مجله علوم و فنون هسته‌ای، جلد ۱۰۱، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱

Journal of Nuclear Science and Technology
Vol. 101, No. 4, 2022

# طراحی کانال پرتودهی سنگ‌های توپاز و تحلیل نوترونی ـ حرارتی آن در رآکتور تحقیقاتی تهران

**زهرا زارعی[۱]، مسعود امین مظفری*[۲]، سعید محمدی[۱]، مصطفی حسن‌زاده[۲]**

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی: ۴۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران - ایران

۲. پژوهشکده رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

*Email: maminmozafari@aeoi.org.ir

**مقاله‌ی پژوهشی**

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۸/۱۰ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۷

## چکیده

هدف از این تحقیق، طراحی یک جعبه مناسب جهت پرتودهی سنگ‌های جواهراتی توپاز و بهبود پارامترهای نوترونی آن با حفظ شرایط لازم جهت خنک‌شوندگی آن‌ها در رآکتور تحقیقاتی تهران است. در این راستا با تعریف فیلتر نوترونی مناسب و شبیه‌سازی جعبه پرتودهی با استفاده از کد MCNPX۲/۷ در چیدمان قلب، پارامترهای نوترونی قلب محاسبه و بهترین هندسه جهت محاسبات دمایی انتخاب گردید. سپس اجزاء مختلف کانال و جعبه پرتودهی در نرم‌افزار Solidworks شبیه‌سازی و با استفاده از افزونه Flow Simulation آن، محاسبات حرارتی مسأله اجرا شد. نتایج نشان داد که حضور آب در کانال پرتودهی و جعبه سنگ‌ها، با این‌که خنک‌سازی مناسبی برای سنگ‌های توپاز فراهم می‌سازد، اما به دلیل کند کردن نوترون‌های سریع موجب اکتیو شدن شدید سنگ‌ها می‌گردد. در حالی که با استفاده از یک لوپ بسته مستقل از آب استخر رآکتور و به‌کارگیری سیالی گازی مانند هوا، میزان شار نوترون‌های حرارتی و در نتیجه اکتیویته سنگ‌ها کاهش می‌یابد. هم‌چنین نتایج نشان داد که در این حالت با انتخاب سرعت مناسب سیال و تنظیم توان قلب، می‌توان شرایط قابل قبولی جهت پرتودهی طولانی مدت و ایمن سنگ‌ها فراهم نمود.

**کلیدواژه‌ها:** تحلیل نوترونی - حرارتی، نرم‌افزار Solidworks، کد MCNPX، سنگ توپاز، رآکتور تحقیقاتی تهران

# Design of irradiation box of topaz stones and its neutronic and thermal analysis in Tehran Research Reactor

**Z. Zarei[1], M. Amin Mozafari*[2], S. Mohammadi[1], M. Hasanzadeh[2]**

1. Department of Physics, Payame Noor University, P.O.Box: 19395-4697, Tehran – Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran

**Research Article**

Received 1.11.2021, Accepted 26.2.2022

## Abstract

This paper aims to design a suitable irradiation box of topaz stones and improve the neutronic parameters by maintaining the necessary conditions for their cooling in Tehran Research Reactor (TRR). In this way, by defining an appropriate neutron filter and simulating the irradiation box in the TRR core with MCNPX2.7 code, the neutronic parameters of the core are calculated, and the best configuration is selected. Then, various components of the irradiation channel are simulated using the Solidworks software, and thermal calculations are performed using the Flow Simulation plug-in. The results showed that although the presence of water in the irradiation channel and topaz box results in good cooling for topaz stones, the slowdown of fast neutrons causes intense activation of the stones. However, by using a closed-loop independent of the reactor pool water and a gaseous fluid such as air, the thermal neutron flux and consequently the activity of the stones is reduced. Moreover, the results demonstrated that, in this case, acceptable conditions could be provided for long-term and safe irradiation of stones by selecting the appropriate fluid velocity and adjusting the core power.

**Keywords:** Neutronic and thermal analysis, Solidworks, MCNPX, Topaz stone, Tehran Research Reactor

## ۱. مقدمه

با پرتودهی برخی سنگ‌های جواهراتی رنگ آن‌ها تغییر می‌کند و با ارزش‌تر می‌شوند. این تغییر رنگ به واسطه برخورد نوترون یا پرتوهای گامای حاصل از قلب یک رآکتور هسته‌ای یا ذرات الکترون در یک شتاب‌دهنده و یا ترکیبی از آن‌ها ایجاد می‌شود. از آن‌جا که ذرات نوترون به عمق کریستال نفوذ می‌کند و می‌تواند رنگ یکنواخت‌تری ایجاد کند، بیش‌تر از سایر گزینه‌ها مورد توجه می‌باشد. عامل ایجاد تغییر رنگ سنگ‌های توپاز با فرمول شیمیایی $Al_2SiO_4(F,OH)_2$، برخورد نوترون‌های سریع (عمدتاً بالای ۲ MeV) است. اما باید به این نکته دقت شود که در دمای حدود ۳۰۰ $^{\circ}C$، رنگ سنگ‌ها خراب شده یا سنگ‌ها می‌شکنند و یا بی‌رنگ می‌شوند که یکی از موارد نامطلوب در پرتودهی سنگ‌های قیمتی است. در این مورد، دمای سنگ‌ها در طول مدت پرتودهی باید کم‌تر از ۱۵۰ $^{\circ}C$ باشد [۱] و بنابراین، لازم است خنک‌کنندگی خوبی برای این سنگ‌ها فراهم شود. از سوی دیگر، یکی از مهم‌ترین فاکتورها در پرتودهی سنگ‌ها، میزان شار نوترون حرارتی است که به طور مستقیم در اکتیو شدن نمونه‌ها مؤثر است. از این‌رو، لازم است نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی، با فلوئنس $10^{17}$~$10^{18}$ $n/cm^2$ برای داشتن بهترین اثر بر رنگ سنگ‌ها، تا حد ممکن بیش‌تر باشد [۱]. در این پژوهش که توسط نادر و قائن از کشور مصر در رآکتور تحقیقاتی ETRR-۲ در خصوص پرتودهی سنگ‌های توپاز صورت گرفت، نشان داده شده است که استفاده از ماده B-۱۰ خالص مقدار شار نوترون‌های حرارتی را در داخل کانال پرتودهی به کم‌تر از ۱۰٪ کاهش می‌دهد که بسیار قابل ملاحظه است.

