



بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۲۰۱ اسفندماه ۱۳۹۷ - دانشگاه آزاد اسلامی (واحد بوشهر)



شبیه‌سازی و محاسبات نوترونیک راکتور HTR-10 با استفاده از کدهای محاسبات هسته‌ای SUPER MC و MCNPx2.7

کللی، علی - نورقاسمی قرقچی، حبیب - رضانی، ایمان - وثوقی، ناصر*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در راکتورهای بسترگلوله‌ای، قلب با هزاران گلوله گرافیت و سوخت پر شده است. گلوله‌های سوخت در این راکتور حاوی ذرات پوشش داده شده‌ای است که به صورت تصادفی در شبکه گرافیتی جا داده شده‌اند. همچنین قلب راکتور با گلوله‌های سوخت و کندکننده به صورت تصادفی و با نسبت غیریکسان پر شده است. در این پژوهش راکتور بسترگلوله‌ای HTR-10 با در نظر گرفتن این دو ماهیت تصادفی، با استفاده از کدهای مونت کارلویی SUPER MC و MCNPx2.7 شبیه‌سازی شده است. پس از شبیه‌سازی، به انجام محاسبات نوترونیک قلب پرداخته شده است و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی با مدارک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی راستی‌آزمایی گردیده است.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، محاسبات نوترونیک، بسترگلوله‌ای، HTR-10، MCNPx2.7، SUPER MC

Neutronic simulation and calculations of HTR-10 reactor using

MCNPx2.7 and SUPER MC

Kolali, Ali; Noorgasemi Gorougchi, Habib; Ramezani, Iman; Vosoughi, Naser

Sharif university of Technology, Faculty of energy engineering & Department of nuclear engineering

Abstract:

In pebble bed reactors, the core is filled with thousands of graphite and fuel pebbles. In these reactors, fuel pebbles consist of TRISO particles, which are embedded in a graphite matrix stochastically. The reactor core is also stochastically filled up with fuel and dummy pebbles with an unequal ratio. In this study, HTR-10 pebble bed reactor considering the two above mentioned stochastic phenomena has been modeled using MCNPx2.7 and SUPER MC Monte Carlo code. After simulation, the neutronic calculations of the core have been studied and results have been verified with benchmark problems of IAEA.

Keywords: simulation, neutronic calculations, pebble bed, HTR-10, MCNPx2.7, SUPER MC



مقدمه:

