



شبیه‌سازی قلب رآکتور گازی HTR-۱۰ با سوخت کروی و تعیین حداقل ارتفاع لازم به منظور ایجاد بحرانیت در رآکتور

کاوس عباسی^{۱*}، محمدحسین نبیری^۲

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه یاسوج، صندوق پستی: ۷۵۹۱۸۷۴۸۳۱، یاسوج - ایران
۲. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشگاه آزاد اسلامی آرسنجان، صندوق پستی: ۷۳۷۶۱۵۳۱۶۱، آرسنجان - ایران

*Email: kabbasi@yu.ac.ir

مقاله فنی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶ تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۴/۹ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۴/۲۳

چکیده

رآکتور HTR-۱۰ یک رآکتور بستر توپکی آزمایشی است که شبیه‌سازی شار نوترونی این رآکتور جهت توسعه این رآکتورها به دلایل مزیت‌های متعددی که دارند بسیار پر اهمیت است. از مزیت‌های این نوع رآکتور ایمنی و راندمان بالا و ماژولار بودن آن است. از این رو یکی از موضوعات مهم و قابل توجه کشورهای صاحب تکنولوژی هسته‌ای مطالعه و تحقیقات بر روی این نوع رآکتورها به منظور تجاری‌سازی آنها می‌باشد. از آنجاکه سوخت و کندکننده در رآکتور به شکل گوی‌های کروی است و به صورت تصادفی در قلب توزیع می‌شوند، بررسی شار نوترونی این رآکتور از طریق بررسی حداقل ارتفاع لازم برای بحرانیت رآکتور با توجه به نوع چینش سوخت و کندکننده بسیار مهم است. بنابراین، در این تحقیق روش جدیدی برای چینش توپک‌های سوخت و کندکننده، با حفظ نسبت ۴۳:۵۷ پیشنهاد داده شده است. محاسبات و شبیه‌سازی قلب با استفاده از کد MCNP صورت گرفته است. گاز هلیوم به عنوان خنک‌کننده در نظر گرفته شده و تغییرات راکتیویته بر اثر ورود میله‌های کنترل محاسبه شده است.

کلیدواژه‌ها: رآکتور بستر توپکی، ارتفاع بحرانیت، شار نوترونی، کد MCNP

Simulation of the HTR-10 reactor core with spherical fuel to obtain the minimum height to access reactor criticality

K. Abbasi^{*1}, M.H. Nayyeri²

1. Department of Physics, College of Sciences, Yasuj University, P.O.Box: 7591874831, Yasuj – Iran
2. Department of Nuclear Engineering, Islamic Azad University of Arsanjan Branch, P.O.Box: 7376153161, Arsanjan – Iran

Technical Paper

Received: 5.2.2024, Revised: 29.6.2024, Accepted: 13.7.2024

Abstract

The HTR-10 reactor is an experimental Pebble Bed Reactor (PBR), where simulating the neutron flux is crucial due to the reactor's multiple advantages, including safety, high efficiency, and modularity. As a result, studying and researching such reactors is a significant focus for countries with nuclear technology, especially for commercialization. Since both the fuel and moderator are in the form of spherical pebbles and are randomly distributed in the core, accurately evaluating the neutron flux is vital. This evaluation involves calculating the minimum height required for the reactor's criticality, based on the specific arrangement of fuel and moderator. In this study, a new method for arranging the fuel and moderator pellets, while maintaining a ratio of 43:57, has been proposed. The calculations were performed using the MCNP code. Helium gas was chosen as the coolant, and changes in reactivity due to the insertion of control rods were also calculated.

Keywords: Pebble bed reactor, Criticality height, Neutron flux, MCNP code



۱. مقدمه

سال‌ها پس از راه‌اندازی اولین رآکتور هسته‌ای با خنک‌کننده گازی در کالدر هال^۱ در سال ۱۹۵۶، انرژی هسته‌ای جایگاه مهمی را در تولید برق جهان کسب کرده است. مجمع بین‌المللی رآکتورهای نسل چهارم به منظور مطالعه و ترویج رآکتورهای با ویژگی‌های ایمنی پیشرفته، منع تکثیر سلاح‌های هسته‌ای، استفاده از منابع سوخت کارآمد و بهبود اقتصاد، تأسیس شد. از جمله این رآکتورها، رآکتور گازی با دمای بسیار بالا^۲ است که دمای خروجی گاز آن ۹۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. درجه حرارت بالا در چرخه اولیه، چرخه تبدیل حرارتی کارآمدی را مانند چرخه بخار فوق گرم و چرخه توربین گازی ممکن می‌کند. مهم‌ترین انگیزه برای توسعه فناوری رآکتورهای گازی با دمای بالا^۳، ویژگی‌های ایمنی پیشرفته آن در کنار قابلیت‌های درجه حرارت بالا است. در بعضی از طرح‌های رآکتورهای گازی با دمای بالا، راندمان حرارتی خالص بیش از ۴۵٪ قابل دستیابی است [۱].

طراحی مفهومی HTGR، ایمنی ذاتی، اندازه کوچک و متوسط و نیز قابلیت ماژولار بودن (ساخت به صورت قطعه‌ای و مونتاژ در محل نصب) آنها است. قلب HTGRها از نظر اندازه بسیار بزرگ است؛ بنابراین چگالی توان قلب آنها بسیار کم است. گرافیت مورد استفاده به‌عنوان کندکننده، ظرفیت حرارتی بالایی دارد. این امر این امکان را فراهم می‌آورد که پیش از آنکه دمای قلب رآکتور از حد مجاز فراتر رود، انرژی حرارتی بیشتری را جذب کند.