نتایج پژوهشی دیگر که به طور مشترک توسط محققین برزیل و بلژیک انجام شده است، نشان می‌دهد که رنگ آبی سنگ‌های توپاز پرتودهی شده با نوترون، مستقل از منشأ استخراج این سنگ‌ها است [۲]. در مقاله‌ای که توسط زندی و همکاران منتشر شده است، استفاده از آب، هوا و آب سنگین به عنوان خنک‌کننده در داخل کانال پرتودهی مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آن نشان می‌دهد آب موجب کند شدن نوترون‌ها در داخل کانال و در نتیجه اکتیو شدن شدید سنگ‌ها می‌گردد که در صورت استفاده از هوا یا آب سنگین، میزان شار نوترون‌های حرارتی تا ۷۰٪ کم‌تر می‌شود [۳]. ایده دیگر در این پژوهش، استفاده از صفحات سوخت در دیواره‌های اطراف کانال پرتودهی بود که نتایج حاکی از تأثیر ناچیز آن در افزایش شار نوترون‌های سریع در داخل کانال بود.

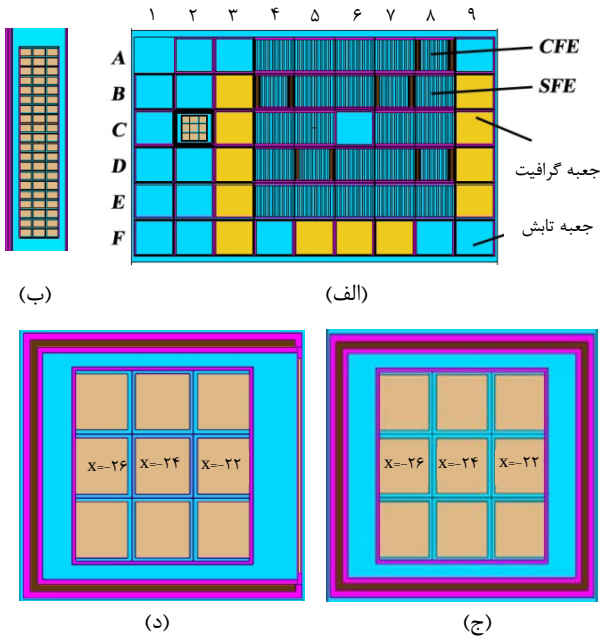
در مورد رآکتورهای حرارتی با طراحی قدیمی، حفظ نوترون‌های سریع به همراه حذف یا کاهش نوترون‌های حرارتی سخت می‌باشد، زیرا آب، نوترون‌های سریع را به حرارتی کند می‌کند. در این تحقیق تلاش می‌شود تا با انجام محاسبات نوترونیک، بهترین هندسه و ترکیب برای کانال پرتودهی و جعبه پرتودهی سنگ‌ها انتخاب شود. سپس با استفاده از نرم‌افزار Solidworks نحوه توزیع دما و روند خنک شدن سنگ‌ها در جعبه پرتودهی در حالت‌های مختلف بررسی می‌شود تا بهترین گزینه جهت استفاده در قلب رآکتور تحقیقاتی تهران انتخاب گردد.

## ۲. مواد و روش کار

### ۱.۲ مشخصات قلب رآکتور تحقیقاتی تهران و مدل‌سازی آن توسط کد MCNPX۲/۷

رآکتور تحقیقاتی تهران از نوع استخری با توان ۵ MW با کندکننده آب سبک و بازتابنده گرافیتی، دارای سوخت جامد غیرهمگن از نوع صفحه‌ای می‌باشد که آب درون استخر رآکتور، به عنوان حفاظ و خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. قلب رآکتور شامل المان‌های سوختی از نوع MTR[1] می‌باشد که داخل صفحه مشبکی قرار گرفته است. این صفحه نگه‌دارنده قلب به شکل یک ماتریس ۶×۹ است که قسمت انتهایی المان‌های سوخت در داخل این شبکه نگه‌دارنده ثابت می‌شوند. سوخت این رآکتور از نوع اکسید اورانیم با غنای پایین (LEU[2]) است که شامل المان‌های سوخت استاندارد (SFE[3]) و المان‌های سوخت کنترلی (CFE[4]) با ارتفاع اکتیو ۶۱٫۵ cm 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 راکتیویته قلب و تنظیم شار نوترون به کار می‌روند [۴، ۵]. در چیدمان قلب از هر دو نوع المان CFE و SFE استفاده شده است و قلب به صورت یک ماتریس ۶×۹ می‌باشد [۶، ۷]. در اطراف قلب تعدادی جعبه‌های گرافیتی به عنوان بازتابنده جهت کاهش نشت نوترون از قلب قرار داده شده است [۸، ۹]. شکل ۱ الف چیدمان قلب فعلی را با ۲۴ المان سوخت به همراه موقعیت‌های مختلف جعبه پرتودهی و نیز جعبه‌های گرافیت که توسط کد MCNPX۲/۷ شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد.

1. Material Testing Reactor
2. Low Enriched Uranium
3. Standard Fuel Element
4. Control Fuel Element




**شکل ۱.** چیدمان قلب رآکتور تهران (الف)، نمای محوری (ب) و مقطع عرضی جعبه توپاز با فیلتر کامل (فیلتر a) (ج) و فیلتر با یک صفحه سوخت تازه (فیلتر b) (د) واقع در C۲.

