

امکان سنجی بهینه سازی پرتو دهی سنگ توپاز به منظور کاهش پرتوزایی آن‌ها در راکتور

تحقیقاتی تهران

INC29-1297

سید سعید موسوی^{۱*}، حمید جعفری^۱، محمد رضا کاردان^۲، زهره غلامزاده^۲

۱. کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران- ایران

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵۱۳۳۹، تهران- ایران

چکیده:

پرتو دهی سنگ توپاز، یکی از کاربردهای تجاری راکتور تحقیقاتی می‌باشد. یکی از موارد بهینه سازی سنگ توپاز، استفاده از باریکه‌ی نوترونی است. برای عمل بهبود بخشی و تغییر رنگ سنگ توپاز، نوترون سریع مورد نیاز است و عامل فعال سازی ناخالصی‌ها در سنگ توپاز و همچنین پرتوزا شدن آن‌ها، نوترون حرارتی می‌باشد. برای کاهش پرتوزایی توپاز، باید میزان شار نوترون‌های حرارتی با وجود فیلترهای جاذب این نوع نوترون کاهش یابد. در این پژوهش، دیواره-ی ظرف پرتو دهی حاوی توپاز از جنس آلومینیوم و در حالت دیگر از جنس آلومینیوم و سرب به ضخامت‌های ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و میزان شار نوترون‌ها و گرمای بجای مانده ناشی از نوترون و گاما در ظرف حاوی توپاز توسط کد MCNPX در دو کانال پرتو دهی در مرکز قلب و حاشیه‌ی قلب محاسبه گردیده است. به عنوان نمونه در هنگام استفاده از سرب به همراه آلومینیوم در دیواره‌ی ظرف، میزان شار نوترون حرارتی و گرمای بجای مانده ناشی از گاما کاهش می‌یابد و در یکسری از حالت‌ها، به میزان ۱۰٪ تا ۲۰٪ تغییر یافته است.

کلیدواژه‌ها: توپاز، بهبود بخشی، پرتو دهی، کاهش پرتوزایی، کد MCNPX

Feasibility of optimization of Topaz radiation in order to reduce the activity of Topaz stones in Tehran research Reactor

S. S. Mousavi^{1*}, Hamid Jafari¹, M. R. Kardan², Zohreh Gholamzadeh²

1. Application of rays, Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, P.O.BOX:1983969411, Tehran, Iran.

2.Reactor and Nuclear Safety Research Institute, Atomic Energy Organization, P.O.BOX:141551339, Tehran, Iran.

Abstract:

Irradiation of topaz is one of the commercial applications of the research reactor. One of the ways to optimize topaz stone is the use of a neutron beam. Fast neutrons are needed for improving and changing the color of topaz stone, and thermal neutrons are the factors that activate impurities in topaz stone and also make them radioactive. In order to reduce topaz radioactivity, the amount of thermal neutron flux should be reduced with filters absorbing this type of neutron. In this research, the wall of the radiation container containing topaz is made of aluminum and in another case made of aluminum and lead with thicknesses of 1, 2 and 3 mm, and the amount of neutron flux and residual heat caused by neutron and gamma in the container containing topaz, it has been calculated by the MCNPX code in two radiation channels in the center of the core and the periphery of the core. For example, when using lead along with aluminum in the container wall, the amount of thermal neutron flux and residual heat caused by gamma decreases and in some cases, it has changed by 10% to 20%.

Keywords : Topaz, Improvement, Irradiation, Reduction of radiation, MCNPX code

۱. مقدمه

به طور کلی، نام گوهر یا سنگ های قیمتی برای دسته‌ای از کانی‌ها به کار برده می‌شود که با داشتن برخی از ویژگی‌ها از قبیل زیبایی، سختی، دوام و شفافیت از سایر مواد معدنی و سنگ‌ها متمایز می‌شود. تقاضا برای سنگ‌های قیمتی و نیمه قیمتی از جمله سنگ توپاز با رنگ‌ها و وضوح بهتر و ایده‌آل‌تر از آنچه تامین می‌کند، گروهی را به وجود آورده است که راه‌کارهایی را برای بهبود بخشی ظاهر و ارتقای کیفیت رنگ و استحکام سنگ‌ها جستجو کنند و به روش‌هایی دست پیدا کنند. برخی از این عمل‌های بهبود بخشی پایدار هستند و برخی دیگر ناپایدار. سنگ توپاز بعد از عمل بهبود بخشی و تغییر رنگ، قیمت بالاتری نسبت به حالت قبل از پرتودهی خواهد داشت. عمل بهبود بخشی سنگ‌ها، به هر عملیات یا فرآیندی به جز برش و پولیش گفته می‌شود که طی آن، ظاهر سنگ‌های قیمتی مثل رنگ، وضوح، سختی و ارزش آن‌ها ارتقا پیدا می‌کند [۱]. این تغییر رنگ به واسطه‌ی بمباران نوترونی یا پرتوهای گامای حاصل از قلب راکتور هسته‌ای و یا الکترون‌های پر انرژی تولیدی از شتابدهنده و یا به صورت ترکیبی از آن‌ها ایجاد می‌شود. تغییر و تقویت رنگ توسط نوترون‌ها، رنگ آبی عمیق‌تری نسبت به تابش دهی با گاما و یا الکترون در سنگ‌های توپاز ایجاد می‌کند و از این نظر نوترون‌ها برای تابش دهی بهتر هستند [۲].

