‌ها استفاده می‌شوند. سیلیکون در تولید بسیاری از نیمه‌هادی‌ها کاربرد دارد [۱]. نیمه‌رسانای غیر ذاتی با آلابیدن نیمه‌رسانای چهار ظرفیتی با یک عنصر سه یا پنج ظرفیتی پدید می‌آید. برای رسیدن به مقاومت الکتریکی مطلوب نیمه‌هادی‌های مورد استفاده در صنایع، نیاز به اضافه کردن ناخالصی در حدود ۱ الی ۱۰ ppm اتم‌های سیلیکون می‌باشد.

از سال ۱۹۷۰ میلادی^۱ NTD سیلیکون به طور گسترده‌ای برای تولید سیلیکون نیمه‌هادی دارای مقاومت یکنواخت برای ساخت قطعات الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفته است. ایده تولید نیمه‌رساناها با مقاومت کاملاً یکنواخت توسط روش NTD در ابتدا توسط لارک هولیتز در سال ۱۹۵۱ میلادی ارائه شد [۲].

NTD سیلیکون بر اساس واکنش هسته‌ای زیر است:



توزیع یکنواخت فسفر در نمونه کریستال سیلیکون و همچنین امکان کنترل دقیق شار نوترون می‌تواند در دستیابی به همگنی مقاومت مشخص شده در محصول نهایی تاثیرگذار باشد. در روش مرسوم، ناخالص‌سازی سیلیکون با افزودن ناخالصی‌ها در هنگام رشد کریستال انجام می‌شود. در بیشتر موارد، این رویه‌ها منجر به توزیع ناهمگن ناخالصی‌ها (^{31}P) در کریستال می‌شود، به عنوان نمونه، دوپینگ معمولی نوع n (تزریق فسفر) منجر به عدم یکنواختی زیاد دوپینگ تا ۵۰٪ می‌شود [۲]. در روش NTD، همگن بودن محصول نهایی به عوامل زیر بستگی دارد: (۱) یکنواختی کریستال رشد داده شده اولیه (۲) تفاوت بین غلظت نهایی و اولیه ناخالصی‌ها (۳) یکنواختی شار نوترون در راکتور (۴) ابعاد و قطر کریستالهای سیلیکون [۳]. به دلیل برتری ویژگی‌های نیمه‌رسانای تولید شده به روش NTD، بین سال‌های ۱۹۷۴ و ۱۹۷۶ میلادی روش NTD توسط تعدادی از راکتورهای تحقیقاتی در ایالات متحده، انگلیس و دانمارک بکار گرفته شد و به سرعت مقدار سیلیکون تابش شده به چندین تن رسید [۴].

در راکتورهای تحقیقاتی، مکانهای مختلفی برای انجام آرایش سیلیکون طراحی و ساخته شده است. برخی از راکتورها از تانک آب سنگین برای انجام بهتر فرایند فوق استفاده می‌کنند. در ادامه مروری بر برخی راکتورهایی که دارای کندکننده آب سنگین هستند و یا تانک آب سنگین به منظور این فرایند طراحی کرده‌اند، ارائه خواهد شد. از جمله راکتورهایی که دارای کندکننده آب سنگین است و فرایند آرایش سیلیکون را انجام می‌دهد می‌توان به راکتور FMR II کشور آلمان اشاره کرد که دارای توان حرارتی ۲۰ MW می‌باشد. در این راکتور پرتودهی کریستال با قطر تا ۲۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر انجام می‌شود. به منظور افزایش همگنی شعاعی دوپینگ، کریستال در طول پرتودهی با فرکانس ۵ دور در دقیقه چرخانده می‌شود. نتیجه حاصل نشان می‌دهد حداکثر ناهمگنی شار در امتداد محور کریستال ۱۲٪ و در راستای شعاعی زیر ۳٪ بود. برای برطرف کردن این ناهمگنی محوری از جاذب نیکل در امتداد طول کریستال در کانال پرتودهی استفاده می‌شود. در این راکتور در کریستالها مقاومت‌های در محدود $20 \Omega\text{cm}$ تا $1100 \Omega\text{cm}$ ایجاد می‌شوند [۵].