**۲.۲ توصیف مدل‌سازی کانال پرتودهی در کد MCNPX ۲/۷ [۱۰]**

همان‌طور که در شکل ۱ ب و ج نشان داده شده است، در موقعیت C۲ از یک فیلتر نوترونی جهت پرتودهی سنگ‌های توپاز استفاده شده است. این فیلتر شامل یک جعبه آلومینیمی دو جداره است که در بین دو جداره آن، ماده جاذب $B_4C$ به ضخامت ۲ میلی‌متر قرار گرفته است. ارتفاع این فیلتر حدود ۶۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا کل ارتفاع اکتیو سوخت را در بر گیرد. در داخل این فیلتر یک جعبه آلومینیمی حاوی سنگ‌های توپاز قرار دارد که در داخل آب قرار دارند. در عمل برای این‌که آب در داخل جعبه توپازها جریان داشته باشد تا عمل خنک‌شوندگی سنگ‌ها انجام شود، دو منفذ کوچک در قسمت‌های فوقانی و تحتانی این جعبه تعبیه شده است تا آب موجود در اطراف این جعبه، به داخل جعبه جریان یابد. با توجه به این‌که در قسمت‌های بالایی و پایینی قلب شار چند برابر کوچک‌تر از مرکز آن (z=۰) است، لذا ارتفاع جعبه حدود ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. نحوه توزیع سنگ‌های توپاز در داخل این جعبه به صورت ماتریس ۲۰×۳×۳ از مکعب‌هایی به ضلع ۱٫۵۶ cm در نظر گرفته شده است که در داخل آب قرار گرفته‌اند که نمای عرضی و محوری آن در شکل ۱ ب و ج نشان داده شده است. ابعاد سنگ‌های توپاز به گونه‌ای فرض شده است که نسبت حجمی توپاز به آب در داخل جعبه در حدود ۶۰ به ۴۰ باشد. ایده دیگر، استفاده از صفحات سوخت در دیواره فیلتر به جای ماده جاذب نوترون است. به نظر می‌رسد که استفاده از این صفحه سوخت موجب افزایش نوترون‌های سریع ورودی به داخل جعبه فیلتر خواهد شد که پس از عبور از آب مابین فیلتر و جعبه توپاز، به نوترون‌های حرارتی تبدیل می‌شوند. در این حالت مطابق شکل ۱ د از یک صفحه سوخت تازه به جای جاذب یکی از دیواره‌های فیلتر نوترونی استفاده شده است.

محاسبات شار نوترونی برای پنج گروه انرژی زیر انجام شده است:

- نوترون‌های حرارتی: ۰ ~ ۰٫۰۲۵ eV
- ۰٫۰۲۵ eV ~ ۱۰ eV
- ۱۰ eV ~ ۱۰۰ keV
- ۱۰۰ keV ~ ۱ MeV
- نوترون‌های سریع: ۱ MeV ~ ۳ MeV

با توجه به این‌که در این سنگ‌ها، دو بازه انرژی نوترون‌های حرارتی و سریع نقش اصلی را دارند، لذا جهت اختصار نتایج محاسبات مربوط به این دو گروه در این مقاله گزارش شده است.

**۳.۲ شبیه‌سازی نحوه توزیع دمای سنگ‌های توپاز توسط نرم‌افزار Solidworks**

**۱.۳.۲ نرم‌افزار Solidworks**

یکی از نرم‌افزارهای طراحی به کمک کامپیوتر، Solidworks است که بدون انجام محاسبه‌های مورد نیاز نقشه‌کشی صنعتی، می‌توان مدل مورد نظر را شبیه‌سازی نمود. سرعت بالا و سهولت کاربری از ویژگی‌های متمایزکننده Solidworks محسوب می‌شود. این نرم‌افزار دارای سه محیط اصلی به نام‌های part، assembly و drawing است. محیط اول برای رسم قطعه بوده، در محیط دوم قطعات یک مکانیسم بر روی هم سوار شده و در محیط آخر از آن‌ها نقشه مهندسی (معمولاً برای نسخه چاپی) تهیه می‌شود. با استفاده از افزونه‌ی Flow simulation در نرم‌افزار Solidworks که جهت حل مسایل انتقال حرارت و سیالات به این نرم‌افزار اضافه شده است، به راحتی می‌توان مسایلی هم‌چون انتقال حرارت دو بعدی و سه بعدی، جریان سیال، رطوبت، اختلاط و ... را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. نرم‌افزارهای Ansys Fluent و Ansys CFX از جمله نرم‌افزارهای مفید و کاربردی در زمینه‌ی CFD می‌باشند و معادلات را با دقت بالایی حل می‌کنند، اما خود نرم افزار Ansys مدل‌ساز نیست و حتماً نیاز به فراخوانی فایل سه بعدی از نرم‌افزاری دیگر دارد. از این‌رو ممکن است در هنگام

فراخوانی یک فایل با هندسه‌ای پیچیده و خاص مشکلاتی در تبیین ساختار مدل پیش آید. نرم‌افزار Solidworks دارای این مزیت است که مدل‌سازی مسأله و حل مسایل مربوط به آن هر دو در این نرم‌افزار انجام می‌گردد. دلیل دیگر انتخاب این نرم افزار سرعت محاسبات بسیار بالای آن نسبت به نرم‌افزار Ansys است.

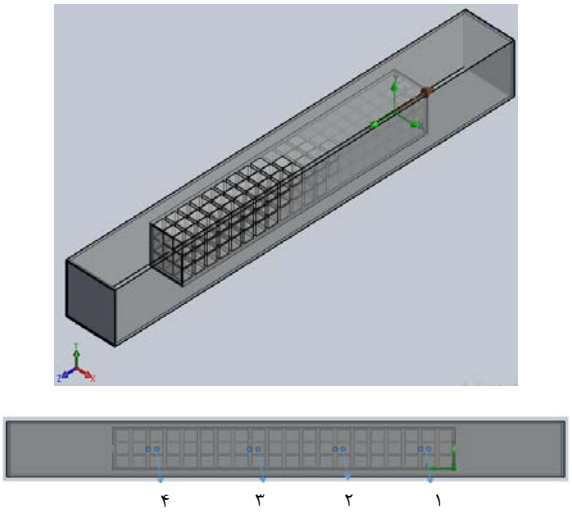
**۲.۳.۲ شبیه‌سازی مسأله**

جهت شبیه‌سازی مسأله با استفاده از افزونه جانبی Flow simulation در نرم‌افزار Solidworks، ابتدا سیال در بخش Wizard شبیه‌سازی گردید. برای تشابه دقیق مسأله با مدل فیزیکی، جهت جریان بالاسو و در خلاف جهت محور z در نظر گرفته شد و هم‌چنین رسانندگی گرمایی فعال گردید. ضریب انتقال حرارت از دیوار آلومینیمی ۲۴۴ $W/m^{2}.K$، فشار سیستم ۱۷۰ kPa، دمای سیال ورودی و نیز دمای اولیه سنگ‌ها ۳۱۰ K فرض گردید. منبع تولید حرارت، سنگ‌های توپاز می‌باشند که توسط سیال داخل جعبه توپاز و هم‌چنین سیال بیرون آن خنک می‌شوند. البته با توجه به این‌که سیال بیرونی، تأثیر بسیار کمی در خنک‌کنندگی سنگ‌های توپاز دارد، بدیهی است که شبیه‌سازی فیلتر بیرونی و سایر اجزاء قلب در بررسی دمایی این سنگ‌ها تأثیری نداشته و لذا از شبیه‌سازی آن ها صرف نظر شد.