امروزه، استفاده از انرژی هسته‌ای به عنوان یک انرژی پاک و دارای چگالی انرژی بالاتر نسبت به دیگر منابع انرژی غیر قابل اجتناب است. بر این اساس نسل جدیدی با نام نسل چهارم راکتورهای هسته‌ای معرفی شده‌اند که مهمترین ویژگی آنها ایمنی بالاتر آنها نسبت به نسل‌های گذشته است. راکتور گازی با دمای خیلی بالا (VHTR) یکی از نامزدهای معرفی شده این نسل است. این نوع از راکتورها از گاز هلیوم به عنوان خنک‌کننده و از گرافیت به عنوان کند کننده استفاده می‌کنند و می‌توانند به دماهای بالاتر از ۱۲۰۰ کلوین برسند. راکتورهای با دما بسیار بالا خود به دو نوع منشوری^۱ و بسترگلوله‌ای^۲ تقسیم می‌شوند. در نوع بسترگلوله‌ای، عناصر سوخت گلوله‌هایی با قطر ۶ cm هستند که هزاران ذره سوخت پوشش داده شده را به صورت تصادفی در شبکه گرافیتی جا داده‌اند[۱]. همچنین قلب راکتور با گلوله‌های سوخت و کندکننده به صورت تصادفی و با نسبت غیریکسان پر شده است. به این دو ماهیت تصادفی راکتورهای بسترگلوله‌ای، اصطلاحاً ناهمگونی دوگانه گفته می‌شود[۲]. راکتیویته اضافه به دلیل وجود قابلیت تعویض سوخت در حین کار در راکتورهای بسترگلوله‌ای بسیار ناچیز است و این موضوع از دید ایمنی راکتور بسیار حائز اهمیت است. قابلیت تعویض سوخت در حین کار علاوه بر مزیت فوق منجر به افزایش ضریب ظرفیت^۳، داشتن قابلیت تغییر نسبت کندکننده و سوخت در قلب[۳]، بهره برداری بهینه تر از سوخت به عبارتی دیگر فرسایش سوخت بیشتر و در نتیجه اقتصاد سوخت بهتر می‌شود. در این پژوهش از داده‌های راکتور تحقیقاتی چین، HTR-10، که از نوع بسترگلوله‌ای می‌باشد، استفاده شده است[۶ و ۵] و این راکتور با استفاده از کدهای مونت کارلویی MCNP و SUPER MC شبیه سازی می‌شود. SUPER MC یک کد مونت کارلویی و جامع برای طراحی و ارزیابی سیستم‌های هسته‌ای است که تمام محاسبات نوترونیک، ترابرد پرتو در مواد، تخلیه انرژی، دوز و میزان فعالیت آنها را انجام می‌دهد. همچنین این کد قادر است محاسبات جفت شدگی را به صورت رایانش ابری محاسبه کند. از جمله قابلیت‌های مهم آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) تعریف هندسه به صورت ویژوال، که کار با آن را خیلی راحتتر از کد MCNP می‌کند. (۲) توانایی تبدیل فایل ورودی خود به فرمت کدهای FLUKA، MCNP، GEANT4، TRIPOLI، PHITS را دارد. (۳) ترسیم هندسه در آن نسبت به visual MCNPx خیلی سریعتر