راکتور ۲۰ مگاوات اپال^۲ در استرالیا دارای شش کانال پرتودهی عمودی در مخزن بازتابنده آب سنگین با قطر ۵ اینچ (یک کانال)، ۶ اینچ (سه کانال) و ۸ اینچ (دو کانال) برای تابش‌دهی سیلیکون است که حدود ۲۵ تن در سال سیلیکون آرایش شده تولید می‌کند شارنوترون حرارتی این راکتور در محدوده $(1/6 \times 10^{13} - 1/7 \times 10^{12} \text{ n/scm}^2)$

¹ Neutron Transmutation Doping

² OPAL

است که پرتودهی‌ها را با محدوده زمانی ۳ ساعت الی ۲ روز (به منظور حصول کیفیت مورد نظر) امکان پذیر می‌سازد. راکتور ۶۰ مگاوات CARR چین نیز در شار نوترون حرارتی $10^{14} \times 1/0$ در یک تانک آب سنگین کریستاله‌های سیلیکون ۳، ۴ و ۵ اینچ را پرتودهی می‌کند و ظرفیت تولید آن حدود ۵۰ تن در سال است. همچنین راکتور ۱۴ مگاوات ORPHEE فرانسه در تانک آب سنگین کریستاله‌های سیلیکون ۶ اینچ را با سرعت چرخش شعاعی ۲ دور بر دقیقه در شار نوترون حرارتی $10^{13} \times 1/0$ به مدت ۲ الی ۲۰ ساعت جهت حصول مقاومت مورد نظر پرتودهی می‌کند. ظرفیت تولید این راکتور حدود ۱۰ تن بر سال است [۴].

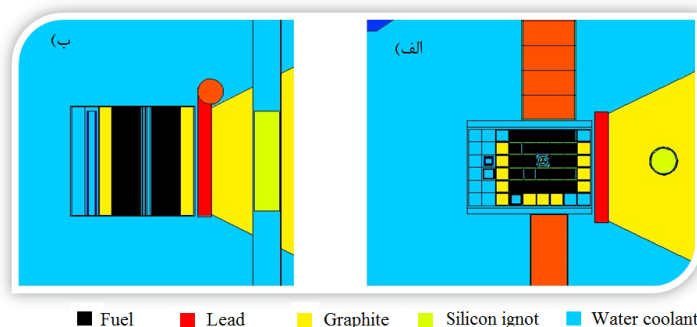
در پرتودهی کریستال‌های سیلیکون، یکنواختی شار دریافتی اهمیتی بسزایی دارد و لازم است اختلاف شار بیشینه و کمینه در راستای شعاعی و یا محوری کریستال تقسیم بر شار کمینه دریافتی کریستال کمتر از ۱۰٪ باشد؛ این فاکتور اصطلاحاً ARV نامیده می‌شود. در واقع هرچه شار محوری و شعاعی یکنواخت‌تر باشد امکان دستیابی به این فاکتور ساده‌تر خواهد بود. همچنین مطلوب است نسبت شار نوترون حرارتی به سریع بیش از ۱۰ برابر باشد و هرچه این نسبت بزرگتر باشد، آسیب‌های پرتویی نوترون سریع درون کریستال کمتر بوده و نیاز به آنیلینگ کریستال بعد پرتودهی را برطرف می‌سازد [۶].

از آنجائیکه در محل انجام فرایند آرایش سیلیکون مطلوب است کندکننده زیادی موجود باشد و نیز شار نوترون سریع در این محل کم باشد، یکی از بهترین مکانها در راکتور تحقیقاتی تهران، دهانه ستون حرارتی است. لذا در این کار، قبل از طراحی یک تانک آب سنگین به لحاظ موجود بودن دهانه گرافیتی جهت پرتودهی کریستاله‌های سیلیکون در این قسمت، مقایسه بین دهانه آب سنگین و گرافیت (هندسه یکسان و ماده کندکننده متفاوت) هدف قرار گرفته است.

۲. روش کار

کد محاسباتی MCNPX قادر به ترابرد ۳۴ نوع ذره از جمله ذرات نوترون و فوتون است. این کد محاسباتی قادر است انواع مسائل راکتور و شتابدهنده‌ها را مدل‌سازی کرده و با همخوانی خوبی نسبت به اندازه‌گیری‌های تجربی رفتار نوترونیکی و یا پرتوزایی آنها را مشخص نماید [۷].

لذا در این کار از کد MCNPX برای مدلسازی قلب راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ MW است که مطابق شکل ۱ توسط این کد محاسباتی شبیه‌سازی شده است.