نمایی از مدل شبیه‌سازی شده جعبه توپاز با سیال جانبی آن و سنگ‌های توپاز در شکل ۲ ارایه شده است. برای راحتی کار، دما در ۴ نقطه مشخص شده در این شکل در راستای ارتفاعی برای سیال و مرکز توپازها محاسبه شده است. با توجه به شرایط موجود در قلب رآکتور، سه طرح مختلف برای جعبه توپازها در نظر گرفته شد. در طرح اول، جعبه حاوی سنگ‌های توپاز و آب بوده و به نحوی درزبندی شده است که با سیال بیرون ارتباطی نداشته باشد. لذا آب درون جعبه توپازها راکد می‌باشد.

در طرح دوم، دو منفذ در صفحات بالایی و پایینی تعبیه شده است تا با جریان یافتن سیال بیرونی از طریق این دو منفذ، عمل خنک شدن سنگ‌ها تقویت شود.

در طرح سوم نیز صفحات بالایی و پایینی جعبه توپازها، توسط دو لوله بلند به یک لوپ بسته بیرون از استخر رآکتور متصل شده‌اند. در این حالت آب درون لوپ که از آب داخل استخر رآکتور مجزا است، چنین فرض شده است که توسط یک پمپ به داخل جعبه توپازها هدایت شود و لذا سیال می‌تواند با هر دبی دلخواهی وارد جعبه توپازها شود.




(الف)

(ب)

**شکل ۲.** الف) مدل شبیه‌سازی شده جعبه توپاز با سیال جانبی آن و سنگ‌های توپاز (طرح اول و دوم)، ب) سیال از طریق لوله‌ای به قطر ۱ cm وارد جعبه توپازها می‌شود (طرح سوم).

## ۳. نتایج و تحلیل آن‌ها

**۱.۳ توزیع شار نوترون در کانال پرتودهی**

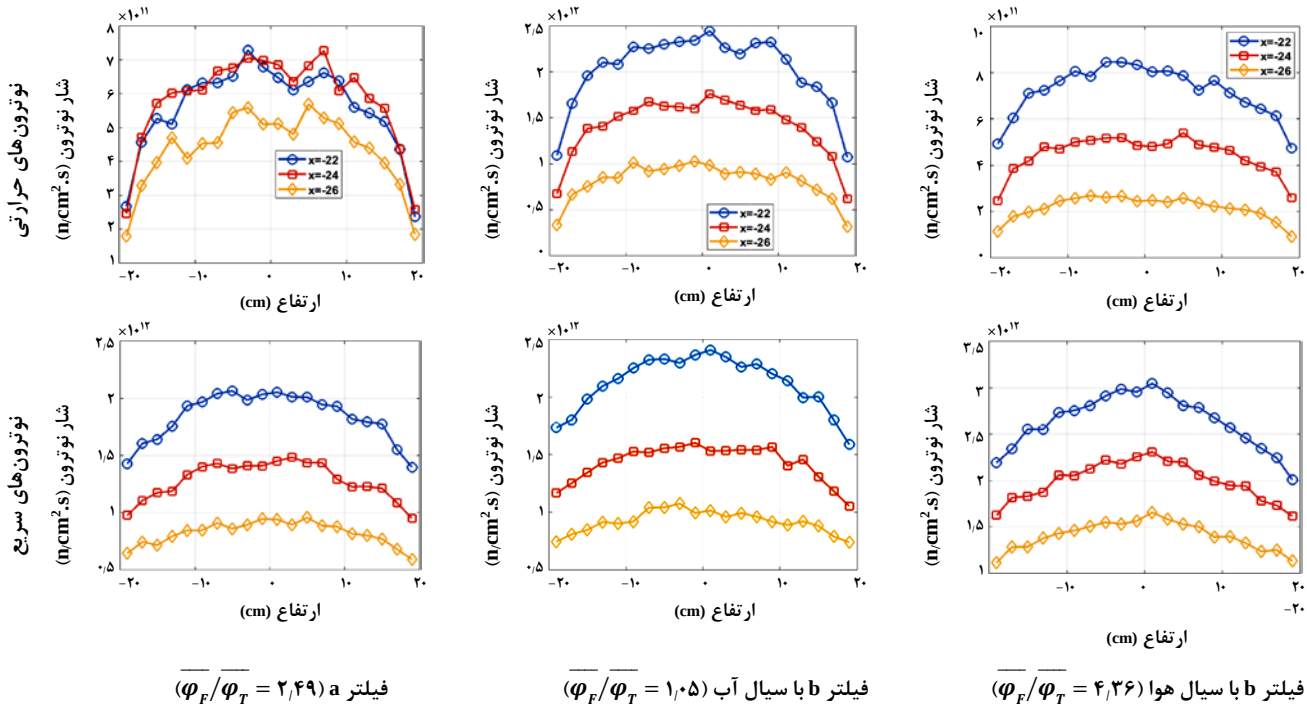
در جدول ۱ نتایج شبیه‌سازی قلب با جعبه فیلتر و توپاز و هم چنین استفاده از صفحه سوخت در کانال C۲ ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که حضور فیلتر a موجب کاهش راکتیویته قلب به میزان ۲۸۹ pcm می‌گردد که بایستی توسط جابه‌جایی میله‌های کنترل جبران گردد. این میزان برای فیلتر b به دلیل وجود یک صفحه سوخت برابر ۱۶۳ pcm است. اگر در فیلتر b به جای آب در داخل جعبه توپاز، هوا در نظر گرفته شود، راکتیویته قلب به میزان ۲۵۱ pcm کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که همه محاسبات در این پژوهش با فرض ۱۰۰٫۰۰۰ ذره و ۹۰۰ سیکل و با حذف ۵۰ سیکل اول توسط نرم‌افزار MCNPX۲/۷ انجام گردید که خطای محاسبات kcode برابر ۰٫۰۰۰۸ (۸ pcm) و هم‌چنین خطای محاسبات شار با استفاده از تالی F۴ در حدود ۰٫۰۱۱ (۱ درصد) بود.