از دیگر ویژگی‌ها می‌توان به این مسئله اشاره کرد که سوخت، کندکننده و خنک‌کننده این رآکتور از نظر شیمیایی غیرفعال بوده و از سوی دیگر ذرات سوخت پوشش داده شده، قابلیت بالایی در نگهداری محصولات شکافت دارند. کلیه این عوامل موجب منفی شدن ضریب حرارتی راکتیویته رآکتور می‌شود [۲].

از میان شش فناوری هسته‌ای جایگزین که توسط مجمع بین‌المللی نسل چهارم توصیه شده است، رآکتورهای با دمای بسیار بالا^۴ نزدیک‌ترین و تنها مدلی است که برای تولید برق با بازده بالا و همچنین تولید هیدروژن با استفاده از انرژی هسته‌ای را امکان‌پذیر می‌سازد. علاوه بر این، VHTR در دستیابی به سطحی از ایمنی فراتر از حوادث مبنای طراحی عمل می‌کند و

از آنجا که مکانیسم‌های خنک‌کننده غیرفعال از ذوب قلب جلوگیری می‌کنند، هیچ محصول شکافت قابل توجهی از قلب آزاد نمی‌شود. یکی دیگر از مفاهیم ارائه شده برای HTGRها، استفاده از پلوتونیم در سطح غنای بالا (غنای ۹۵٪) که در سلاح‌های هسته‌ای استفاده می‌شود، در این رآکتورهاست. به همین دلیل این رآکتورها نسبت به قلب‌های مرسوم، مزیت مهمی در سیاست منع گسترش سلاح‌های اتمی دارند.

در طراحی رآکتورهای با درجه حرارت بسیار بالا (VHTRها)، دو مفهوم مورد مطالعه قرار گرفته است: رآکتورهای منشوری با عناصر سوخت بلوکی و رآکتورهای بستر توپکی (PBR) با عناصر سوخت کروی. ایمنی افزایش یافته در سوخت HTGR براساس طرح ذرات سوخت پوشش داده شده آن است که متشکل از ذرات کوچک اورانیومی است که با لایه‌های کربن و کربید سیلیکون پوشیده شده است. ذرات روکش داده شده می‌توانند بدون انتشار محصولات شکافت به محیط، در برابر فشار بالای گاز داخلی مقاومت کنند. خنک‌کننده هلیومی در این نوع رآکتورها، تکفاز بوده (تنها در حالت گازی است) و یک سیال بی‌اثر است؛ بنابراین از فعل و انفعالات شیمیایی بین سوخت، کندکننده و خنک‌کننده جلوگیری می‌شود.

رآکتورهای بستر توپکی یکی از انواع رآکتورهای گازی است که در این نوع رآکتور، سوخت و کندکننده به صورت گوی‌های کوچکی است که هنگامی که به درون قلب ریخته می‌شوند، به‌صورت تصادفی توزیع می‌گردند [۱-۴]. یکی از اهداف رآکتورهای بستر توپکی این است که بتوان تا حد امکان نیروگاه‌ها را به صورت ماژولار ساخت. این امر می‌تواند سهولت نصب نیروگاه‌ها و کیفیت آنها را بهبود بخشد.

با این وجود، رآکتورهای بستر توپکی دارای برخی خطراتی نیز هستند که ناشی از نوع سوخت آنها است. توپک‌های سوخت در برخورد با یکدیگر در معرض خرد شدن قرار می‌گیرند. همچنین به دلیل حرکت و تماس ذرات سوخت و کندکننده با بدنه رآکتور، گرافیت می‌تواند ساییده شده و گرد و غبار گرافیتی و ذرات کوچک‌تر را ایجاد کند. این ذرات می‌توانند در پایین قلب جمع شده و یا در نتیجه انتقال و تجمع بر روی سطوح اجزاء مختلف در مدار اول، از جمله مبدل حرارتی موجب کاهش بازده آن شوند [۲].

سایش بین عناصر سوخت و بازتابنده‌ها و نیز سایش بین عناصر سوخت و لوله‌های بارگیری مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که جدی‌ترین ساییدگی گرافیت

1. Calder Hall
2. Very High Temperature Gas Cooled Reactor (VHTGR)
3. High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)
4. VHTR