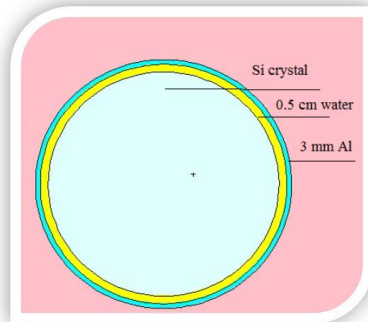


شکل ۱. شبیه‌سازی محل پرتودهی کریستال سیلیکون در محل دهانه ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران (الف) نمای افقی قلب (ب) نمای عمودی قلب

در واقع کد محاسباتی MCNPX با در دست داشتن کتابخانه سطح مقطع برهمکنش‌های مختلف نوترون با مواد مختلف در انرژی‌های مختلف نوترون و نیز کتابخانه واپاشی ایزوتوپها، نیمه عمر رادیوایزوتوپهای مختلف، ثوابت واپاشی، ماتریس‌های رزنانس و غیره با روش مونت کارلو به محاسبه احتمال برخورد، نشت و یا جذب یک نوترون ضمن ترابرد آن در محیط هندسه شبیه‌سازی شده می‌پردازد و به صورت آماری پس از محاسبات فوق با توجه به

روابط و فرمول‌هایی که در برنامه خود دارد شار نوترون و یا گرمای بجای مانده را در هر بخش از ماده و هندسه قلب مدلسازی شده محاسبه می‌کند.

در شکل ۲ کریستال سیلیکون تعبیه شده در دهانه ستون حرارتی نشان داده شده است. قطر این کریستال ۶ اینچ و ارتفاع آن ۶۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. این کریستال درون یک قوطی آلومینیومی با ضخامت بدنه ۳ میلی متر در نظر گرفته شده است و برای خنک سازی آن بین کریستال و بدنه قوطی ۰/۵ سانتی متر آب قرار داده شده است.

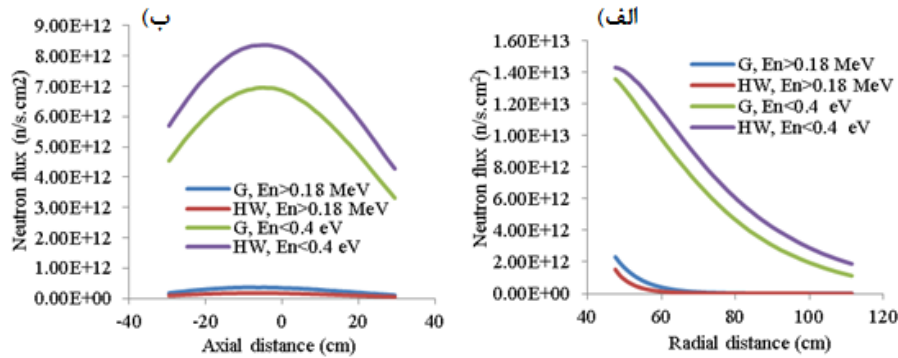


شکل ۲. سطح مقطع کریستال سیلیکون مدل سازی شده توسط کد MCNPX

در ادامه، محل مناسب کریستال سیلیکون به منظور افزایش نسبت شار حرارتی به شار سریع، کاهش گرمای بجای مانده ناشی از ذرات نوترون و گاما درون کریستال و نیز حفظ شار حداقلی $1 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ با فرض دهانه گرافیتی و سپس دهانه آب سنگین تعیین گردید. در ابتدا، برای محاسبات شار نوترون درون کریستال از قابلیت مش تالی کد MCNPX استفاده شد و توزیع شار نوترون محوری و شعاعی در دو گروه $E_n < 0.4 \text{ eV}$ و $E_n > 0.18 \text{ MeV}$ به عنوان نماینده های گروه انرژی حرارتی و سریع به ترتیب بررسی شد. فاصله مرکز کریستال سیلیکون از مرکز قلب درون دهانه ستون حرارتی به ترتیب ۷۰، ۸۰، ۹۰، و ۱۰۰ انتخاب شد که مکان ۱۰۰ cm انتهای دهانه ستون حرارتی است و فراتر رفتن از آن امکان پذیر نیست. پس از تخمین مکان مناسب کریستال، بررسی توزیع شار محوری و شعاعی نوترون در گروه های انرژی مختلف نیز بررسی شد. برای محاسبات گرمای بجای مانده درون کریستال از قابلیت تالی F6 کد محاسباتی استفاده شد. در نهایت مکان مناسب کریستال به جهت برآورده کردن مفروضات مطلوب بیان شده در قبل و نیز ماده کندکننده مناسب پیشنهاد گردید.