¹Very High Temperature Reactor

² Prismatic

³Pebble bed

⁴ Capacity factor

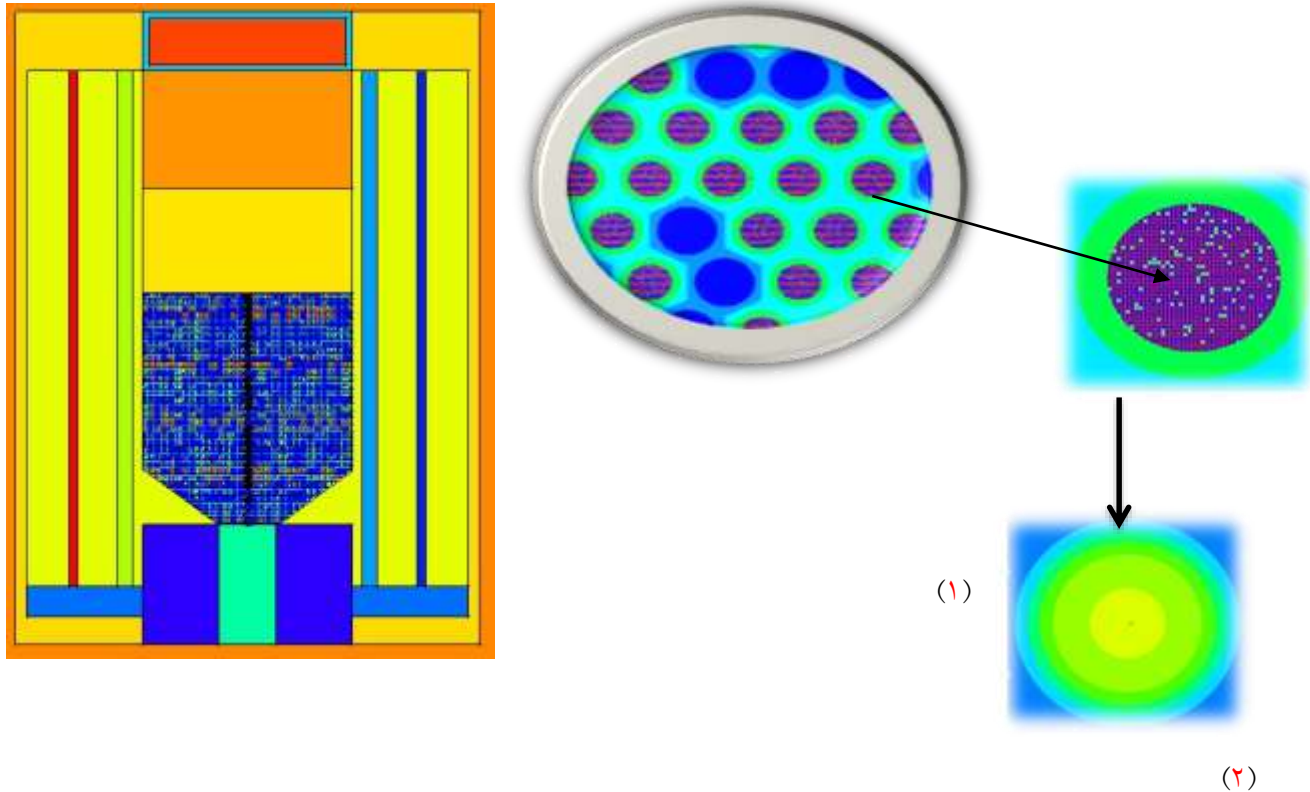


است. ۴) نمودارهای خروجی را بدون استفاده از نرم‌افزارهای کمکی، به منظور تحلیل ترسیم می‌کند و غیره. کتابخانه کد SUPER MC، شبیه کتابخانه کد MCNP می‌باشد. با این تفاوت که در این کد از فایل XSDIR استفاده نمی‌شود و سطح مقاطع این کد از فایل ENDF-B-VII استخراج شده‌اند [۷]. قلب راکتور HTR-10، دارای قطر $m \frac{1}{8}$ و حجم $m^3 5$ می‌باشد که توسط بازتابنده‌های گرافیتی احاطه شده است. قلب توسط $27,000$ المان گلوله‌ای پر می‌شود. در گلوله‌های سوخت از اورانیوم با غنای ۱۷٪ استفاده شده است و این گلوله‌ها دارای فرسایش سوخت $mWd/t 80000$ هستند. فشار هلیوم در مدار اولیه $3 MPa$ است. در طرح کلی راکتور، گرافیت

به عنوان ماده استفاده شده در ساختار اولیه قلب انتخاب شده است که در بالا و پایین و اطراف قلب به عنوان بازتابنده قرار داده شده است. ضخامت بازتابنده $cm 100$ می‌باشد که شامل یک لایه بلوک کربنی حاوی بور نیز است. کانال‌های هلیوم سرد در داخل بازتابنده‌های جانبی طراحی شده‌اند. قلب راکتور توسط گلوله‌های کروی کندکننده و سوخت (با قطر $cm 6$) که حاوی ذرات TRISO است، پر شده است. در بازتابنده جانبی نزدیک قلب فعال، ده کانال با قطر $mm 130$ برای میله‌های کنترل، هفت کانال برای توپ‌های جاذب و سه کانال با قطر $mm 130$ برای اهداف پرتوافکنی تعبیه شده است.