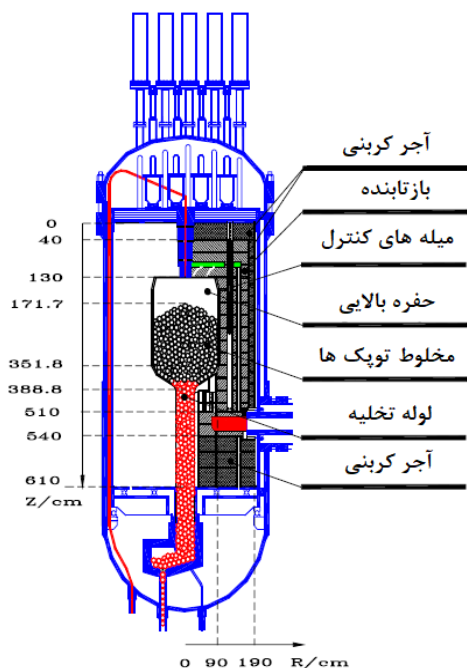


جدول ۱. مقایسه مطالعات انجام شده قبلی

ردیف	مرجع مطالعه	حداقل ارتفاع بحرانی (cm)	تفاوت نسبی	k
۱	دانشگاه Hanyang	۱۲۵	۰٫۰۶۷۲	۱٫۰۰۰۰۲
۲	مؤسسه ماساچوست	۱۲۷٫۵	۰٫۰۸۵۵	۱٫۰۰۰۵۰
۳	دانشگاه صنعتی شریف	۱۲۶	۰٫۰۷۵	۱٫۰۰۰۴۹
۴	کشور چین	۱۲۳٫۵۷۶	۰٫۰۵۶	۱٫۰۰۴۲
۵	کشور ترکیه	۱۳۳٫۳۷۴	۰٫۱۳	۱٫۰۲۵۳۱
۶	دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران	۱۲۶٫۸۸۳	۰٫۰۸	۱٫۰۰۰۱
۷	کار حاضر	۱۱۶٫۶		۱٫۰۰۴۸۸

جدول ۲. مشخصات اصلی رآکتور HTR-۱۰

خصوصیات طراحی رآکتور HTR-۱۰	
۱۰	توان گرمایی (MW)
۱۹۷	ارتفاع قلب (cm)
۱۸۰	قطر قلب (cm)
۳	فشار هلیوم مدار اول (MPa)
۲۵۰	دمای ورودی هلیوم (°C)
۷۰۰	دمای خروجی هلیوم (°C)
۵۷:۴۳	نسبت توپک‌های سوخت به کندکننده
۱۰	تعداد میله‌های کنترل
۷	تعداد حفره‌های توپک‌های جاذب



شکل ۱. نمایی از یک رآکتور بستر توپکی و محل قرارگیری میله‌های کنترل.

در ابتدای مراحل راه‌اندازی رخ می‌دهد و با ادامه روند، میزان سایش گرافیت کاهش می‌یابد. این اتفاق به این دلیل رخ می‌دهد که ناحیه تماس در ابتدا کم است، اما با ادامه سایش، ناحیه تماس رشد کرده و صاف می‌شود. این امر سطح توزیع فشار را افزایش و میزان سایش را کاهش می‌دهد [۵].

مطالعات انجام شده پیرامون این رآکتور در جدول ۱ آورده شده است [۴، ۶-۱۱]. همچنین مطالعه دیگری درباره این رآکتور برای محاسبه طیف نوترون درون توپک‌های سوخت در دو دمای ۹۰۰ و ۱۲۰۰ درجه کلین با استفاده از کد MCNPx انجام شده است، که نتیجه محاسبات تغییرات دمایی بسیار کمی را نشان می‌دهد [۱۲]. متوسط دما در این نوع رآکتورها نزدیک به ۱۰۰۰ درجه کلین است. در این مطالعه روش چینش جدیدی از گوی‌های سوخت تقریباً با حفظ نسبت سوخت به کندکننده ۵۷:۴۳ ارائه شده است. محاسبات با استفاده از کد MCNP و کتابخانه ENDFV برای محاسبه سطح مقطع انجام شده است.

۲. رآکتور بستر توپکی HTR-۱۰ چین

رآکتور HTR-۱۰ یک رآکتور بستر توپکی با خنک‌کننده گاز هلیوم و کندکننده گرافیت است. این رآکتور یک رآکتور آزمایشی با ظرفیت ۱۰ مگاوات است که در مؤسسه فناوری هسته‌ای پکن^۱ ساخته شده است. این رآکتور در سال ۲۰۰۰ میلادی تکمیل شد و برای اولین بار در ماه دسامبر همان سال به بحرانیّت رسید. مشخصات اصلی این رآکتور در جدول ۲ آمده است [۶، ۱۳].

عناصر سوخت از طریق لوله مرکزی بارگذاری سوخت به داخل قلب رآکتور ریخته و در بالای قلب توزیع می‌شوند. عناصر سوخت در قلب گردش می‌کنند و در نهایت از آن خارج می‌گردند. به منظور استفاده بهینه از سوخت و کاهش ماکزیمم پیک راکتیویته قلب، از عناصر سوخت به روش "چند بار گذر"^۲ استفاده می‌شود. بدین صورت که عناصر سوخت از ناحیه پایینی خارج شده و مجدداً از بالای قلب به درون آن وارد می‌شوند. هر توپک سوخت به طور متوسط ۵ بار از قلب عبور می‌کند [۱۴-۱۵].

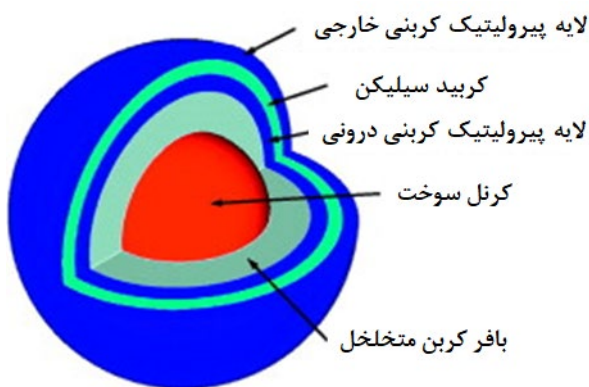
توپک‌های سوخت در قلب استوانه‌ای شکل رآکتور با ارتفاع متوسط ۱۹۷ سانتی‌متر، قطر ۱۸۰ سانتی‌متر و حجم تقریبی ۵٫۰ مترمکعب قرار می‌گیرند. نمای کلی این رآکتور در شکل ۱ نشان داده شده است.