راکتورهای تحقیقاتی، تولید کننده‌ی نوترون می‌باشند و این نوترون‌ها در محدوده‌ی انرژی حرارتی، فوق حرارتی و سریع هستند. برای عمل بهبود بخشی، به نوترون‌های سریع نیاز داریم تا این فرآیند به درستی انجام شود و رنگ سنگ‌های توپاز تغییر کند اما در حین عمل پرتودهی، نوترون‌های حرارتی سنگ‌های توپاز را پرتوزا می‌کند [۴]. یکی از مواردی که باعث تغییر رنگ در سنگ‌های توپاز می‌شود، وجود مراکز رنگی در سنگ‌ها می‌باشد. مراکز رنگی عبارت است از، یک نقص در شبکه‌ی ساختاری کریستال که به طور کلی توسط گرمای شدید یا تابش تولید می‌شود. در حالت کلی، دو نوع مرکز رنگ وجود دارد که عبارت‌اند از: مرکز رنگ الکترون و مرکز رنگ حفره. این نوترون‌های سریع باعث ایجاد نقصی در شبکه‌ی کریستالی شده و مراکز رنگی را ایجاد می‌کند و باعث تغییر رنگ و عمل بهبود بخشی سنگ‌های توپاز می‌شود [۳].

یکی دیگر از مواردی که در تغییر رنگ و پایداری رنگ سنگ‌های توپاز تاثیر گذار خواهد بود، دما می‌باشد. دمای سنگ‌ها در طول مدت پرتودهی باید کمتر از ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد و باید به این نکته دقت شود که دمای در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، باعث خراب شدن سنگ‌ها شده و یا سنگ‌ها می‌شکنند و یا بی رنگ می‌شوند. بنابراین لازم است خنک‌کنندگی مناسبی، در حین پرتودهی فراهم شود تا دمای سنگ‌ها در حین پرتودهی در حدود ۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد حفظ شود. حد مجاز اکتیویته سنگ‌های توپاز برابر ۷۴ بکرل بر گرم (۲ نانوکوری بر گرم) می‌باشد [۴].

در راکتورهای تحقیقاتی کشورهای دیگری از قبیل: مصر، قزاقستان، برزیل، اندونزی، ازبکستان و تایلند و ... عمل پرتودهی سنگ‌های توپاز را انجام می‌دهند. در راکتور ETRR-۲ مصر، از ظرف‌های آلومینیومی برای پرتودهی سنگ‌های توپاز استفاده می‌کنند که درون این ظرف‌ها، توپازهایی به جرم ۴-۶ کیلوگرم قرار می‌گیرند. برای کاهش نوترون‌های حرارتی در درون ظرف‌ها، از فیلتر کاربرد بور یا مواد حاوی بور دار استفاده می‌کنند. بور -۱۰ سطح مقطع جذب نوترون‌های حرارتی بالایی دارد. در راکتور ETRR-۲ مصر، اگر برای پرتودهی سنگ‌های توپاز فیلتر جاذب نوترون‌های حرارتی وجود داشته باشد، پرتوزایی توپازها بعد از گذشت ۶-۱۸ ماه به کمتر از حد مجاز می‌رسد و اگر بدون فیلتر جاذب نوترون‌های حرارتی باشند، بعد از گذشت ۲۰-۲۹ ماه، پرتوزایی توپازها به کمتر از حد مجاز می‌رسد [۵].

در راکتور WWR-K قزاقستان، از یک ظرف شبیه به کپسول استفاده شده است که دیواره‌ی آن از جنس آلایژی از آلومینیوم می‌باشد. ارتفاع حجم مفید این ظرف برابر ۵۰ میلی‌متر و قطر مفید آن هم برابر با ۴۶ میلی‌متر می‌باشد. در دیواره‌ی درونی ظرف از فیلترهای کاربرد بور و کادمیوم، برای کاهش شار نوترون‌های حرارتی استفاده شده است و میزان شار نوترون‌های حرارتی را تا حد ممکن کاهش داده است [۶].

راکتور TRR-۱ / M۱ تایلند هم، برای پرتودهی و تقویت رنگ سنگ‌های توپاز استفاده می‌شود. در این راکتور، توپاز-های بی رنگ را درون ظروف استوانه‌ای قرار می‌دهند و جنس دیواره‌ی ظرف از آلومینیوم می‌باشد و برای فیلتر