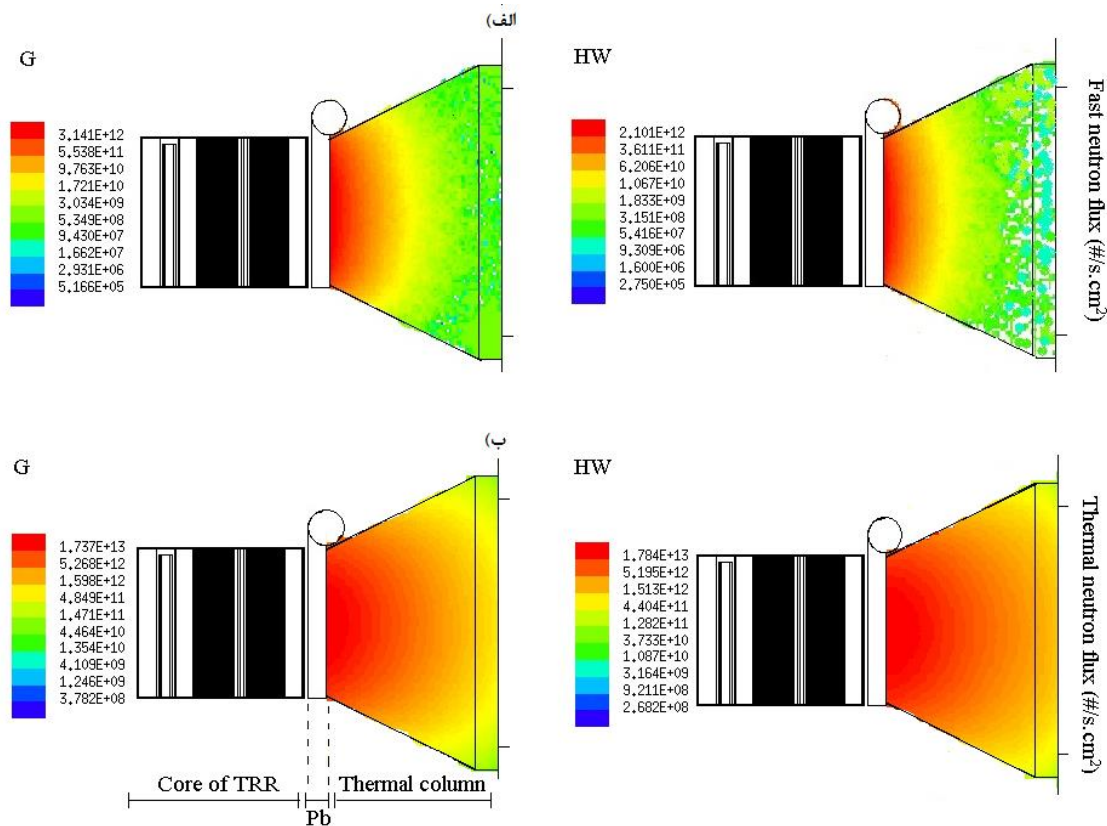
۳. نتایج

ابتدا توزیع شار نوترون حرارتی ($E_n < 0.4 \text{ eV}$) درون دهانه گرافیتی و آب سنگین محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد (شکل ۳). همچنانکه در شکل دیده می شود می شود، میانگین شار نوترون حرارتی حدود ۰/۴۰٪ در آب سنگین بیشتر از گرافیت است.