1. INET
2. Multi Pass

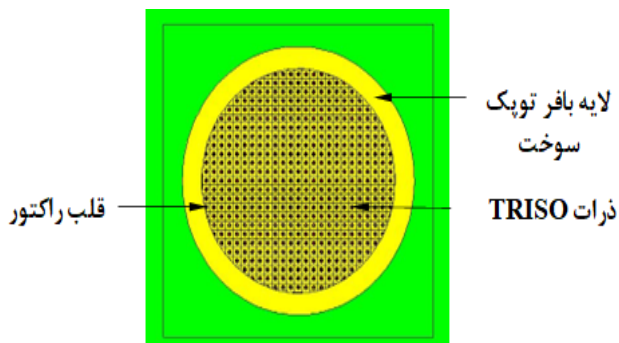


جدول ۳. مشخصات سوخت کروی راکتور HTR-10

۶	قطر توپک سوخت (cm)
۰/۵	ضخامت پوسته خراجی گرافیتی (cm)
۵	مقدار فلزات سنگین در هر توپک سوخت (gr)
۸۳۳۵	تعداد ذرات سوخت پوشش داده شده در هر توپک سوخت
٪۱۷	غنا سوخت
۰/۰۲۵	شعاع هسته UO_2 (cm)
۱۰/۴	چگالی UO_2 (gr/cm^3)
PyC/PyC/SiC/PyC	مواد تشکیل دهنده لایه‌ها
۰/۰۰۳۵، ۰/۰۰۴ ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۴	ضخامت لایه‌ها (cm)
۱/۱، ۱/۹، ۳/۱۸، ۱/۹	چگالی مواد تشکیل دهنده لایه‌ها (gr/cm^3)
۴	غلظت بور درون اورانیم (ppm)
۱/۳	غلظت بور درون گرافیت (ppm)
۶	قطر توپک‌های کندکننده (cm)
۱/۷۳	چگالی گرافیت توپک‌های کندکننده (gr/cm^3)
۱/۳	غلظت بور درون کندکننده (ppm)



شکل ۳. مغزی اورانیمی و لایه‌های شبیه‌سازی شده یک ذره TRISO.



شکل ۴. توپک سوخت حاوی ذرات TRISO با چیدمان همگن.

۳. سوخت کروی راکتور بستر توپکی

ذرات سوخت پوشش داده شده، گوی‌های بسیار ریزی به قطر یک میلی‌متر هستند. بیش از یک میلیارد (10^9) ذره سوخت پوشش داده شده در یک راکتور HTGR معمولی به کار می‌رود. توپک‌های سوختی در این راکتور (عناصر سوخت) به شکل کروی بوده و قطر آنها ۶۰ میلی‌متر است (شکل ۲). بخش سوخت این عنصر به قطر ۵۰ میلی‌متر و شامل ذرات سوخت دارای پوشش (CFP^1) و یا به اصطلاح ذرات $TRISO^2$ است که به طور تصادفی در یک ماتریس گرافیتی پخش شده‌اند [۱].

هر توپک سوخت حاوی حدود ۸۳۳۵ ذره پوشش داده شده یا $TRISO$ است. دانه‌های $TRISO$ از UO_2 غنی شده با غنا ۱۷٪ ساخته شده است که با دولایه داخلی پیرولیتیک کربن و یک لایه میانی کربید سیلیسیم و مجدداً یک لایه خارجی پیرولیتیک کربن پوشش داده شده است. تراکم لایه‌های پیرولیتیک با هم تفاوت دارند. مشخصات سوخت در جدول ۳ آمده است [۶]. ذرات $TRISO$ شبیه‌سازی شده در شکل ۳ و توپک‌های سوخت شبیه‌سازی شده توسط این مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است.

در این راکتور از کندکننده گرافیتی به صورت توپک‌های کروی با قطر ۶ سانتی‌متر استفاده شده است. به منظور قراردادن توپک‌های سوخت و کندکننده، باید شرایط طراحی این راکتور را در نظر گرفت. سپس پیچیدگی‌های موجود شناسایی شده و براساس آنها اقدام به شبیه‌سازی راکتور نمود.



شکل ۲. توپک‌های سوخت واقعی.

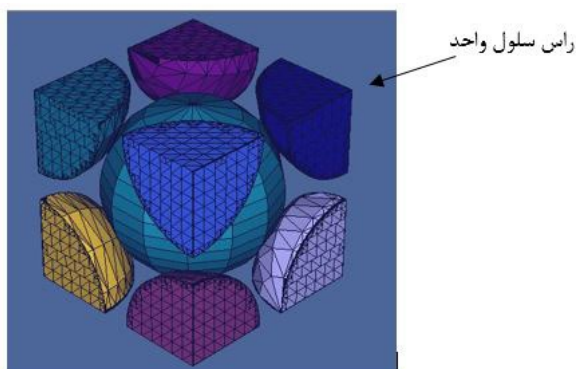
1. Coated Fuel Particles
2. Tristructural Isotropic



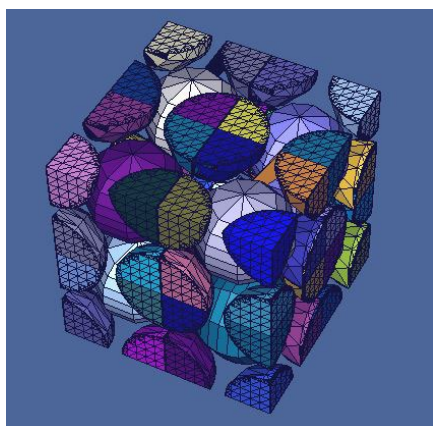
یک توپک در مرکز یک مکعب فرض می‌شود. در این شبیه‌سازی با قراردادن $\frac{1}{8}$ هر کره در گوشه‌ها، ساختاری را تشکیل می‌دهیم که آن را سلول واحد می‌نامیم. این طرح در شکل ۵ نشان داده شده است.