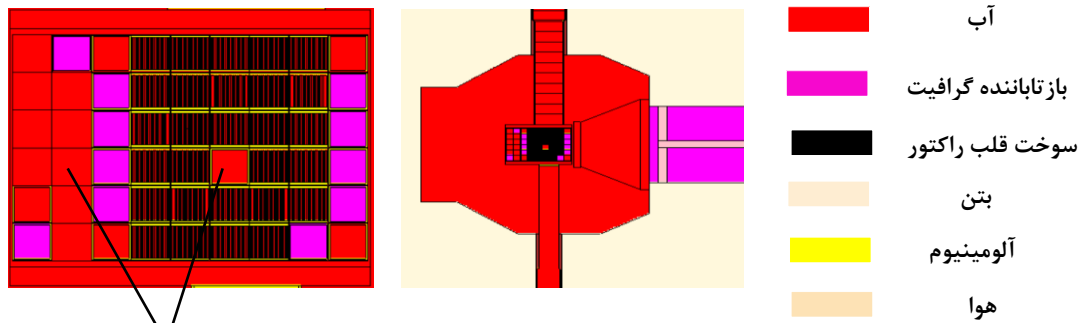
نوترون‌های حرارتی از کادمیوم استفاده شده است. میزان شار برابر $\frac{n}{cm^2s}$ 10^{11} می‌باشد. میزان قرارگیری توپازها در ظرف برای پرتودهی برابر ۳۰۰ گرم می‌باشد و به مدت ۱۲-۷۲ ساعت درون قلب راکتور پرتودهی می‌شوند [۷]. فرمول شیمیایی سنگ توپاز به صورت $Al_2SiO_4(F, OH)_2$ می‌باشد [۵]. عناصر اصلی موجود در سنگ توپاز، آلومینیوم، سیلیکون، اکسیژن و فلوئور می‌باشند که نیمه عمری در حدود چند دقیقه و چند ثانیه دارند. نوترون‌های حرارتی، عناصر اصلی را پرتوزا می‌کند اما به دلیل اینکه نیمه عمر کوچکی دارند، با گذشت حداقل ۵ مرتبه از نیمه عمر آن‌ها عملاً خطر پرتوزایی، شامل این‌ها نمی‌شود. در حالت کلی، سنگ‌های توپاز علاوه بر عناصر اصلی که نام برده شد، یکسری ناخالصی‌هایی دارند که نوع این ناخالصی‌ها با توجه به انواع سنگ‌های توپاز، متفاوت خواهند بود. این ناخالصی‌ها، نیمه عمر طولانی‌تری دارند که نوترون‌های حرارتی، این ناخالصی‌ها را فعال کرده و باعث پرتوزایی سنگ‌های توپاز می‌شوند. با توجه به نیمه عمرهای طولانی یکسری از ناخالصی‌ها و پرتوزا شدن سنگ‌های توپاز، سبب می‌شود که سنگ‌ها امکان تحویل سریع را به مصرف کننده نداشته باشند و باید مدت زمان زیادی صرف شود و این سنگ‌ها در انبار با حفاظ مشخص و مناسبی نگه داری شوند تا پرتوزایی سنگ‌ها به حد مجاز برسند که این هزینه بر می‌باشد و صرفه‌ی اقتصادی ندارد و باید طبق روشی، این سنگ‌های توپاز در راکتور تحقیقاتی تهران توسط نوترون‌های تولیدی در این راکتور، پرتودهی شوند که پس از گذشت زمان کمتری، پرتوزایی سنگ‌ها به حد مجاز برسد و بتوان این سنگ‌ها را در بازار عرضه نمود. برای پرتودهی سنگ‌های توپاز، باید از روشی استفاده نمود که شار نوترون‌های سریع تولیدی ثابت بماند و شار نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی تا حد امکان کاهش یابد. فرآیند پرتودهی سنگ‌های توپاز به صورت صنعتی، در راکتور تحقیقاتی تهران در حال اجرا می‌باشد. هدف و نوآوری از این پژوهش، دستیابی به روشی مناسب با شرایط راکتور تحقیقاتی تهران برای کاهش پرتوزایی سنگ‌های توپاز و دستیابی به روشی مناسب جهت خنک‌سازی سنگ‌های توپاز در حین پرتودهی برای حفظ رنگ آن‌ها می‌باشد و توپازها پس از پرتودهی و صرف زمان کمتری وارد بازار می‌شوند و می‌تواند باعث پیشرفت این صنعت در ایران شود.

۲. مواد و روش کار

۲.۱. مشخصات قلب راکتور تحقیقاتی تهران

راکتور تحقیقاتی هسته‌ای تهران از نوع استخری است که قلب مرکزی این راکتور، در عمق ۸ متری استخر با ظرفیت ۵۰۰ هزار لیتر آب سبک قرار دارد. کند کننده و خنک کننده این راکتور تحقیقاتی آب سبک است و برای مقاصد تحقیقاتی، آموزش، پرتودهی و تولید رادیو دارو مورد استفاده قرار می‌گیرد. استخر بتونی و مملو از آب سبک از دو قسمت تشکیل شده است، که قلب راکتور می‌تواند در هر یک از آن دو قسمت مورد بهره برداری قرار گیرد. در دیواره‌ی یکی از این دو قسمت، تجهیزات آزمایشگاهی نظیر ۷ عدد بیم تیوب با سطح مقطع‌های مختلف، تیوب‌های پنوماتیکی ربیت و نیز ستون حرارتی قرار گرفته‌اند. به علاوه، امکان تابش دهی نمونه در محفظه‌های مخصوص تابش دهی درون قلب و حاشیه‌ی قلب وجود دارد. بازتابنده این نوع راکتور از نوع گرافیتی و دارای سوخت جامد غیر همگن از نوع صفحه‌ای می‌باشد. قلب راکتور دارای المان‌های سوختی از نوع MTR می‌باشد که داخل صفحه‌ی مشبکی قرار گرفته است. روی صفحه ۵۴، جایگاه برای قرار گیری مجتمع‌های سوخت به طور منظم و با آرایش مستطیلی 6×9 تعبیه شده است. با قرارگیری مجتمع‌های سوخت در محل خود روی این صفحه، مجموعه قلب تشکیل می‌شود. سوخت این راکتور از نوع اکسید اورانیوم با غنای پایین (LEU) است که شامل المان‌های سوخت استاندارد (SFE) با ارتفاع $61/5$ سانتی‌متر می‌باشد. هر دو نوع المان سوخت، دارای صفحات سوخت از جنس $U_3O_8 - Al$ با غنای ۲۰٪ می‌باشد که در نوع SFE، ۱۹ صفحه سوخت و در نوع CFE، ۱۴ صفحه سوخت قرار می‌گیرد. هر المان CFE شامل دو تیغه کنترلی از جنس Ag-In-Cd است که جهت کنترل رآکتیویته قلب و تنظیم شار نوترون به کار می‌روند. هر صفحه سوخت نیز از لایه سوخت و غلاف تشکیل شده است به طوری که لایه سوخت درون غلاف قرار دارد. غلاف به صورت محکم و غیرقابل نفوذ، آب بندی می‌شود و بدین ترتیب باعث جدایی سوخت و خنک کننده می‌شود. در اطراف قلب تعدادی بازتابنده‌ی گرافیتی، جهت کاهش نشت نوترونی از قلب قرار داده شده است. شکل ۱، چیدمان قلب را به

