

محاسبات فرسایش سوخت برای رآکتور گرافیت-گازی HTR-10 با سوخت اکسید اورانیوم و سوخت ترکیبی اکسید تورنیوم-پلوتونیوم

علی کللی، داود نقوی دیزجی، ایمان رضانی، ناصر وثوقی*

دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۱۴۵۶۵-۱۱۱۴، تهران - ایران

*Email: nvosoughi@sharif.edu

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۸

چکیده

در این پژوهش رآکتور گرافیت-گاز HTR-10، با در نظر گرفتن ماهیت تصادفی قرارگیری گلوله‌های سوخت و کندکننده، با استفاده از کد مونت کارلو MCNPx شبیه‌سازی شده است. به منظور راستی‌آزمایی، پارامترهای نوترونی قلب محاسبه شده و با مدارک آژانس بین‌المللی انرژی اتمی مقایسه می‌شود. محاسبات فرسایش برای دو نوع سوخت اکسید اورانیوم و سوخت ترکیبی اکسید تورنیوم-پلوتونیوم انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که سوخت ترکیبی حدود ۲۸ درصد طول سیکل بیش‌تری نسبت به سوخت اکسید اورانیوم دارد و همچنین از نظر پادمان هسته‌ای نیز استفاده از این نوع سوخت بهتر است.

کلیدواژه‌ها: فرسایش سوخت، اکسید اورانیوم، اکسید تورنیوم-پلوتونیوم، HTR-10، MCNPx

Calculations of fuel burn up for HTR-10 graphite-gas reactor with UO₂ fuel and ThO₂-PuO₂ combined fuel

A. Kolali, D. Naghavi Dizaji, I. Ramezani, N. Vosoughi*

Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.BOX: 14565-1114, Tehran - Iran

Research Article

Received 23.12.2021, Accepted 17.2.2022

Abstract

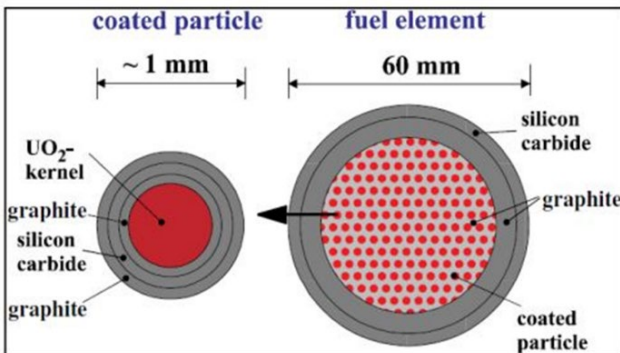
In this study, the graphite-gas reactor HTR-10 is simulated using the MCNPx Monte Carlo code, considering the random placement of the fuel and moderator pebbles. Core neutronic parameters are calculated and compared with IAEA documents. Burn up calculations are performed for uranium oxide fuel and combined thorium-plutonium oxide fuel. The results show that the combined fuel has a longer cycle length about 28 percent more than the uranium oxide fuel. It is also better used in relation to nuclear safeguards.