۲.۴ ابرسلول واحد

از آنجا که در هر سلول واحد، ۲ توپک (شامل ۱ توپک سالم و ۸ قسمت برابر یک هشتم توپک در ۸ رأس) وجود دارد، با کنار هم قرار گرفتن ۸ سلول واحد، یک سلول بزرگ شامل ۱۶ توپک را تعریف می‌کنیم. این سلول بزرگ که آن را ابرسلول واحد می‌نامیم، نقش حیاتی را در جای‌گذاری توپک‌های سوخت و کندکننده و نیز حفظ نسبت ۵۷:۴۳ توپک‌ها دارد. حفظ این نسبت، نقش مهمی در شبیه‌سازی دقیق قلب دارد و یکی از مهم‌ترین پیچیدگی‌های شبیه‌سازی در خصوص این نوع رآکتور است. شمای کلی این سلول در شکل ۶ نشان داده شده است. باید خاطر نشان کرد که کلیه توپک‌های تشکیل‌دهنده این سلول با یکدیگر یکسان نبوده؛ بلکه از نظر جنس مواد و چیدمان، با یکدیگر متفاوت هستند.



شکل ۵. سلول واحد.



شکل ۶. نحوه قرارگیری توپک‌ها در ابرسلول واحد با نمای سه‌بعدی.

در گام اول باید به این موضوع توجه کرد که توزیع توپک‌های سوخت و کندکننده درون قلب به صورت تصادفی است. در گام دوم باید به این مسئله توجه کرد که تعداد توپک‌های سوخت و کندکننده با هم برابر نیستند، بلکه این نسبت ۵۷:۴۳ است و تعداد توپک‌های سوخت کمی از توپک‌های کندکننده بیشتر است. بنابراین نمی‌توان به راحتی با استفاده از ویژگی تکرارشونده موجود در کد MCNP، قلب را با نسبت برابر توپک‌های سوخت و کندکننده پر کرد.

از سوی دیگر توپک‌ها کاملاً یکسان نیستند و از دو نوع سوخت و کندکننده ساخته شده‌اند؛ بنابراین علاوه بر چیدمان مخلوط این توپک‌ها، باید نوع آنها نیز در نظر گرفته شود. ویژگی دیگر این است که اعداد ۵۷ و ۴۳ اعداد اول بوده و نمی‌توان آنها را به اعداد کوچک‌تری تقسیم نمود.

این رآکتور دارای دو نوع ناهمگونی مجزا و مستقل است:

- ۱- ذرات TRISO به صورت تصادفی درون ناحیه ۲/۵ سانتی‌متری توپک سوخت پخش شده‌اند (شکل ۴).
- ۲- توپک‌های سوخت و کندکننده به صورت تصادفی درون قلب ریخته می‌شوند.

بنابراین با در نظر گرفتن مجموع شرایط و با انجام ساده‌سازی‌های زیر، قلب رآکتور HTR-۱۰ شبیه‌سازی شده است:

- ۱- قرارگیری همگون ذرات TRISO درون توپک سوخت (شکل ۴).

- ۲- شبیه‌سازی کامل قلب رآکتور با استفاده از یک الگوی تکرارشونده برای قرارگیری توپک‌های سوخت و کندکننده با رعایت نسبت ۵۷:۴۳.

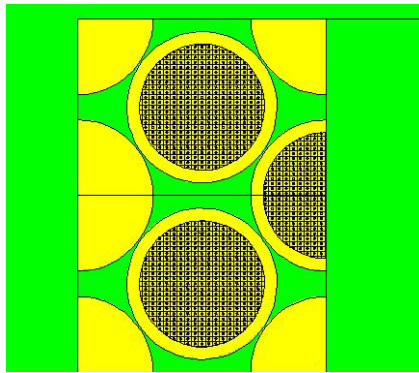
۴. روش کار

به منظور رعایت دقیق نسبت ۵۷:۴۳ توپک‌های سوخت و کندکننده و با توجه به این که این اعداد، اعداد اول بوده و دارای مقسوم علیه مشترک نمی‌باشند، توزیع سوخت و کندکننده یک مسئله بسیار مهمی در طراحی و شبیه‌سازی این رآکتورها می‌باشد.

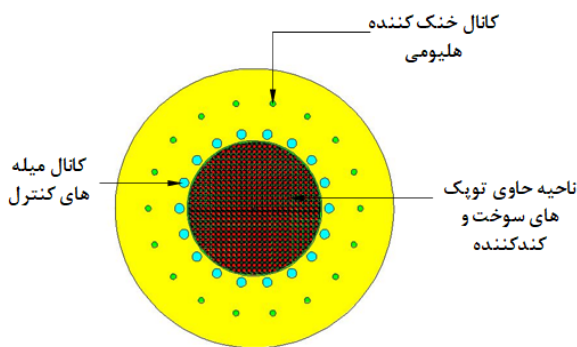
۱.۴ سلول واحد

از آنجا که در زمان پرکردن قلب با توپک‌ها، مرکز توپک‌های لایه بالاتر دقیقاً در راستای مرکز توپک‌های لایه پایین‌تر قرار نمی‌گیرند و هر توپک لایه بالایی در فضای خالی بین توپک‌های لایه پایینی قرار می‌گیرد، در این تحقیق پیشنهاد شده است که چیدمان توپک‌های سوخت و کندکننده به صورت مکعبی مرکز پر در نظر گرفته شود. بدین صورت که ۸ توپک در گوشه‌ها و