همراه موقعیت‌های مختلف برای پرتودهی و همچنین صفحات سوختی و گرافیت باکس که توسط کد MCNPX شبیه سازی شده است، نشان می‌دهد.



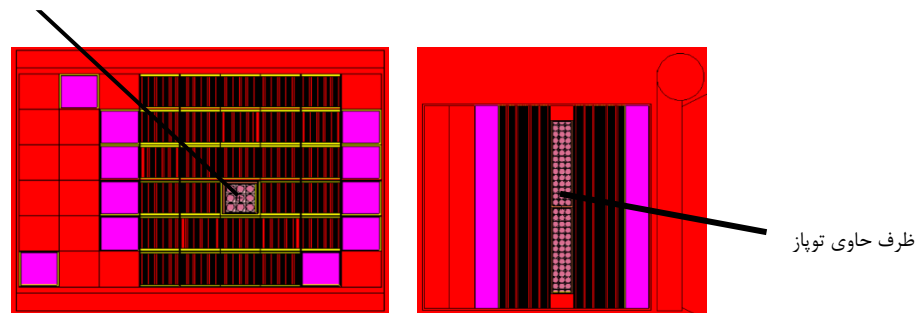
شکل ۱. چیدمان قلب راکتور به همراه موقعیت‌های مختلف برای پرتودهی. کانال پرتودهی

۲.۲. توصیف و مدل سازی کانال پرتودهی در کد MCNPX

برای پرتودهی سنگ‌های توپاز، دو عدد ظرف مکعب مستطیل به ابعاد $۶ \times ۶ \times ۲۷$ سانتی‌متر در نظر گرفته و جنس دیواره‌ی این ظرف‌ها از آلومینیوم می‌باشد و سنگ‌های توپاز به ابعاد $۰/۹۷$ سانتی‌متر و $۰/۴۴$ سانتی‌متر به شکل کروی درون این ظرف‌ها توسط کد MCNPX شبیه سازی شده است. ضخامت این دیواره‌ی آلومینیومی در همه‌ی حالت‌ها ۲ میلی‌متر می‌باشد و ظرف‌ها به صورت عمودی بر روی هم در کانال‌های پرتودهی قرار می‌گیرند و تابش دهی می‌شوند. در حالت دیگر، علاوه بر اینکه دیواره‌ی ظرف‌ها از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر می‌باشد، از سرب هم در دیواره استفاده نموده و ابعاد فیلتر سربی که بر روی آلومینیوم قرار می‌گیرد به ترتیب، ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر می‌باشد. محاسبات شار نوترونی برای سه گروه انرژی زیر انجام شده است و همچنین انرژی بر جای مانده در سنگ‌ها محاسبه شده است :

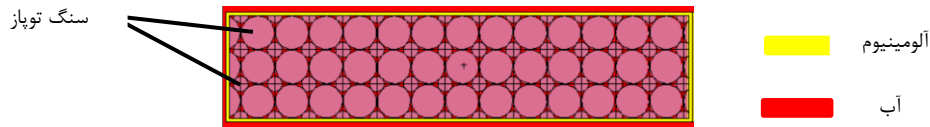
- ۰ - ۰/۴ الکترون ولت (حرارتی)
- ۰/۴ الکترون ولت - ۱ کیلو الکترون ولت (فوق حرارتی)
- ۱ کیلو الکترون ولت - ۲۰ مگا الکترون ولت (سریع)

شکل ۲. نشان دهنده‌ی ظرف حاوی توپاز در کانال پرتودهی در مرکز قلب راکتور. ظرف حاوی توپاز



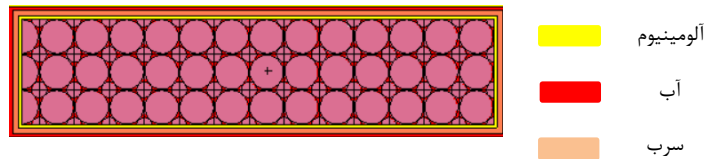
شکل ۲. نمایی از ظرف پرتودهی (حاوی توپاز و آب) در کانال پرتودهی در مرکز قلب.