**جدول ۱.** نتایج شبیه‌سازی قلب با جعبه فیلتر و توپاز و همچنین با استفاده از یک صفحه سوخت در کانال C۲

| پارامتر | قلب اصلی | قلب با فیلتر a | قلب با فیلتر b | |
|---|---|---|---|---|
| | | | با سیال هوا | با سیال آب |
| $K_{eff} \pm$ ۰٫۰۰۰۰۸ | ۱٫۰۶۸۵۳ | ۱٫۰۶۵۲۴ | ۱٫۰۶۶۶۷ | ۱٫۰۶۵۶۷ |
| ρ (pcm) | ۶۴۱۳ | ۶۱۲۴ | ۶۲۵۰ | ۶۱۶۲ |
| Δρ (pcm) | - | -۲۸۹ | -۱۶۳ | -۲۵۱ |

نتایج حاصل از محاسبات توزیع محوری شار نوترون برای دو گروه انرژی نوترون‌های حرارتی و سریع برای فیلترهای مختلف و برای ستون توپازهای واقع در x=-۲۲، x=-۲۴ و x=-۲۶ در شکل ۳ ارایه شده است. مقایسه این نمودارها نشان می‌دهد که استفاده از یک صفحه سوخت در دیواره فیلتر موجب افزایش حدود ۲۲٪ شار نوترون‌های سریع شده است که از این نظر مناسب به نظر می‌رسد. اما شار حرارتی نزدیک به ۴ برابر افزایش یافته است که این امر بسیار نامطلوب است، زیرا باعث اکتیو شدن شدید سنگ‌های توپاز و درنتیجه افزایش شدید مدت زمان ترخیص آن‌ها می‌گردد و لذا از دیدگاه اقتصادی اصلاً مقرون به صرفه نیست. این موضوع از نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی نیز کاملاً مشخص است. در حالی که اگر در فیلتر b از هوا به جای آب استفاده شود (با فرض محبوس بودن هوا در داخل جعبه توپاز)، شار نوترون‌های سریع حدود ۲۵٪ نسبت به فیلتر b حاوی آب افزایش و شار حرارتی نیز نزدیک به ۳ برابر کاهش می‌یابد که در مقایسه با فیلتر b حاوی آب گزینه بسیار مناسبی است. بنابراین استفاده از هوا به جای آب در داخل فیلتر موجب می‌شود که کند شوندگی نوترون‌ها در داخل جعبه کم‌تر شده و لذا نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یابد.

با توجه به توضیحات فوق، انجام محاسبات مجدد نشان داد که در صورتی که در فیلتر a به جای آب داخل جعبه توپاز و نیز بیرون آن، سیال هوا در نظر گرفته شود، شار نوترون‌های حرارتی در کل جعبه توپاز به طور متوسط از ۵٫۵×۱۰$^{۱۱}$ n/cm$^{۲}$.s به ۲٫۴۲×۱۰$^{۱۱}$ n/cm$^{۲}$.s کاهش و شار نوترون‌های سریع به طور متوسط از ۱٫۳۷×۱۰$^{۱۲}$ n/cm$^{۲}$.s به ۱٫۸۶×۱۰$^{۱۲}$ n/cm$^{۲}$.s افزایش یابد. به عبارت دیگر، نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی از ۲٫۴۹ به ۷٫۷ افزایش خواهد یافت که مقدار قابل توجهی است (حدود ۳ برابر). بنابراین، در صورتی که بتوان خنک‌کنندگی سنگ‌های توپاز را با هوا یا گازی دیگر انجام داد، به جای آب در داخل جعبه توپاز گزینه بسیار مناسبی است.




**شکل ۳.** توزیع محوری شار نوترون در کانال C۲ در داخل سنگ‌های توپاز در دو فیلتر a و b.

**۲.۳ میزان تولید گرما در سنگ‌های توپاز در حین پرتودهی**

مقدار چگالی توان تولیدی در هر ستون از توپازهای ردیف وسط، با استفاده از تالی F۶ کد MCNPX برای نوترون‌ها و فوتون‌ها محاسبه شده است که نتایج حاصل در شکل ۴ ارایه شده است. با توجه به این‌که توپازهای نزدیک به قلب (x=-۲۲) در حدود دو برابر شار نوترون بیش‌تری نسبت به توپازهای دورتر (x=-۲۶) دریافت می‌کنند و هم‌چنین شار برحسب محور y چندان تغییر نمی‌کند، لذا محاسبات برای ردیف نشان داده شده در شکل ۱ ج و برای zهای مختلف انجام شد. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشینه چگالی توان تولیدی در هر ستون محوری برای xهای مختلف استخراج گردید. با فرض توان MW ۵ برای قلب رآکتور، حداکثر چگالی توان در ستون‌های مختلف سنگ‌ها، در موقعیت‌های x=-۲۶، x=-۲۴ و x=-۲۲ به ترتیب ۰٫۳۳ W/cm$^3$، ۰٫۴۴ و ۰٫۵۲ به دست آمد (این مقادیر برای هر دو خنک‌کننده آب و هوا با تقریب خوبی صادق است).

نکته مهم این‌که بر اساس پیش‌بینی اولیه انتظار می‌رفت که با حذف آب در داخل فیلتر و نیز جعبه توپاز، با توجه به کاهش محسوس شار حرارتی، توان تولیدی در سنگ‌ها نیز کاهش یابد که محاسبات فوق خلاف آن را ثابت نمود. دلیل این موضوع این است که سهم عمده انرژی تولید شده در سنگ‌های توپاز مربوط به پرتوهای گاما است که با تغییر جنس خنک‌کننده چندان تغییری نمی‌یابد.

با توجه به این‌که لازم است جعبه توپاز به اندازه کافی خنک شود، لذا امکان این‌که بیرون جعبه توپاز از هوا استفاده شود، وجود ندارد و لذا از سه حالت بیان شده در شکل ۴ مورد سمت چپ عملی نبوده و لذا در ادامه از بررسی آن صرف نظر می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، در صورتی که بتوان از هوا در داخل جعبه توپاز به عنوان خنک‌کننده استفاده نمود، به طور متوسط میزان شار نوترون‌های سریع ۳۶٪ افزایش و شار نوترون‌های حرارتی ۵۶٪ کاهش خواهد یافت. لذا نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی از ۲٫۴۹ به ۷٫۷ می‌رسد که مقدار قابل توجهی است. لذا در ادامه به بررسی طرح‌های مختلف جهت خنک‌سازی کافی سنگ‌های توپاز و شرایط لازم جهت تحقق آن می‌پردازیم.