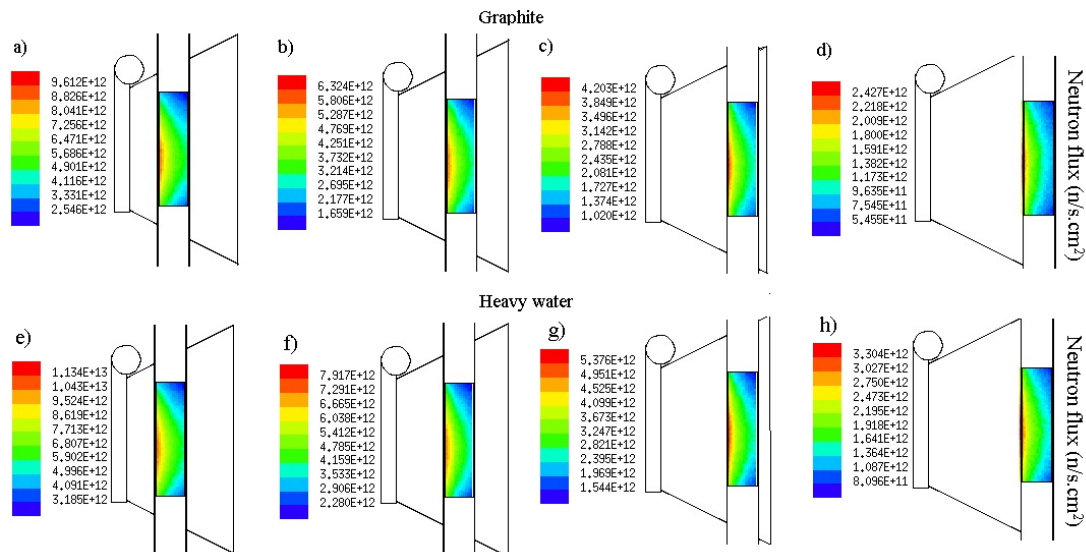
شکل ۳. مقایسه توزیع شار نوترون حرارتی ($En < 0.4 \text{ eV}$) و سریع ($En > 0.18 \text{ MeV}$) در دهانه آب سنگین (HW) و گرافیتی (G) (الف) توزیع عرضی کانال (ب) توزیع محوری کانال

در شکل ۴، توزیع شار نوترون حرارتی ($En < 0.4 \text{ eV}$) و سریع ($En > 0.18 \text{ MeV}$) درون دهانه گرافیتی و آب سنگین با هم مقایسه شده است. همچنانکه شکل نشان می‌دهد، شدت شار نوترون حرارتی در طول دهانه آب سنگین حفظ می‌شود و یا به عبارتی کاهش شدت آن به کندی اتفاق می‌افتد. همچنین شدت شار نوترون سریع در آب سنگین در همان قسمت‌های اولیه دهانه به شدت کاهش می‌یابد لذا به آسانی می‌توان حدس زد در قسمت‌های انتهایی دهانه آب سنگین نسبت شار حرارتی به سریع بسیار بیشتر در مقایسه با گرافیت ایجاد گردد که در ادامه محاسبه این کمیت در مکانهای مختلف دهانه انجام و با دهانه گرافیتی مقایسه خواهد شد.



شکل ۴. مقایسه توزیع دوبعدی شار نوترون حرارتی ($En < 0.4 \text{ eV}$) و سریع ($En > 0.18 \text{ MeV}$) در دهانه آب سنگین (HW) و گرافیتی (الف) توزیع نوترون سریع (ب) توزیع نوترون حرارتی

در شکل ۵، توزیع محوری شار نوترون حرارتی درون کریستال سیلیکون به طول ۶۰ cm در موقعیت‌های ۷۰ cm، ۸۰، ۹۰، و ۱۰۰ از مرکز کریستال تا مرکز قلب راکتور با توجه به دو ماده دهانه گرافیتی و آب سنگین با یکدیگر مقایسه شده است. همچنانکه در شکل دیده می‌شود برای هر دو دهانه گرافیتی و آب سنگین، با دور شدن از مرکز قلب توزیع شار حرارتی محوری یکنواخت‌تری درون کریستال ایجاد خواهد شد؛ پر واضح است که این موضوع به دلیل ضخامت بیشتر کندکننده در جهت لبه‌های کریستال اتفاق می‌افتد. با این حال درو شدن از مرکز قلب شار نوترون حرارتی میانگین را تا حدود ۴ برابر (مقایسه مکان ۷۰ cm و ۱۰۰ cm) در مورد گرافیت و حدود ۳ برابر در مورد ماده آب سنگین کاهش می‌دهد که این موضوع به معنی ۳ یا ۴ برابر شدن زمان پرتودهی است.