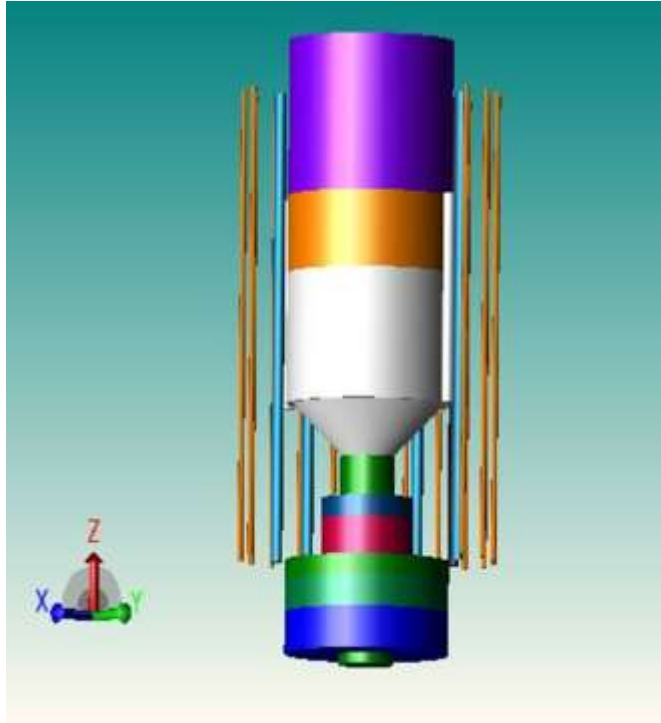
روش کار:

روند شبیه‌سازی به این صورت بوده که از کوچک‌ترین جزء راکتور که TRISOها هستند، شبیه‌سازی شروع شده است. این ذرات شبیه‌سازی شده که تعداد آنها بین 8000 تا 9000 در نظر گرفته شده است، به صورت کاملاً تصادفی و به نحوی که جرم اورانیوم داخل گلوله سوخت $g 5$ باشد، درون گلوله سوخت قرار داده شده‌اند. در ادامه این گلوله سوخت به همراه گلوله کندکننده با نسبت غیریکسان و به طور کاملاً تصادفی درون صادفی TRISOها درون گلوله سوخت و همچنین قرارگیری تصادفی گلوله‌های سوخت و کندکننده با نسبت غیریکسان 57 به 43 ، درون قلب راکتور، با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن ماتریس‌هایی تولید شده است.



شکل (۱) برش عمودی قلب شبیه سازی شده با MCNPx2.7: گلوله سوخت (۱) ، ذره TRISO (۲)

این ماتریس‌هایی که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، به فایل ورودی کد MCNPx2.7 منتقل شده‌اند (شکل ۱). روند شبیه سازی با کد SUPER MC به این صورت بوده که به دلیل وجود محدودیت‌هایی، گلوله‌های سوخت به صورت همگن شبیه سازی شده و سپس به همراه گلوله‌های کند کننده درون قلب راکتور قرار گرفته‌اند (شکل ۲). به دلیل قرار گیری تصادفی گلوله‌های سوخت و کند کننده در قلب، به ناچار باید با برنامه نویسی اعداد تصادفی ایجاد کرد و سپس آنها را به فایل ورودی MCNP وارد کرد و پس از آن با فراخوانی این فایل در کد SUPER MC، هندسه تصادفی مسئله را خواهیم داشت.

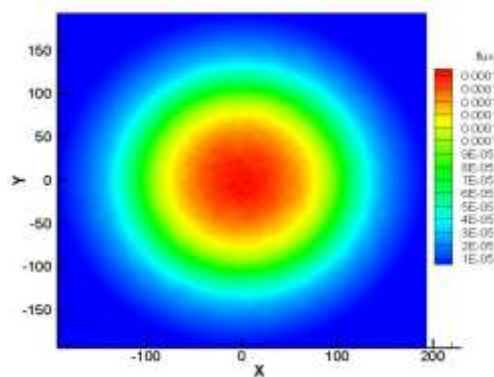


استفاده از این ترفند به هیچ وجه بخاطر ضعف کد SUPER MC در ایجاد ورودی نیست بلکه به دلیل خاصیت تصادفی هندسه مسئله (گلوله های سوخت) می باشد.