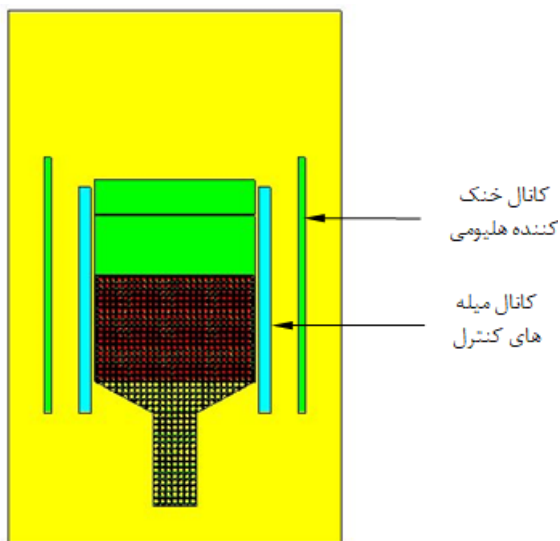




شکل ۷. چیدمان توپک‌ها در ابرسلول واحد در نمای دوبعدی.



شکل ۸. سطح مقطع افقی قلب.



شکل ۹. نمای جانبی راکتور.

۵. نتایج

در این مطالعه موارد زیر بررسی شده است:

- حداقل ارتفاع سوخت به‌منظور ایجاد بحرانیت در راکتور با خنک‌کننده هلیومی.
- شار درون قلب (شار محوری و شار شعاعی).

۳.۴ مواد و چیدمان توپک‌ها در ابرسلول واحد

این ابرسلول واحد به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که دارای دو ویژگی زیر باشند:

- ۱- توپک‌های مرکزی هر سلول از جنس سوخت باشد.
- ۲- یکی از توپک‌های شکسته که در یکی از رؤوس سلول واحد قرار دارد، از جنس سوخت و باقی توپک‌ها از جنس کندکننده باشد.

- ۳- سلول‌های مجاور و سلول‌های واقع در لایه دیگر، به‌گونه‌ای تعریف می‌شوند که توپک شکسته سوخت آنها، در مجاورت هم بوده و با کنار هم قرارگیری آنها، تشکیل یک توپک سوخت کامل دهد (شکل ۷).

بدین صورت هر ابرسلول مجموعاً دارای ۱۶ توپک، شامل ۹ توپک سوخت و ۷ توپک کندکننده خواهد بود؛ بنابراین خواهیم داشت:

- ۱- تعداد کل توپک‌های موجود در هر ابرسلول: ۱۶ توپک
 - ۲- تعداد کل توپک‌های سوخت در هر ابرسلول واحد: ۹ توپک
 - ۳- تعداد کل توپک‌های سوخت در هر ابرسلول واحد: ۷ توپک
- بنابراین نسبت تعداد توپک‌های سوخت به کندکننده در هر ابرسلول برابر خواهد بود با:

الف: نسبت توپک‌های سوخت به تعداد کل توپک‌ها:

$$\frac{9}{16} = 0.5625 \quad (1)$$

ب: نسبت توپک‌های کندکننده به تعداد کل توپک‌ها:

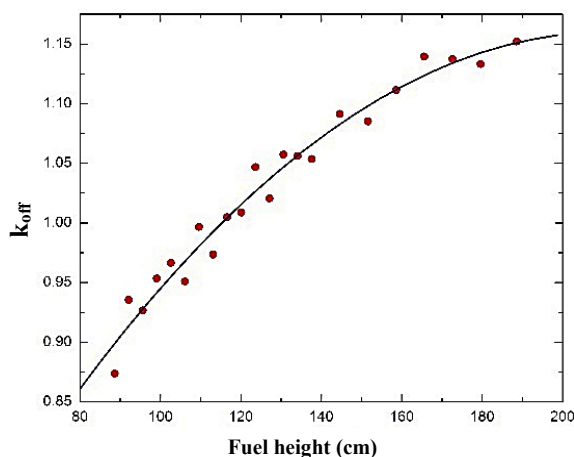
$$\frac{7}{16} = 0.4375 \quad (2)$$

مشاهده می‌شود که نسبت سوخت به کندکننده (۴۳/۵۷): (۵۶/۲۵) خواهد بود که به طور قابل‌قبولی به نسبت واقعی تعداد توپک‌های سوخت به کندکننده یعنی مقدار ۴۳:۵۷ نزدیک است.

در مرحله بعد با تعریف سلول‌های شبکه با ابعاد ابرسلول واحد، کل قلب راکتور پوشش داده می‌شود. ارتفاع کل قلب راکتور ۱۹۰ سانتی‌متر است که با تغییر ارتفاع ناحیه‌ای که با ابرسلول واحد پر می‌شود، می‌توان مقدار سوخت و کندکننده را تنظیم کرد. با افزایش گام به گام ارتفاع این محدوده، حداقل ارتفاع لازم جهت بحرانیت راکتور محاسبه می‌شود.

در شکل‌های ۸ و ۹، سطح مقطع افقی و نمای جانبی قلب همراه با چیدمان کانال‌های هلیوم و میله‌های کنترل که در این تحقیق شبیه‌سازی شده‌اند، نشان داده شده است.