**۳.۳ محاسبه سرعت سیال جهت خنک‌سازی سنگ‌های توپاز**

**۱.۳.۳ طرح اول**

در اولین طرح، جعبه توپازها درزبندی شده و لذا آب در درون آن محبوس است. توان قلب MW ۵ در نظر گرفته شده است و دمای مرکز سنگ‌ها در حالتی که سرعت سیال آب در خارج از جعبه توپاز m/s ۰٫۰۰۵، ۰٫۰۱، ۰٫۱ و ۲ باشد، محاسبه گردیده است که نتایج آن در شکل ۵ ارایه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌گردد، دمای مرکز سنگ‌ها در این طرح همواره کم‌تر از ۱۵۰°C باقی می‌ماند و لذا از این دید بسیار مناسب می‌باشد.

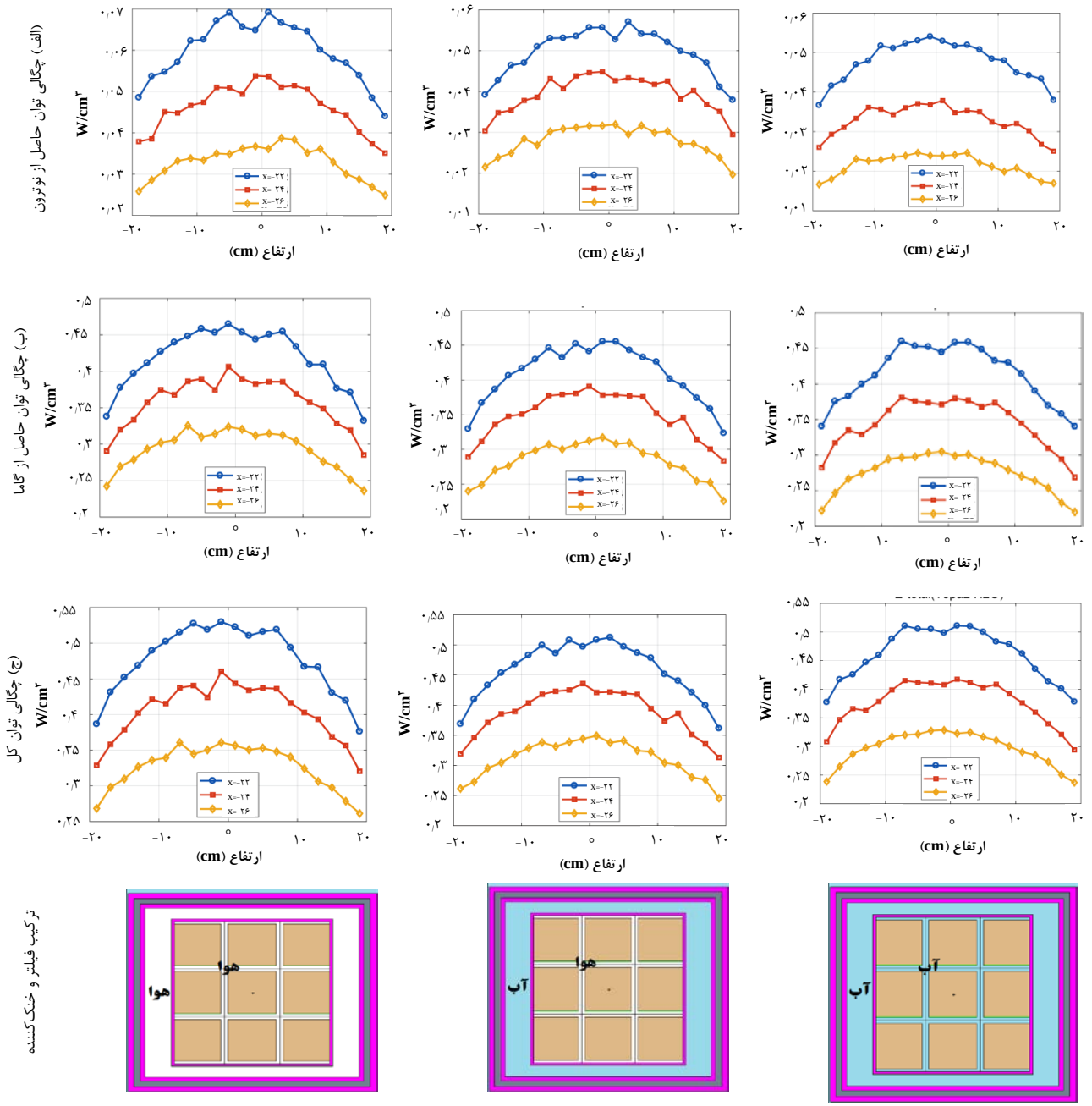
این طرح در حالتی که زمان ترخیص نمونه‌ها چندان مهم نباشد، قابل قبول است. اما باید توجه داشت که در صورت اجرای این طرح، مدت زمان ترخیص سنگ‌ها تا چند سال نیز به طول خواهد انجامید.

**۲.۳.۳ طرح دوم**

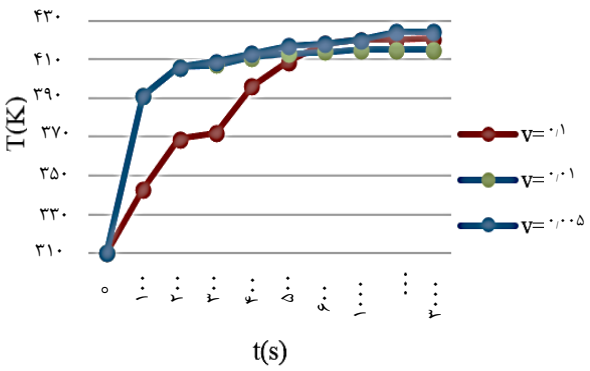
در طرح دوم، آب استخر رآکتور از طریق دو سوراخ کوچک (به قطر cm ۰٫۵) که در صفحات بالایی و پایینی جعبه ایجاد شده است، وارد فضای بین سنگ‌ها می‌شود و پس از برداشت حرارت تولید شده در سنگ‌ها از منفذ خروجی جعبه خارج می‌شود. در این حالت سیال خنک‌کننده قلب با سرعتی بسیار کم‌تر از سرعت ورودی به جعبه پرتودهی، وارد جعبه توپاز می‌شود. با این حال بدیهی است که دمای مرکزی سنگ‌های توپاز به دلیل وجود جریان خنک‌کننده، کم‌تر از طرح اول خواهد بود (همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود).