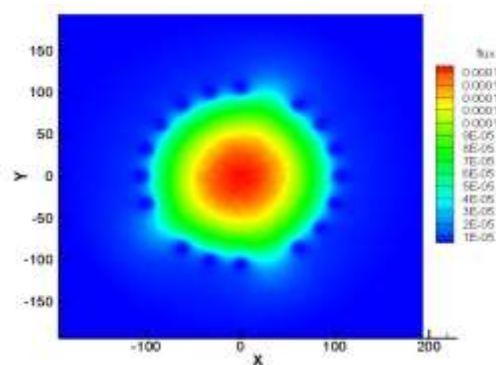
نتایج:

پس از شبیه سازی قلب اولین گام محاسبه مقدار ارتفاع بحرانی برای اولین بحرانیت است. محیط از جنس هلیوم و دمای قلب به صورت یکنواخت $20^{\circ}C$ (حالت کاری سرد صفر قدرت) در نظر گرفته شده است.

با توجه به گزارش منتشرشده که اولین بحرانیت راکتور در ارتفاع $123/06 \text{ cm}$ صورت گرفته است، نتایج به دست آمده توافق خوبی را با مرجع [۱] نشان می دهد (جدول ۱). از دیگر محاسبات صورت گرفته در این بخش، توزیع شار کل



شکل (۳) توزیع شار کل نوترونی محاسبه شده با کد MCNPx



شکل (۲) قلب شبیه سازی شده با کد SUPER MC

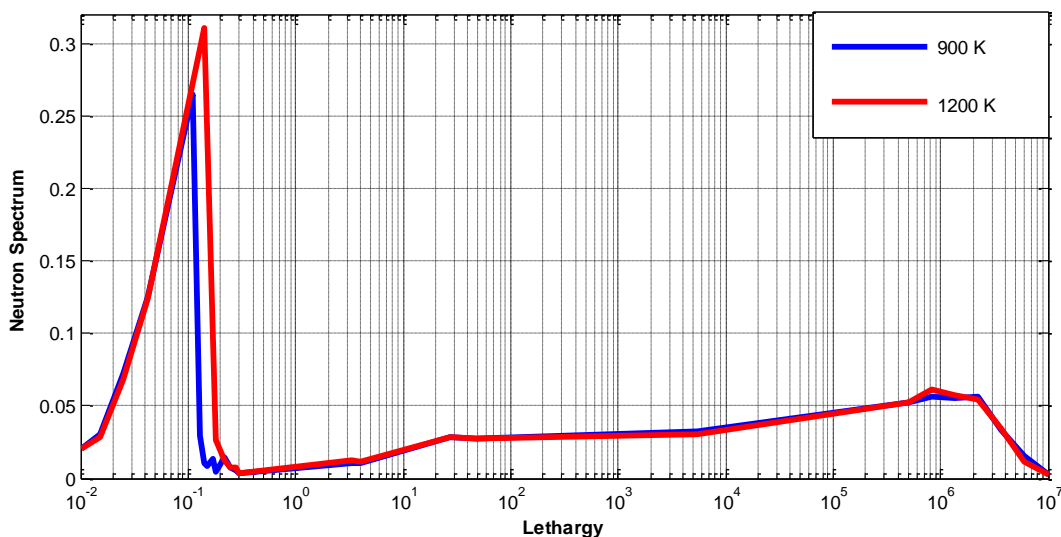


نوترونی بدون حضور میله‌های کنترل و با حضور میله‌های کنترل است که نتایج آن در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول (۱) ارتفاع بحرانی محاسبه شده با کدهای MCNPx 2.7 و SUPER MC