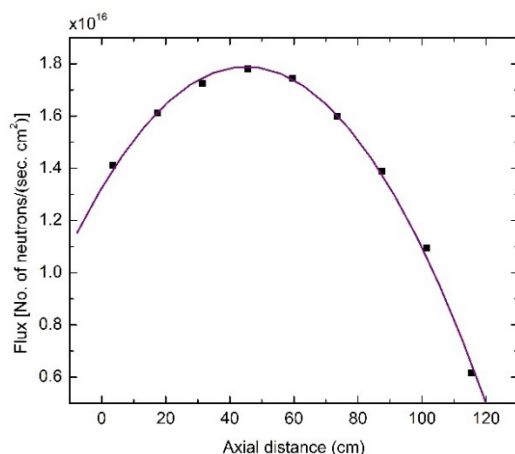




شکل ۱۰. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر براساس ارتفاع سوخت در قلب برای خنک کننده هلیوم.

جدول ۵. شار محوری

شار $\left(\frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right)$	ارتفاع از کف قلب (cm)
1.41×10^{16}	۳٫۵
1.61×10^{16}	۱۷٫۵
1.73×10^{16}	۳۱٫۵
1.78×10^{16}	۴۵٫۵
1.75×10^{16}	۵۹٫۵
1.60×10^{16}	۷۳٫۵
1.39×10^{16}	۸۷٫۵
1.10×10^{16}	۱۰۱٫۵
6.16×10^{15}	۱۱۵٫۵



شکل ۱۱. شار محوری.

۲.۲.۵ شار شعاعی

نتایج حاصل از شبیه سازی مقدار شار درون قلب رآکتور در راستای شعاع قلب در جدول ۶ و شکل ۱۲ نشان داده شده است. نتایج محاسبات در این حالت نیز نشان می دهد که شار در مرکز قلب بیشترین مقدار را دارد و با دور شدن از مرکز در راستای شعاع، کاهش می یابد.

۱.۵ بررسی حداقل ارتفاع سوخت لازم به منظور ایجاد بحرانیت در رآکتور با خنک کننده گاز هلیوم

در این شبیه سازی ارتفاع سوخت موجود در قلب در گام های ۳/۵ سانتی متری افزایش داده شده است. این فاصله در نزدیکی ارتفاع بحرانیت پیش بینی شده انجام شده و با افزایش ارتفاع سوخت و عبور k از مقدار ۱، گام افزایش ارتفاع را به ۷ سانتی متر (ارتفاع یک ابرسلول واحد) افزایش دادیم. این روند تا پر شدن قلب ادامه یافته است.

برای هر لایه اضافه شده توپک های سوخت و کندکننده، با استفاده از کد MCNP مقدار ضریب تکثیر مؤثر (k) محاسبه شده است.

بررسی تغییرات ضریب تکثیر مؤثر نسبت به ارتفاع سوخت در حالتی که از هلیوم به عنوان خنک کننده استفاده شود مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج حاصل در جدول ۴ و شکل ۱۰ آورده شده است.

نتایج مندرج در این جدول نشان می دهد که در صورت استفاده از گاز هلیوم به عنوان خنک کننده، رآکتور در ارتفاع ۱۱۶/۶ سانتی متر به بحرانیت می رسد.

۲.۵ شار درون قلب رآکتور

۱.۲.۵ شار محوری

نتایج حاصل از شبیه سازی مقدار شار درون قلب رآکتور در راستای محور قلب در جدول ۵ و شکل ۱۱ نشان داده شده است. نتایج محاسبات نشان می دهد که همان طور که انتظار می رفت شار در مرکز قلب بیشترین مقدار را دارد و با دور شدن از مرکز در راستای محور، شار کاهش می یابد.

جدول ۴. تغییرات ضریب تکثیر مؤثر براساس ارتفاع سوخت با خنک کننده هلیوم

ارتفاع سوخت (cm)	k	ارتفاع سوخت (cm)	k
۸۸٫۶	۰٫۸۷۳۶۵	۱۲۷٫۱	۱٫۰۲۰۶۲
۹۲٫۱	۰٫۹۳۵۴۸	۱۳۰٫۶	۱٫۰۵۷۳۳
۹۵٫۶	۰٫۹۲۶۶۵	۱۳۴٫۱	۱٫۰۵۶۰۶
۹۹٫۱	۰٫۹۵۳۴۷	۱۳۷٫۶	۱٫۰۵۳۵۶
۱۰۲٫۶	۰٫۹۶۶۵۸	۱۴۴٫۶	۱٫۰۹۱۳۶
۱۰۶٫۱	۰٫۹۵۰۹۹	۱۵۱٫۶	۱٫۰۸۵۰۶
۱۰۹٫۶	۰٫۹۹۶۷	۱۵۸٫۶	۱٫۱۱۱۴۷
۱۱۳٫۱	۰٫۹۷۳۴۷	۱۶۵٫۶	۱٫۱۳۹۴۹
۱۱۶٫۶	۱٫۰۰۴۸۸	۱۷۲٫۶	۱٫۱۳۷۴۶
۱۲۰٫۱	۱٫۰۰۸۷۳	۱۷۹٫۶	۱٫۱۳۳۲۴
۱۲۳٫۶	۱٫۰۰۴۶۸	۱۸۸٫۶	۱٫۱۵۲۱۸