علی‌رغم این‌که در هر دو طرح اول و دوم (به ویژه در طرح دوم)، دمای سنگ‌های توپاز به اندازه کافی از °C ۱۵۰ پایین‌تر است، اما به دلیل حضور آب در کنار سنگ‌های توپاز در داخل جعبه توپاز، نوترون‌های حرارتی زیادی تولید می‌شوند که با جذب شدن در این سنگ‌ها، موجب اکتیو شدن شدید آن‌ها می‌گردند. به نحوی که مدت زمان ترخیص این سنگ‌ها از چند ماه تا چند سال نیز می‌رسد که از دید اقتصادی اصلاً مقرون به صرفه نیست.

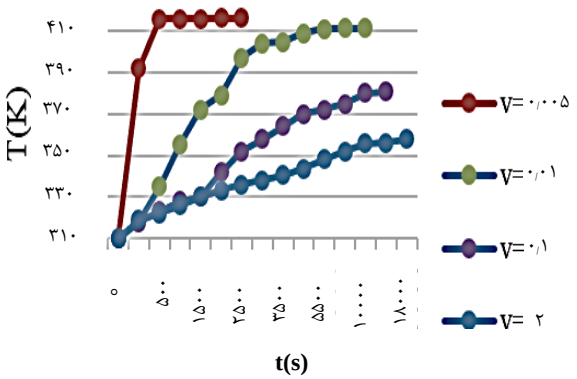
در طرح سوم، با توجه به چالش مطرح شده در دو طرح قبل، سیال هوا از طریق لوله‌ای به قطر داخلی cm ۱ در داخل جعبه سنگ‌ها جریان دارد. در این حالت فرض شد که سیال داخل جعبه پرتودهی، مستقل از سیال بیرون بوده و توسط یک لوپ بسته بیرونی تغذیه می‌شود. نمایی از مدل شبیه‌سازی شده جعبه توپاز با سیال جانبی آن به همراه برش عرضی از چند مقطع سنگ‌ها در طرح سوم در شکل ۷ نشان داده شده است.



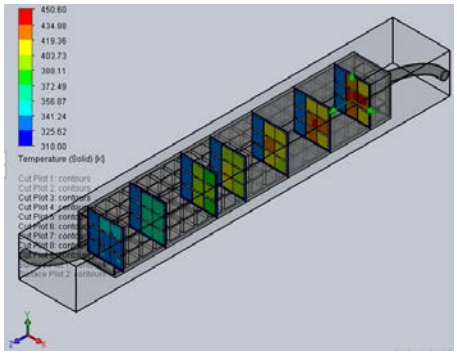

**شکل ۴.** چگالی توان تولید شده حاصل از نوترون (الف)، گاما (ب) و مجموع (ج) در هر ستون از سنگ‌های ردیف وسط.




**شکل ۵.** توزیع دمایی سنگ‌های توپاز در طرح اول با سرعت ورودی مختلف آب در خارج از جعبه سنگ‌ها (برحسب m/s).




**شکل ۶.** توزیع دمایی سنگ‌های توپاز در طرح دوم با سرعت‌های مختلف آب (برحسب m/s).

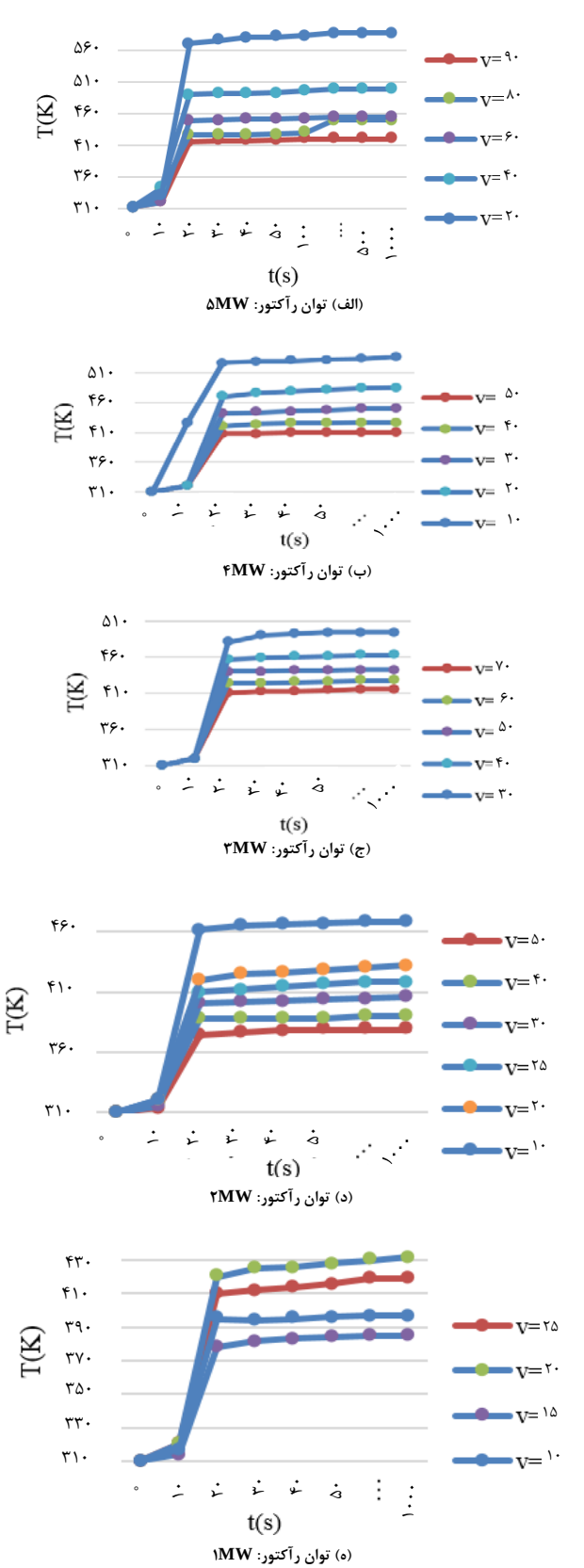


**شکل ۷.** برش عرضی و نمایش توزیع دمای نوعی در مرکز سنگ‌ها در طرح سوم با سیال هوا.

### ۳.۳.۳ طرح سوم

در طرح سوم فرض گردید که سیال داخل جعبه توپاز از طریق یک لوپ خارجی تأمین شود و لذا می‌تواند سیالی غیر از آب باشد که در این مورد هوا به عنوان خنک‌کننده در نظر گرفته شد. شکل ۸ بیش‌ترین دمای مرکزی سنگ‌های توپاز با توان ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ مگاوات برای قلب و با ورودی سرعت‌های مختلف هوا به داخل جعبه توپازها نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در حالتی که توان رآکتور ۵ مگاوات باشد، حداقل سرعت لازم برای سیال هوای ورودی به جعبه پرتودهی برای این‌که بیشینه دمای مرکزی سنگ‌ها کم‌تر از ۱۵۰ $^{\circ}C$ قرار بگیرد، ۸۰ m/s است که مقدار بسیار زیادی است.