شکل ۵. توزیع شار نوترون حرارتی ($E_n < 0.4 \text{ eV}$) محوری درون کریستال سیلیکون به طول ۶۰ cm در موقعیت‌های به ترتیب ۷۰ cm، ۸۰، ۹۰، و ۱۰۰ دهانه حرارتی از مرکز قلب (a الی d) دهانه گرافیتی و (e الی h) دهانه آب سنگین

پارامتر دیگری که در پرتودهی سیلیکون دارای اهمیت است، نسبت شار نوترون حرارتی به سریع و یا به عبارتی میانگین انرژی نوترونها درون کریستال است. همچنانکه در قبل اشاره شد، هرچه نسبت شار نوترون حرارتی به سریع بیشتر باشد و یا میانگین انرژی نوترونها درون کریستال کمتر باشد به لحاظ کاهش آسیب پرتویی کریستال مطلوب تر است. در جدول ۱ پارامترهای مهم مدنظر پرتودهی کریستال سیلیکون در موقعیت‌های مختلف ۷۰، ۸۰، ۹۰، و ۱۰۰ با یکدیگر مقایسه شده است. همچنانکه نتایج محاسبات نشان می‌دهد در هر موقعیت شار نوترون حرارتی در ماده آب سنگین حدود ۲۲٪ بیشتر از ماده گرافیت است. در موقعیت‌های نزدیک انتهای دهانه ستون حرارتی، نسبت شار نوترون حرارتی به سریع بیشتر خواهد بود و به لحاظ کاهش آسیب‌های پرتویی مطلوب تر است. محاسبات نشان می‌دهد در مکان ۱۰۰ cm در مورد سیلیکون با طول ۶۰ cm فاکتور AVR محوری در مورد دهانه گرافیتی ۶۴٪ و در مورد دهانه آب سنگین ۳۸٪ است. هرچند که در دهانه آب سنگین، نسبت شار نوترون حرارتی ($E_n < 0.4 \text{ eV}$) به سریع ($E_n > 0.18 \text{ MeV}$) به ویژه در موقعیت‌های دور از قلب (مکانهای انتهایی دهانه) حدود ۴ برابر بیشتر از دهانه گرافیت است، تریتیوم تولید شده در آب سنگین یک معضل اساسی در استفاده از آب سنگین است. زیرا طبق محاسبات کد MCNPX پس از ۱۸۲۵ MWD (معادل ۲ سال کار راکتور در توان ۵ MW) حدود ۱۲۰ Ci تریتیوم درون دهانه با ماده آب سنگین تولید می‌شود در ضمن حفظ درجه خلوص آب سنگین در طول کارکرد راکتور نیز یکی از مسائل دیگر مطرح در زمینه استفاده از آب سنگین است. هنگامی که مکان پرتودهی سیلیکون دور از قلب در نظر گرفته شود، گرمای بجای مانده درون کریستال سیلیکون نیز کمتر خواهد بود. همچنانکه جدول ۱ نشان می‌دهد

گرمای حاصل از برهمکنش های نوترون درون کریستال بسیار کمتر (قابل صرف نظر کردن) از برهمکنش های گاما است همچنین در مکانهای دور از قلب به عنوان مثال مکان ۹۰ cm گرافیت این گرما به کمتر از ۱۰۰ W می رسد. لذا نقص های شبکه به واسطه گرمای ناشی از برهمکنش ذرات درون کریستال کاهش خواهد یافت.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای نوترونی مهم در آرایش سیلیکون در موقعیت های مختلف دهانه ستون حرارتی

مکان (cm)	میانگین شار نوترون حرارتی (n/s.cm ²)	نسبت شار حرارتی به سریع	میانگین انرژی نوترون (eV)	گرمای ناشی از نوترون (W)	گرمای ناشی از گاما (W)
۷۰ G	$4/8 \times 10^{12}$	۶/۱	۱۱۵	۲/۸۲	۲۰۹
۷۰ HW	$5/7 \times 10^{12}$	۱۲/۶	۶۲	۱/۴۶	۲۵۵
۸۰ G	$3/05 \times 10^{12}$	۱۳/۷	۵۸	۰/۷۸	۱۳۲
۸۰ HW	$3/88 \times 10^{12}$	۲۸	۲۴	۰/۳۵	۱۷۱
۹۰ G	$1/90 \times 10^{12}$	۳۳	۲۹	۰/۲۱	۸۴
۹۰ HW	$2/6 \times 10^{12}$	۱۲۵	۱۰	۰/۱۰	۱۱۵
۱۰۰ G	$9/9 \times 10^{11}$	۱۱۵	۱۱	۰/۰۴	۴۳
۱۰۰ HW	$1/5 \times 10^{12}$	۶۴۰	۳	۰/۰۳	۶۷