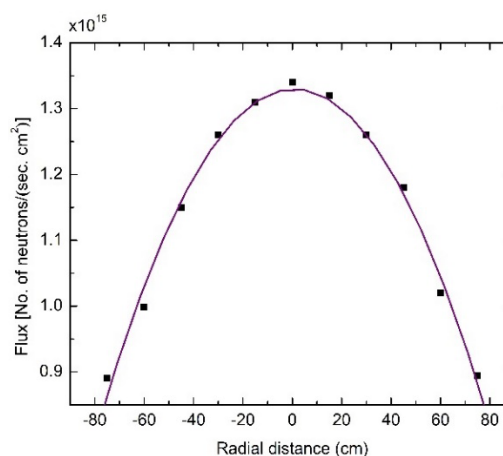


مراجع

1. TECDOC-1645. High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials. [International Atomic Energy Agency \(IAEA\), Vienna, Austria](#). 2010.
2. Halla-aho L. Development of an HTR-10 model in the Serpent reactor physics code. [Lappeenranta University of Technology](#). 2014.
3. Tang Y, Zhang L, Guo Q, Xia B, Yin Z, Cao J. Analysis of the pebble burnup profile in a pebble-bed nuclear reactor. [Nuclear Engineering and Design](#). 2019;345(15):233-251.
4. Abedi A, Vosoughi N. An exact MCNP modeling of pebble bed reactors. [2011 International Nuclear Atlantic Conference-INAC](#). 2011.
5. Beck J.M, Pincock L.F. High Temperature Gas-Cooled Reactors Lessons Learned Applicable to the Next Generation Nuclear Plant. [INL/EXT-10-19329. Idaho National Laboratory](#). 2011.
6. Li W, Yu G, Wei C. Research on benchmark calculation and analysis of HTR-10 with RMC code. [2014](#).
7. Kim H.C, Kim S.H, Kim J.K. A new strategy to simulate a random geometry in a pebble-bed core with the Monte Carlo code MCNP. [2011](#).
8. Lebenhaft J.R. MCNP4B modeling of pebble-bed reactors. [2001](#).
9. Çolak Ü, Seker V. Monte Carlo Criticality Calculations for a Pebble Bed Reactor with MCNP. [2005](#).
10. Rosales J, Muñoz A, García C, García L, Brayner C, Pérez J, Abánades A. Computational Model for the Neutronic Simulation of Pebble Bed Reactor's Core Using MCNPX. [International Journal of Nuclear Energy](#). 2014.
11. Hosseini S.A, Athari-Allaf M. Synthesis of spherical bed type reactors with MCNP code. [Physics Research Journal](#), 2012;NO. 2.
12. Kolali A, Noorghasemi Gharghechi H, Ramazani I, Vosoughi N. Simulation and neutronic calculations of HTR10 reactor using SUPER MC and MCNPx2.7 nuclear calculation codes. [25th Iran Nuclear Conference](#). 2017 March.
13. Zuhair, Suwoto, Setiadipura T, Kuijper J.C. The effects of fuel type on control rod reactivity of pebble-bed reactor. [Nukleonika](#). 2019;64(4):131-138.
14. Wu Z, Lin D, Zhong D. The design features of the HTR-10. [Nuclear Engineering and Design](#). [2002;218:25-32](#).
15. Suikkanen H, Ritvanen J, Jalali P, Kyrki-Rajamäki R. Discrete element modelling of pebble packing in pebble bed reactors. [Nuclear Engineering and Design](#). 2014 July 1;273:24-32.

جدول ۶. شار شعاعی

شار $\left(\frac{\text{neutrons}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right)$	فاصله از مرکز قلب (cm)
$8,90 \times 10^{14}$	-۷۵
$9,98 \times 10^{14}$	-۶۰
$1,15 \times 10^{15}$	-۴۵
$1,26 \times 10^{15}$	-۳۰
$1,31 \times 10^{15}$	-۱۵
$1,34 \times 10^{15}$	۰
$1,32 \times 10^{15}$	۱۵
$1,26 \times 10^{15}$	۳۰
$1,18 \times 10^{15}$	۴۵
$1,02 \times 10^{14}$	۶۰
$8,94 \times 10^{14}$	۷۵



شکل ۱۲. شار شعاعی.

۶. بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه چیدمان سوخت و کندکننده‌ها کروی شکل در راکتور بستر توپکی چین با استفاده از نرم‌افزار MCNP شبیه‌سازی گردید و نوع چیدمان به طریقی صورت گرفت که نسبت توپک‌های سوخت به کندکننده یعنی نسبت ۵۷:۴۳ حفظ شود. پارامترهای نظیر بررسی حداقل ارتفاع سوخت لازم به منظور ایجاد بحرانیّت در راکتور، شار شعاعی و شار محوری محاسبه شدند. حداقل ارتفاع رسیدن به بحرانیّت برابر ۱۱۶/۶ در حالتی که از هلیم به عنوان خنک‌کننده استفاده شود به دست آمد که با نتایج قبلی که در جدول ۱ آمده است، قابل مقایسه و مقداری کاهش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که با بهبود چیدمان سوخت و کندکننده در قلب می‌توان ارتفاع بحرانیّت را کاهش داد که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تری باشد.

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

عباسی، کاوس، نیری، محمدحسین. (۱۴۰۴). شبیه‌سازی قلب راکتور گازی HTR-۱۰ با سوخت کروی و تعیین حداقل ارتفاع لازم به منظور ایجاد بحرانیّت در راکتور. [مجله علوم، مهندسی و فناوری هسته‌ای](#)، ۱۱(۱)، ۱۵۷-۱۶۴. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2024.1527.1996>. Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1662.html