Keywords: Burn up, Uranium oxide, Thorium-plutonium oxide, HTR-10, MCNPx

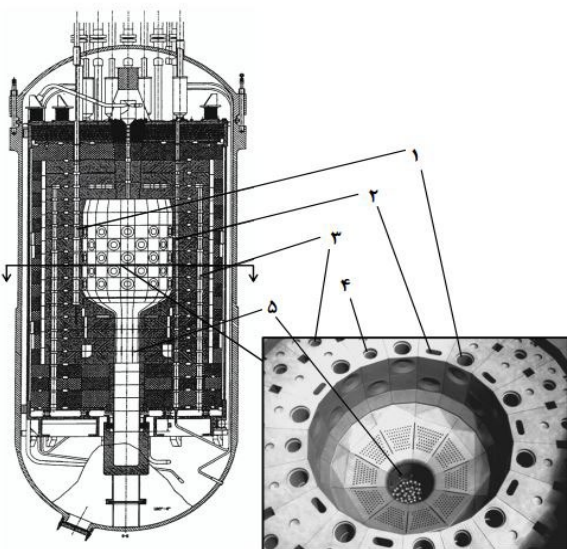


۱. مقدمه

گلوله‌های سوخت از اورانیوم با غنای ۱۷ درصد استفاده شده است و فشار هلیوم در مدار اولیه ۳ مگاپاسکال است. در طرح کلی رآکتور، گرافیت به‌عنوان ماده استفاده‌شده در ساختار اولیه قلب انتخاب‌شده است که در بالا و پایین و اطراف قلب به‌عنوان بازتابنده قرار داده شده است. ضخامت بازتابنده ۱۰۰ سانتی‌متر است که شامل یک لایه بلوک کربنی حاوی بور نیز است. کانال‌های هلیوم سرد در داخل بازتابنده‌های جانبی طراحی شده‌اند. قلب رآکتور توسط گلوله‌های کروی کندکننده و سوخت (با قطر ۶ سانتی‌متر) که حاوی ذرات ^{235}U TRISO است، پر شده است. مطابق با شکل ۱، TRISOها ذرات پوشش داده شده حاوی ماده شکاف هستند که قطر آنها تقریباً ۱ میلی‌متر است. در بازتابنده جانبی نزدیک قلب فعال، ده کانال با قطر ۱۳۰ میلی‌متر برای میله‌های کنترل، هفت کانال برای توپ‌های جاذب و سه کانال با قطر ۱۳۰ میلی‌متر برای اهداف پرتوافکنی تعبیه شده است. شماتیک رآکتور و هندسه آن در شکل ۲ و مشخصات کلی رآکتور در جدول ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱. نمایی از گلوله سوخت و TRISO [۱].



شکل ۲. شماتیک رآکتور گرافیت-گازی HTR-۱۰.

(۱) کانال میله کنترل ۲. کانال گلوله‌های جاذب ۳. کانال هلیوم ۴. کانال پرتودهی ۵. کانال تخلیه).

امروزه استفاده از انرژی هسته‌ای به‌عنوان یک انرژی پاک و دارای چگالی انرژی بالاتر نسبت به دیگر منابع انرژی در حال گسترش است. بر این اساس نسل جدید رآکتورهای هسته‌ای با نام نسل چهارم معرفی شده‌اند که مهم‌ترین ویژگی آنها ایمنی بالاتر نسبت به نسل‌های گذشته است. رآکتور گازی با دمای خیلی بالا یکی از نامزدهای معرفی‌شده این نسل است. این نوع رآکتورها از گاز هلیوم به‌عنوان خنک‌کننده و از گرافیت به‌عنوان کندکننده استفاده می‌کنند که به دلیل گام دمایی مناسبشان می‌توانند به دماهای بالاتر از ۱۲۰۰ کلوین نیز برسند. رآکتورهای با دما بسیار بالا خود به دو نوع منشوری و بسترگلوله‌ای^۲ تقسیم می‌شوند. در نوع بسترگلوله‌ای، عناصر سوخت گلوله‌هایی با قطر ۶ سانتی‌متر هستند که هزاران ذره سوخت پوشش داده‌شده را به‌صورت تصادفی در شبکه گرافیتی جا داده‌اند [۱]. همچنین قلب رآکتور با گلوله‌های سوخت و کندکننده به‌صورت تصادفی و با نسبت غیریکسان پر شده است. به این دو ماهیت تصادفی رآکتورهای بسترگلوله‌ای در اصطلاح ناهمگونی دوگانه^۳ گفته می‌شود [۲]. راکتیویته اضافه به دلیل وجود قابلیت تعویض سوخت در حین کار در رآکتورهای بسترگلوله‌ای بسیار ناچیز است و این موضوع از دید ایمنی رآکتور بسیار حایز اهمیت است. قابلیت تعویض سوخت در حین کار علاوه بر مزیت فوق منجر به افزایش ضریب ظرفیت^۴، داشتن قابلیت تغییر نسبت کندکننده و سوخت در قلب [۳]، بهره‌برداری بهینه‌تر از سوخت یا به‌عبارتی دیگر فرسایش سوخت بیش‌تر و در نتیجه اقتصاد سوخت بهتر می‌شود.

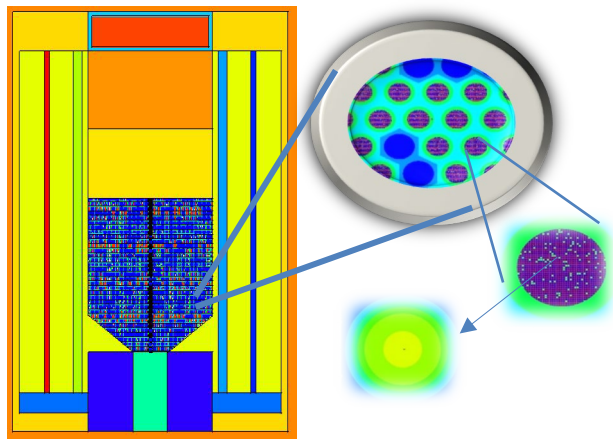
در این پژوهش از داده‌های رآکتور تحقیقاتی HTR-۱۰، که یک رآکتور گرافیت-گاز از نوع بسترگلوله‌ای است، استفاده می‌شود [۱، ۴، ۵] و این رآکتور با استفاده از کد مونت‌کارلویی MCNPx و همچنین با در نظر گرفتن ناهمگونی دوگانه شبیه‌سازی می‌شود. پس‌از آن به‌منظور حصول اطمینان از صحت شبیه‌سازی به انجام محاسبات نوترونیک قلب از جمله محاسبه ارتفاع بحرانی پرداخته می‌شود و با مراجع مقایسه می‌شود. در نهایت به بررسی و تحلیل محاسبات فرسایش سوخت برای دو نوع سوخت اکسید اورانیوم و اکسید توریوم-پلوتونیوم پرداخته می‌شود.