هنگامی که توان قلب رآکتور کاهش داده شود، واضح است که این حداقل سرعت برای برداشت گرمای تولید شده در سنگ ها نیز کاهش خواهد یافت. برای نمونه در توان ۲ MW، با سرعتی در حدود ۲۰ m/s می‌توان گرمای تولیدی در این سنگ ها را برداشت نمود. البته بدیهی است که با کاهش توان رآکتور، میزان شار نوترون نیز کاهش خواهد یافت که این امر موجب افزایش مدت زمان پرتودهی خواهد شد (در حدود ۲٫۵ برابر). اما در مقابل همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، با استفاده از خنک کننده هوا، میزان اکتیو شدن سنگ‌ها تا حدود ۳ برابر کاهش می‌یابد که در نتیجه زمان ترخیص این سنگ‌ها نیز به همین مقدار کم‌تر می‌گردد.




(الف) توان رآکتور: ۵MW

(ب) توان رآکتور: ۴MW

(ج) توان رآکتور: ۳MW

(د) توان رآکتور: ۲MW

(ه) توان رآکتور: ۱MW

**شکل ۸.** توزیع دمایی در طرح سوم با توان‌های مختلف و سیال هوا با سرعت‌های ورودی متفاوت (برحسب m/s).

## ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق، طراحی یک جعبه مناسب جهت پرتودهی سنگ‌های جواهراتی توپاز از دید نوترونی و حرارتی مورد بررسی قرار گرفت که هدف از آن، بهبود پارامترهای نوترونی با حفظ شرایط لازم جهت خنک‌شوندگی سنگ‌ها در رآکتور تحقیقاتی تهران است. ابتدا، با تعریف فیلتر نوترونی مناسب و شبیه‌سازی جعبه پرتودهی با استفاده از کد MCNPX۲/۷ در چیدمان قلب، پارامترهای نوترونی قلب محاسبه و بهترین هندسه و ترکیب از نظر شار نوترون سریع انتخاب گردید. نتایج نشان داد که استفاده از یک صفحه سوخت تازه در هندسه فیلتر نوترونی، چندان تأثیر محسوسی در بهبود پارامترهای نوترونی ندارد. در مقابل، استفاده از هوا به جای آب در داخل جعبه توپازها، تا حدود ۳ برابر نسبت شار نوترون‌های سریع به حرارتی را افزایش می‌دهد. اما این موضوع نیازمند یک لوپ بسته جهت گردش هوا در داخل جعبه توپازها و خنک‌سازی آن‌ها است. لذا با شبیه سازی اجزاء مختلف کانال و جعبه پرتودهی در نرم‌افزار Solidworks و اجرای افزونه Flow Simulation آن، توزیع حرارتی سنگ‌های توپاز و نحوه برداشت گرمای آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که در صورتی که بتوان تمهیدات لازم را جهت ایجاد یک لوپ بسته با خنک‌کننده هوا جهت خنک‌سازی سنگ‌های توپاز به‌کار گرفت، در توان حدود ۲ MW با سرعتی در حدود ۲۰ m/s می‌توان گرمای تولیدی در این سنگ‌ها را برداشت نمود. واضح است که با کاهش توان رآکتور، میزان شار نوترون نیز کاهش خواهد یافت که این امر موجب افزایش مدت زمان پرتودهی خواهد شد (در حدود ۲٫۵ برابر). اما در مقابل، با استفاده از خنک‌کننده هوا، میزان اکتیو شدن سنگ‌ها تا حدود ۳ برابر کاهش می‌یابد که در نتیجه مدت زمان ترخیص این سنگ‌ها نیز به همین مقدار کم‌تر می‌گردد.

## مراجع


1. N.M. Mohamed, M.A. Gaheen, *Design of fast neutron channels for topaz irradiation*, Nuclear Engineering and Design, **310**, 429-437 (2016).
2. A.S. Leal, et al, *Study of neutron irradiation-induced colors in Brazilian topaz*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, **580(1)**, 423-426 (2007).
3. N. Zandi, et al, *Study on a new design of Tehran Research Reactor for radionuclide production based on fast neutrons using MCNPX code*, Applied Radiation and Isotopes, **132**, 67-71 (2018).
4. AEOI, *Safety Analysis Report of Tehran Research Reactor*, Atomic Energy Organization of Iran, (2009).
5. M.H.C. Dastjerdi, H. Khalafi, *Design of a thermal neutron beam for a new neutron imaging facility at Tehran research reactor*, Physics Procedia, **69**, 92-95 (2015).
6. A. Lashkari, et al, *Neutronic analysis for Tehran Research Reactor mixed-core*, Prog. Nucl. Energy, **60**, 31–37 (2012).
7. N. Zandi, *Study on a new design of Tehran Research Reactor for radionuclide production based on fast neutrons using MCNPX code*, Applied Radiation and Isotopes, **132**, 67-71 (2018).
8. H. Khalafi, M. Gharib, *Optimization of $^{60}Co$ production using neutron flux trap in the Tehran research reactor*, Ann. Nucl. Energy, **32**, 331–341 (2005).
9. M.R. Aboudzadeh, et al, *Preparation and Characterization of Chitosancapped Radioactive Gold Nanoparticles: Neutron Irradiation Impact on Structural Properties…. Safety Analysis Report for the Tehran Research Reactor (HEU)*, Tehran-Iran, (13, 339-345.AEOI, 1966) (2015).
10. D.B. Pelowitz, *MCNPX user's manual*, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, (2005).


**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**
زهرا زارعی، مسعود امین مظفری، سعید محمدی، مصطفی حسن‌زاده (۱۴۰۱)، طراحی کانال پرتودهی سنگ‌های توپاز و تحلیل نوترونی ـ حرارتی آن در رآکتور تحقیقاتی تهران، ۱۰۱، ۳۹-۴۷

**DOI**: 10.24200/nst.2022.1445 **Url**: https://jonsat.nstri.ir/article_1445.html