G: Graphite HW: Heavy Water

در راکتور WWR-K ۶ مگاواتی، در کریستال سیلیکون پرتودهی شده با فلوننس $4 \times 10^{11} \text{ n/cm}^2$ به مدت ۴ ساعت ویفرهایی با مقاومت های $400 \Omega \text{ cm}$ تولید شده است. در محل پرتودهی این کریستال نسبت فلوننس نوترون حرارتی به سریع بیش از ۱۲ و سرعت چرخش شعاعی کریستال حدود ۲ rpm بوده است [۸].
با صرف زمان حدود ۸ ساعت در مکان ۹۰ cm درون دهانه گرافیتی می توان به فلوننس راکتور WWR-K دست یافت. ضمن اینکه این مکان به لحاظ نسبت شار نوترون حرارتی به سریع نسبت به راکتور WWR-K وضعیت بسیار بهتری دارد. همچنین دستیابی به ظرفیت پرتودهی حداقل ۱ تن در سال در مکان ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران با توجه به پرتودهی ۳ عدد کریستال در هر ماه به خوبی قابل پیش بینی است.

۴. بحث و نتیجه گیری

از آنجائیکه دوپینگ سیلیکون در بسیاری از راکتورهای با توان مشابه یا حتی کمتر از راکتور تحقیقاتی تهران با ظرفیت بالایی در حال انجام است، در این پژوهش امکان سنجی این کاربری مهم راکتور تحقیقاتی تهران مورد توجه قرار گرفته است. ستون حرارتی راکتور از لحاظ ایجاد نسبت شار نوترون حرارتی به سریع بالا در محل پرتودهی کریستال سیلیکون مکان مناسبی برای انجام این فرایند است. در برخی از راکتورهای تحقیقاتی از دهانه ستون حرارتی به منظور پرتودهی کریستال های سیلیکون استفاده می شود و برخی از راکتورها نیز تانک آب سنگین برای انجام این فرایند در نزدیکی قلب راکتور طراحی کرده اند. در این پژوهش در محل هندسه دهانه ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران چهار موقعیت ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ cm نسبت به مرکز قلب برای پرتودهی کریستال سیلیکون ۶ in با ارتفاع ۶۰ cm با استفاده از کد MCNPX شبیه سازی شد. همچنین در هندسه دهانه ستون حرارتی، تاثیر نوترونیک دو ماده گرافیت و آب سنگین با یکدیگر مقایسه شد. نتایج محاسبات نشان می دهد در هر موقعیت، شار نوترون حرارتی ماده آب سنگین حدود ۲۲٪ بیشتر از گرافیت است. هرچند که نسبت شار نوترون حرارتی به سریع حدود ۴ برابر در

موقعیت های انتهایی دهانه آب سنگین نسبت به گرافیت بسیار مطلوب است ولی تولید حدود 120 Ci تریوم پس از چند سال درون آب سنگین، استفاده آن را محدود می سازد. لذا موقعیت 90 cm گرافیت به دلیل حفظ شار حداقلی $1 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ و نسبت شار حرارتی به سریع بزرگتر از 10 برای انجام فرآیند آلیایش سیلیکون در دهانه ستون حرارتی پیشنهاد می گردد.

۵. مراجع

۱. علی یادبروقی، نیمه رساناها و کاربردهای آنها، www.prozhe.com، (۱۳۹۸).
2. M.S. Schnoller *Breakdown behavior of rectifiers and thyristors made from striation-free silicon*, IEEE Trans. on Elec. Dev. **21**, 313 (1974).
3. S. Sheibani, et al., *Investigation of a simple and efficient method for silicon neutron transmutation doping process in Tehran research reactor*, Annal. Of Nucl. Energ. **29**, 1195 (2002).
4. Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, (IAEA-TECDOC, ISSN. 1011-4289; no.1681, 2012).
5. H. Gerstenberg and I. Neuhaus, A brief overview of the research reactor FRM II, International Symposium on the Peaceful Applications of Nuclear Technology in the GCC Countries, Jeddah (2008).
6. Silicon transmutation doping techniques and practices, (International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Otwock-Swierk, Poland, 20-22 Nov, 1985).
7. D.B. Pelowitz, Users' manual versión of MCNPX2.6.0, (LANL, LA-CP-07-1473, 2008).
8. N. Takemoto et al., Irradiation Test with Silicon Ingot for NTD-Si Irradiation Technology, (JAEA-Technology, 2015).