شکل ۳. نشان دهنده‌ی ظرف حاوی توپاز می‌باشد. در کانال پرتوده‌ی، دو ظرف به صورت عمودی بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند. دیواره‌ی این نوع ظرف فقط حاوی آلومینیوم می‌باشد.



شکل ۳. ظرف پرتوده‌ی حاوی توپاز و آب با دیواره‌ی آلومینیومی.

شکل ۴. نشان دهنده‌ی ظرف حاوی توپاز که دیواره‌ی ظرف علاوه بر آلومینیوم، دارای سرب هم می‌باشد. در این شکل، ضخامت سرب برابر ۳ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۴. ظرف پرتوده‌ی حاوی توپاز و آب با دیواره‌ی آلومینیومی و سربی.

با کمک کد MCNPX، برای محاسبه‌ی میانگین شار حجمی نوترون‌های حرارتی، فوق حرارتی و سریع از تالی F4 و از کارت E4 برای بازه بندی انرژی نوترون‌ها استفاده شده است. در ادامه برای محاسبه‌ی انرژی بجای مانده از تالی F6 استفاده شده است. تالی‌های مورد نظر بر روی دو ظرف حاوی توپاز که به صورت عمودی و ایستاده بر روی یکدیگر قرار می‌گیرند، گرفته شده است.

۳. نتایج

با توجه به توضیحات بخش روش کار، توزیع شار برای محدوده‌ی انرژی نوترون حرارتی، نوترون فوق حرارتی و نوترون سریع محاسبه شده است. ظرف‌های حاوی توپاز در دو کانال پرتوده‌ی قرار گرفته‌اند که یکی از این کانال‌ها در مرکز قلب و دیگری در حاشیه‌ی قلب راکتور می‌باشد و در شکل ۱، کانال‌های پرتوده‌ی نشان داده شده است. در نتایج بدست آمده، دیواره‌ی ظرف حاوی توپاز یکبار آلومینیوم با ضخامت ۲ میلی‌متر و بار دیگر بر روی آلومینیوم، سرب به ضخامت‌های متوالی ۱ و ۲ میلی‌متر و در یک مرحله هم دیواره ظرف از جنس آب در نظر گرفته شده است. در هر کدام از این حالت‌ها، توزیع شار نوترون‌ها و گرمای بجای مانده در سنگ‌ها توسط کد MCNPX محاسبه شده است و در ادامه نتایج مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرند. برای محاسبه‌ی میانگین شار حجمی نوترون‌ها از کارت تالی F4 و برای بازه بندی انرژی نوترون‌ها از کارت E4 و برای محاسبه‌ی انرژی بجای مانده از کارت تالی F6 استفاده شده است.

جدول ۱ و جدول ۲، میزان شار نوترون‌ها را در کانال پرتوده‌ی مرکز قلب راکتور نشان می‌دهد. میزان شار نوترون حرارتی برای هر دو ظرف در نظر گرفته شده برای حالتی که دیواره از آلومینیوم و سرب به ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد نسبت به ضخامت‌های دیگر کمتر است و نسبت به حالت بدون دیواره، حدود ۱۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است.

جدول ۱. توزیع شار نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتوده‌ی مرکز قلب راکتور.

ضخامت جنس دیواره دیواره (mm)	شار نوترون حرارتی-۱ $(\frac{n}{cm^2.s})$	خطا (درصد)	شار نوترون حرارتی-۲ $(\frac{n}{cm^2.s})$	خطا (درصد)	شار نوترون فوق حرارتی-۱ $(\frac{n}{cm^2.s})$	خطا (درصد)	شار نوترون فوق حرارتی-۲ $(\frac{n}{cm^2.s})$	خطا (درصد)
بدون دیواره ۲	$12/5581e+12$	۰/۳۲	$12/2807e+12$	۰/۳۲	$6/3241e+12$	۰/۳۳	$6/1114e+12$	۰/۳۴
Al ۲	$11/5714e+12$	۰/۳۲	$11/5422e+12$	۰/۳۲	$6/4026e+12$	۰/۳۳	$6/2222e+12$	۰/۳۳

بیست و نهمین کنفرانس ملی هسته‌ای ایران

ایران، تهران، دانشگاه شهید بهشتی

۷ اسفندماه ۱۴۰۱

۰/۳۳	$6/274 \cdot e+12$	۰/۳۳	$6/204 \cdot e+12$	۰/۳۲	$11/098 \cdot e+12$	۰/۳۲	$11/025 \cdot e+12$	۳	Al-Pb
۰/۳۳	$6/280 \cdot e+12$	۰/۳۳	$6/278 \cdot e+12$	۰/۳۳	$10/705 \cdot e+12$	۰/۳۳	$10/717 \cdot e+12$	۴	Al-Pb
۰/۳۳	$6/347 \cdot e+12$	۰/۳۳	$6/361 \cdot e+12$	۰/۳۳	$10/322 \cdot e+12$	۰/۳۳	$10/300 \cdot e+12$	۵	Al-Pb

۱: ظرف بالا - ۲: ظرف پایین

میزان شار نوترون‌های سریع هم برای هر دو نوع ظرف، در حالتی که دیواره‌ی ظرف از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر و سرب به ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد، نسبت به ضخامت‌های دیگر بیشتر است.