ارتفاع (cm)	SUPER MC		MCNPx 2.7		نتایج مرجع [۱]	
	ضریب تکثیر	انحراف معیار	ضریب تکثیر	انحراف معیار	ارتفاع (cm)	ضریب تکثیر
۱۲۵	۱/۰۰۲۴۷	۰/۰۰۴۳۴	۱/۰۰۷۷۲	۰/۰۰۰۷۶	۱۲۳/۵۷۶	۱/۰۰۴۷۹
۱۵۵	۱/۰۶۵۳۵	۰/۰۰۴۷۳	۱/۰۷۹۵۱	۰/۰۰۰۸۳	۱۵۲/۹۷	۱/۰۸۲۷
---	---	---	---	---	۱۸۲/۳۶۴	۱/۱۳۷۳۸
۱۹۱	۱/۱۲۵۳۱	۰/۰۰۵۴۲	۱/۱۵۴۶۹	۰/۰۰۰۸۳	۱۹۲/۱۶۲	۱/۱۵۶۸۳

قابلیت تغییر نسبت کندکننده به سوخت و دمای کار بالای راکتور HTR-10 این قابلیت را بوجود آورده است که بتوان طیف نوترون را در یک بازه مناسبی جابجا کرد. این قابلیت در تهی‌سازی گلوله‌های سوخت از پلوتونیوم کاربرد دارد و

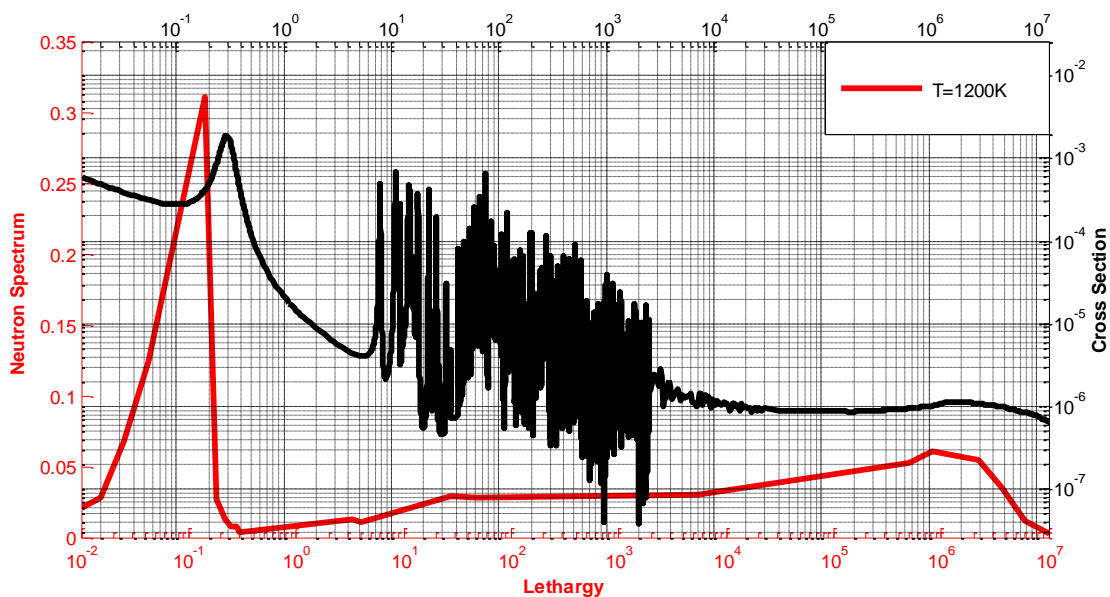


همچنین باعث افزایش طول سیکل کاری راکتور می‌شود.

شکل (۴) طیف نوترون محاسبه شده با کد MCNPx درون گلوله سوخت (به‌هنجارشده به ۱)



برای بررسی این موضوع طبق شکل (۴) با ثابت نگه داشتن نسبت گلوله‌های سوخت به کندکننده در کد MCNPx، طیف نوترون در دماهای ۹۰۰ و ۱۲۰۰ کلوین مقایسه می‌شود. اگر مطابق شکل (۵) طیف نوترون در دمای ۱۲۰۰ کلوین را با سطح مقطع شکافت Pu(239) مقایسه کنیم در خواهیم یافت که پیک ناحیه حرارتی طیف با پیک سطح مقطع شکافت آن همپوشانی دارد.