جدول ۳ و جدول ۴، میزان شار نوترون‌ها را در کانال پرتودهی حاشیه‌ی قلب راکتور نشان می‌دهد. میزان شار نوترون‌های حرارتی برای ظرف بالایی برای دیواره از جنس آلومینیوم و سرب به ضخامت ۲ میلی‌متر و برای ظرف پایینی برای دیواره‌ی آلومینیومی از دیگر حالت‌ها کمتر می‌باشد.

جدول ۲. توزیع شار نوترون‌های سریع در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتودهی مرکز قلب راکتور.

شار نوترون سریع-۲		شار نوترون سریع-۱		جنس دیواره ضخامت دیواره	
خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	(mm)	
۰/۳۹	$4/460 \cdot e+12$	۰/۳۹	$4/654 \cdot e+12$	۲	بدون دیواره
۰/۳۸	$4/594 \cdot e+12$	۰/۳۸	$4/779 \cdot e+12$	۲	Al
۰/۳۸	$4/656 \cdot e+12$	۰/۳۸	$4/646 \cdot e+12$	۳	Al-Pb
۰/۳۸	$4/706 \cdot e+12$	۰/۳۸	$4/687 \cdot e+12$	۴	Al-Pb
۰/۳۸	$4/782 \cdot e+12$	۰/۳۸	$4/800 \cdot e+12$	۵	Al-Pb

۱: ظرف بالا - ۲: ظرف پایین

جدول ۳. توزیع شار نوترون‌های حرارتی و فوق حرارتی در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتودهی حاشیه قلب راکتور.

شار نوترون فوق حرارتی-۲		شار نوترون فوق حرارتی-۱		شار نوترون حرارتی-۲		شار نوترون حرارتی-۱		ضخامت دیواره	
خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	(mm)	جنس دیواره
۰/۶۸	$1/489 \cdot e+12$	۰/۶۹	$1/565 \cdot e+12$	۰/۴۶	$6/275 \cdot e+12$	۰/۴۶	$6/391 \cdot e+12$	۲	بدون دیواره
۰/۶۷	$1/572 \cdot e+12$	۰/۶۷	$1/664 \cdot e+12$	۰/۴۶	$6/272 \cdot e+12$	۰/۴۶	$6/457 \cdot e+12$	۲	Al
۰/۶۶	$1/623 \cdot e+12$	۰/۶۶	$1/648 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/320 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/333 \cdot e+12$	۳	Al-Pb
۰/۶۶	$1/674 \cdot e+12$	۰/۶۶	$1/660 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/323 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/296 \cdot e+12$	۴	Al-Pb
۰/۶۵	$1/742 \cdot e+12$	۰/۶۶	$1/708 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/396 \cdot e+12$	۰/۴۵	$6/342 \cdot e+12$	۵	Al-Pb

۱: ظرف بالا - ۲: ظرف پایین

میزان شار نوترون‌های سریع هم برای هر دو نوع ظرف در حالتی که دیواره‌ی ظرف از جنس آلومینیوم به ضخامت ۲ میلی‌متر و سرب به ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشد، نسبت به ضخامت‌های دیگر بیشتر است.

جدول ۴. توزیع شار نوترون‌های سریع در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتودهی حاشیه قلب راکتور.

شار نوترون سریع-۲		شار نوترون سریع-۱		جنس دیواره ضخامت دیواره	
خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	خطا (درصد)	$(\frac{n}{cm^2 \cdot s})$	(mm)	
۰/۹۲	$8/228 \cdot e+11$	۰/۹۲	$8/642 \cdot e+11$	۲	بدون دیواره
۰/۹۱	$8/555 \cdot e+11$	۰/۹۱	$9/007 \cdot e+11$	۲	Al
۰/۹۰	$8/766 \cdot e+11$	۰/۹۰	$8/679 \cdot e+11$	۳	Al-Pb
۰/۹۰	$8/999 \cdot e+11$	۰/۹۰	$8/770 \cdot e+11$	۴	Al-Pb

۱: ظرف بالا - ۲: ظرف پایین

جدول ۵، گرمای بجای مانده ناشی از نوترون‌ها را در هر دو کانال نشان می‌دهد. میزان گرما برای توپاز در وضعیت ۱ در حالت دیواره آلومینیومی به ضخامت ۲ میلی‌متر و سرب به ضخامت ۱ میلی‌متر و برای وضعیت ۲ و ۳ و ۴ در حالت بدون دیواره کمتر می‌باشد.

جدول ۵. گرمای بجای مانده ناشی از نوترون‌ها در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتودهی مرکز و حاشیه قلب راکتور.

جنس دیواره	ضخامت دیواره (mm)	گرمای ناشی از نوترون-۱ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از نوترون-۲ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از نوترون-۳ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از نوترون-۴ (W)	خطا (درصد)
بدون دیواره	۲	۲/۱۷۳۴e+۲	۰/۲۹	۲/۰۸۷۴e+۲	۰/۲۹	۵/۶۹۵۶e+۱	۰/۵۴	۵/۵۳۵۴e+۱	۰/۵۴
Al	۲	۲/۱۷۷۹e+۲	۰/۲۹	۲/۱۰۱۰e+۲	۰/۲۹	۵/۸۸۱۸e+۱	۰/۵۴	۵/۶۶۱۱e+۱	۰/۵۵
Al-Pb	۳	۲/۱۰۱۴e+۲	۰/۲۹	۲/۱۱۹۴e+۲	۰/۲۹	۵/۷۳۳۳e+۱	۰/۵۳	۵/۷۱۳۳e+۱	۰/۵۳
Al-Pb	۴	۲/۱۱۱۹e+۲	۰/۲۹	۲/۱۱۳۶e+۲	۰/۲۹	۵/۷۵۶۲e+۱	۰/۵۳	۵/۸۴۴۳e+۱	۰/۵۳
Al-Pb	۵	۲/۱۳۴۹e+۲	۰/۲۹	۲/۱۲۴۶e+۲	۰/۲۹	۵/۹۰۸۱e+۱	۰/۵۴	۵/۸۹۹۱e+۱	۰/۵۳

۱: مرکز قلب، ظرف بالا- ۲: مرکز قلب، ظرف پایین- ۳: حاشیه قلب، ظرف بالا

۴: حاشیه قلب، ظرف پایین

جدول ۶ گرمای بجای مانده ناشی از گاماها را در هر دو کانال نشان می‌دهد. میزان گرما برای توپاز در هر ۴ وضعیت در حالت دیواره‌ی آلومینیومی به ضخامت ۲ میلی‌متر و سرب به ضخامت ۳ میلی‌متر کمتر می‌باشد و با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان تاثیر استفاده از سرب در دیواره‌ی ظرف برای کاهش گرمای ایجاد شده در داخل ظرف را متوجه شد و تاثیر بسزایی دارد و با افزایش ضخامت سرب، میزان گرمای بجای مانده کمتر می‌شود.

جدول ۶. گرمای بجای مانده ناشی از گاماها در حالت‌های مختلف از نوع دیواره در کانال پرتودهی مرکز و حاشیه قلب راکتور.

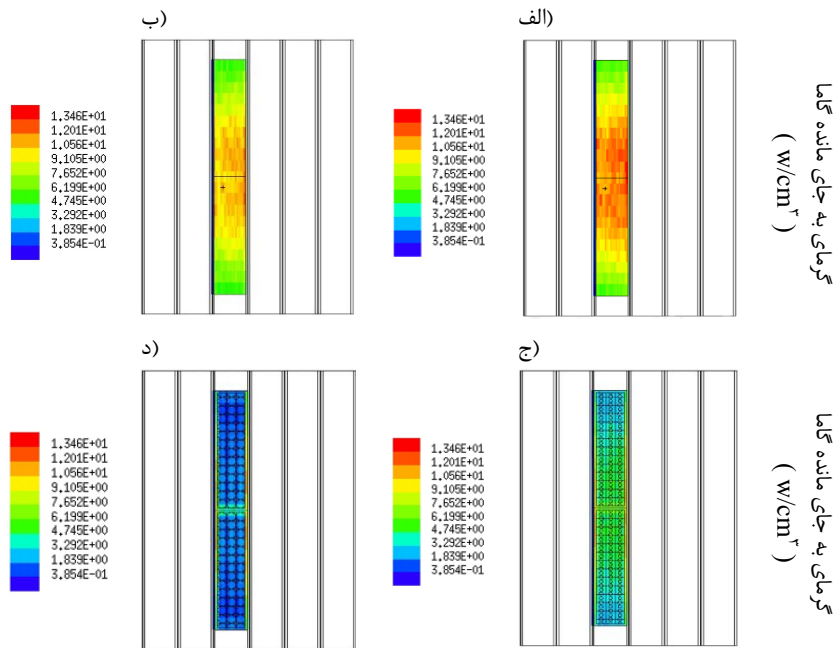
جنس دیواره	ضخامت دیواره (mm)	گرمای ناشی از گاما-۱ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از گاما-۲ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از گاما-۳ (W)	خطا (درصد)	گرمای ناشی از گاما-۴ (W)	خطا (درصد)
بدون دیواره	۲	۱/۵۴۸۱e+۳	۰/۲۴	۱/۴۹۱۷e+۳	۰/۲۴	۶/۶۶۷۴e+۲	۰/۳۶	۶/۴۰۰۹e+۲	۰/۳۶
Al	۲	۱/۵۰۰۳e+۳	۰/۲۵	۱/۴۵۹۹e+۳	۰/۲۵	۶/۶۱۰۵e+۲	۰/۳۶	۶/۳۷۳۷e+۲	۰/۳۶
Al-Pb	۳	۱/۲۷۵۶e+۳	۰/۲۷	۱/۲۸۰۸e+۳	۰/۲۷	۵/۳۵۰۱e+۲	۰/۴۱	۵/۳۵۹۴e+۲	۰/۴۱
Al-Pb	۴	۱/۱۷۱۸e+۳	۰/۲۸	۱/۱۸۱۶e+۳	۰/۲۸	۵/۰۰۹۹e+۲	۰/۴۳	۴/۹۵۸۷e+۲	۰/۴۳
Al-Pb	۵	۱/۰۹۶۱e+۳	۰/۲۹	۱/۰۹۷۵e+۳	۰/۲۹	۴/۷۱۱۳e+۲	۰/۴۴	۴/۷۳۲۱e+۲	۰/۴۳