شکل (۵) همپوشانی طیف نوترون با سطح مقطع شکافت Pu(239) (به‌هنجارشده به ۱)

بحث و نتیجه گیری:

در این پژوهش، قلب راکتور بستر گلوله ای HTR-10، با در نظر گرفتن خاصیت ناهمگونی دوگانه، با استفاده از کدهای مونت کارلویی MCNPx2.7 و SUPER MC شبیه‌سازی شد. پس از شبیه‌سازی، ارتفاع بحرانی راکتور طبق جدول (۱) نزدیک به ۱۲۵ سانتی‌متر محاسبه شد. نتایج به دست آمده توافق خوبی را با مدارک آژانس بین المللی انرژی اتمی [۱] نشان می‌دهند. البته در روند شبیه‌سازی با کد مونت کارلویی SUPER MC، به دلیل وجود محدودیت‌های هندسی،



گلوله‌های سوخت به صورت همگن شبیه‌سازی شده‌اند. این همگن‌سازی گلوله سوخت باعث فاصله گرفتن هندسه مسئله با واقعیت می‌شود و در نتیجه ضریب تکثیر موثر کمتر از مقدار واقعی می‌شود [۲]. به همین دلیل نتایج کد SUPER MC با نتایج مرجع اندکی اختلاف دارد. علاوه بر آن توزیع شار نوترونی در راستای شعاعی و همچنین اثر میله‌های کنترل بر آن نیز محاسبه شدند. در مورد راکتورهای بستر گلوله‌ای با توجه به اینکه مجتمع سوختی وجود ندارد و موقعیت گلوله‌ها به طور تصادفی تغییر می‌کند، انتظار می‌رود که توزیع شار یکنواخت‌تری نسبت به بقیه راکتورها داشته باشند. این توزیع شار یکنواخت در شکل (۳) قابل مشاهده است. مطابق شکل (۴) و (۵) از دیگر نتایج به دست آمده در این پژوهش، قابلیت جابجایی طیف نوترون در این راکتور است. همان‌طور که مشاهده می‌شود طیف نوترون‌ها با افزایش دما به سمت ناحیه فوق‌حرارتی حرکت کرده و با پیک سطح مقطع شکافت $Pu(239)$ همپوشانی می‌کند. به طور کلی در این پژوهش پارامترهای نوترونیکی راکتور HTR-10 محاسبه شدند و نتایج به دست آمده با مراجع اعتبارسنجی گردیدند.

مراجع:

- [1] Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis Related to Initial Testing of the HTTR and HTR-10, L.BREY, Ed. IAEA-TECDOC- 1382, International Atomic Energy Agency, 2003.
- [2] Amin Abedi, Naser Vosoughi, Mohammad Bagher Ghofrani. An exact MCNP modeling of pebble bed reactors, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (2011)
- [3] Amin Abedi, Naser Vosoughi. Neutronic simulation of a pebble bed reactor considering its double heterogeneous nature. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (2012)
- [4] Khalil Moshkbar Bakhshayesh, Naser Vosoughi. A Simulation of a pebble bed reactor core by the MCNP-4C computer code. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (2009)
- [5] Shichang Liu, Zeguang Li. Random geometry capability in RMC code for explicit analysis of polytype particle/pebble and applications to HTR-10 benchmark, Department of Nuclear Engineering Physics, Tsinghua University, China (2018).
- [6] Volkan Seker. HTR-10 full core first criticality analysis with MCNP, Department of Nuclear Engineering Hacettepe University, Ankara, Turkey (2003).



بیست و پنجمین کنفرانس همتای ایران
۲۰۱۳ اسفندماه ۱۳۹۲- دانشگاه آزاد اسلامی (واحد پوشش)



[7] User Manual SuperMC3.2.0-Demo, FDS Team, China (2017).