۱: مرکز قلب، ظرف بالا- ۲: مرکز قلب، ظرف پایین- ۳: حاشیه قلب، ظرف بالا

۴: حاشیه قلب، ظرف پایین

شکل ۵، گرمای بجای مانده گاما را، برای حالتی که دیواره‌ی ظرف فقط حاوی سرب به ضخامت ۵ میلی‌متر می‌باشد، نشان داده می‌شود. در این شکل بخش الف) دیواره‌ی سربی سطح بیرونی ظرف را نشان می‌دهد و میزان گرمایی که روی سطح این دیواره برجای مانده، مشخص است و نسبت به بخش‌های دیگر این شکل، میزان گرما بیشتر می‌باشد. بخش ب) دیواره‌ی سربی سطح بیرونی ظرف در سمت مرکز قلب را نشان می‌دهد که نسبت به بخش الف، میزان

گرمای برجای مانده، کمتر می‌باشد. بخش ج) سطح داخلی ظرف بعد از دیواره‌ی سربی را نشان می‌دهد و میزان گرما در نواحی وسط یعنی در نواحی پایینی ظرف بالایی و در نواحی بالایی ظرف پایینی، بیشتر می‌باشد. بخش د) مرکز ظرف حاوی توپاز را نشان می‌دهد و میزان گرمای بجای مانده در این قسمت نسبت به بخش‌های دیگر نشان داده شده در این شکل کمتر می‌باشد.



شکل ۵. گرمای بجای مانده ناشی از گاما در ظرف حاوی توپاز با دیواره از جنس سرب با ضخامت ۵ میلیمتر.

الف) دیواره سربی ظرف ب) دیواره‌ی سربی ظرف در سمت مرکز قلب ج) سطح داخلی ظرف بعد از دیواره‌ی سربی موقعیت الف د) مرکز ظرف توپاز

۴. نتیجه‌گیری

همانطور که می‌دانیم پرتودهی و بهبود بخشی سنگ توپاز در بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی با توان مشابه و یا حتی کمتر و بیشتر از راکتور تحقیقاتی تهران در حال انجام می‌باشد. در این پژوهش، امکان سنجی این کاربری مهم راکتور تحقیقاتی تهران مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده از کد MCNPX، میزان شار نوترون‌ها در کانال پرتودهی مرکز قلب راکتور تحقیقاتی تهران نسبت به کانال پرتودهی در حاشیه‌ی قلب بیشتر می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده برای حالت‌های مختلف از دیواره‌ی ظرف، در مرکز قلب راکتور برای دیواره‌ی از جنس آلومینیوم و سرب به ضخامت ۳ میلیمتر میزان شار نوترون سریع بیشتر می‌باشد و برای نوترون‌های حرارتی در همین نوع از دیواره میزان شار کمتر می‌باشد و در حدود ۱۵٪ تا ۲۰٪ کاهش یافته است. در حاشیه‌ی قلب برای دیواره‌ی از جنس آلومینیوم و سرب به ضخامت ۳ میلی‌متر، میزان شار نوترون‌های سریع نسبت به ضخامت‌های دیگر بیشتر می‌باشد و برای دیواره از جنس آلومینیوم و سرب به ضخامت ۲ میلی‌متر، میزان شار نوترون حرارتی نسبت به ضخامت‌های دیگر کمتر می‌باشد. برای گرمای بجای مانده ناشی از گاما، برای حالت‌هایی که دیواره‌ی ظرف شامل آلومینیوم و سرب و در حالت دیگر که دیواره فقط شامل سرب می‌باشد، با افزایش ضخامت سرب میزان گرمای بجای مانده در درون ظرف کمتر می‌شود و در حدود ۲۰٪ تا ۴۰٪ تغییر می‌کند و کاهش می‌یابد. می‌توان نتیجه گرفت که وجود سرب در دیواره‌ی ظرف، به عنوان حفاظ پرتوی گاما و کاهش دما و کاهش گرمای بجای مانده در ظرف حاوی توپاز، موثر واقع می‌شود.

۵. مراجع

- محمد کاوه، اندازه‌گیری و مطالعه اثرات پرتو دهی بر تغییر رنگ و ساختار کریستالی سنگ‌ها، ۱۳۹۱ (In persion)
- S. Salama, A.I. Helal and M.A. Goma, Radioactivity of the Treated Topaz, 2012.

3. Shamshad Ahmed, Value addition in diamonds and other gemstones by nuclear radiation: the phobias and safety considerations,2009.
4. Jian Zhang, Taijin Lu, Manjun Wang, and Hua Chen, the radioactive decay pattern of blue topaz treated by neutron irradiation, 2011.
5. Nader M.A. Mohamed, M.A. Gaheen, Design of fast neutron channels for topaz irradiation,2016.
6. A.M. Akhanov, M.T. Aitkulov, D.S. Sairanbayev, Sh.Kh Gizatuln, N.K. Romanova , A. A. Shaimerdenov, Y.V. Chikhray, Zh Ualzhanov, T.K. Zholdybayev, Irradiation capsule design for neutron coloration of topaz in a WWR-K reactor,2022.
7. K. TIYAPUN, N. KLAYSUBAN, S. BOONMARK, C. TIPPAYAKUL ,current status and future challenge of TRR-1/M1 Thai research reactor.