۲. معرفی رآکتور بسترگلوله‌ای HTR-۱۰

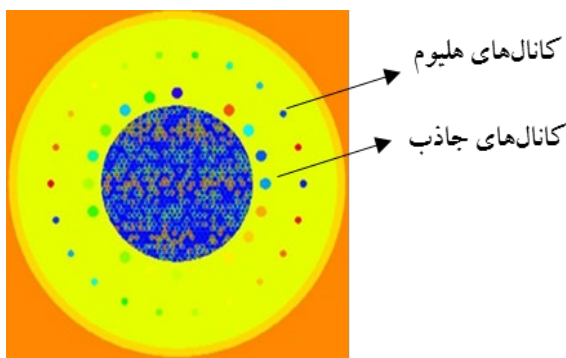
قلب رآکتور گرافیت-گاز HTR-۱۰، دارای قطر ۱۸۰ سانتی‌متر و حجم ۵ مترمکعب است که توسط بازتابنده‌های گرافیتی احاطه شده است و توسط ۲۷۰۰۰ گلوله پر شده است.

1. Very High Temperature Reactor
2. Pebble Bed
3. Stochastic Double Heterogeneity
4. Capacity Factor





(الف)



(ب)

شکل ۳. برش طولی (الف) و عرضی (ب) قلب رآکتور HTR-10.

ارتفاع (سانتی‌متر)	ضریب تکثیر	انحراف معیار	ارتفاع مرجع (سانتی‌متر)	ضریب تکثیر مرجع
۱۲۵	۱,۰۰۲۴۷	۰,۰۰۴۳۴	۱۲۳,۵۶۷	۱,۰۰۴۷۹
۱۵۵	۱,۰۰۶۵۳۵	۰,۰۰۴۷۳	۱۵۲,۹۷۰	۱,۰۰۸۲۷۰
۱۹۱	۱,۱۲۵۳۱	۰,۰۰۵۴۲	۱۹۲,۱۶۲	۱,۱۵۶۸۳

از دیگر محاسبات صورت گرفته در این بخش، توزیع شار کل نوترونی بدون حضور و با حضور کانال‌های جاذب است که نتایج آن به‌طور کیفی در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. همچنین توزیع شار محوری نیز در شکل ۵ قابل مشاهده است. در رآکتورهای بسترگلوله‌ای برخلاف رآکتورهای مرسوم، میله‌های کنترل داخل قلب قرار نمی‌گیرند بلکه مطابق شکل ۳ در یک مقطع استوانه‌ای حول قلب و درون کانال‌های جاذب قرار می‌گیرند. مطابق جدول ۳، ارزش انتگرالی یک میله کنترل برای قلب کامل در مقایسه با کارهای انجام شده [۱]، برابر با ۱,۴۱۶ و انحراف معیار ۰,۰۰۹ نتیجه می‌شود.

جدول ۱. مشخصات هندسی و مواد مورد استفاده در شبیه‌سازی [۱]

مقدار	پارامتر (واحد)
۱۰	قدرت حرارتی رآکتور (مگاوات)
۳	فشار گاز هلیوم (مگا پاسکال)
۱۸۰	قطر قلب رآکتور (سانتی‌متر)
۱۹۷	متوسط ارتفاع قلب (سانتی‌متر)
۷۰۰	متوسط دمای هلیوم خروجی (درجه سلسیوس)
۲۵۰	متوسط دمای هلیوم ورودی (درجه سلسیوس)
۱۰	تعداد میله‌های کنترل اطراف قلب
۷	تعداد کانال گلوله‌های جاذب اطراف قلب
۵	وزن ماده شکافا در هر گلوله سوخت (گرم)
۶	قطر گلوله‌ها (سانتی‌متر)
۱,۷۲۳ - ۱,۸۴۰	چگالی گرافیت در گلوله کندکننده (گرم بر سانتی‌متر مکعب)
۴	مقدار ناخالصی بور موجود در سوخت (ppm)
۱,۳	مقدار ناخالصی بور موجود در گرافیت گلوله سوخت (ppm)
۱۰,۴	چگالی اکسید اورانیوم (گرم بر سانتی‌متر مکعب)

۳. روش کار

شبیه‌سازی با TRISOها که کوچک‌ترین جزء رآکتور هستند، شروع می‌شود. این ذرات شبیه‌سازی شده که تعداد آن‌ها بین ۸۰۰۰ تا ۹۰۰۰ در نظر گرفته شده است، به‌صورت کاملاً تصادفی و به‌نحوی که جرم اورانیوم داخل گلوله سوخت ۵ گرم باشد، درون گلوله سوخت قرار داده شده‌اند [۶، ۷].

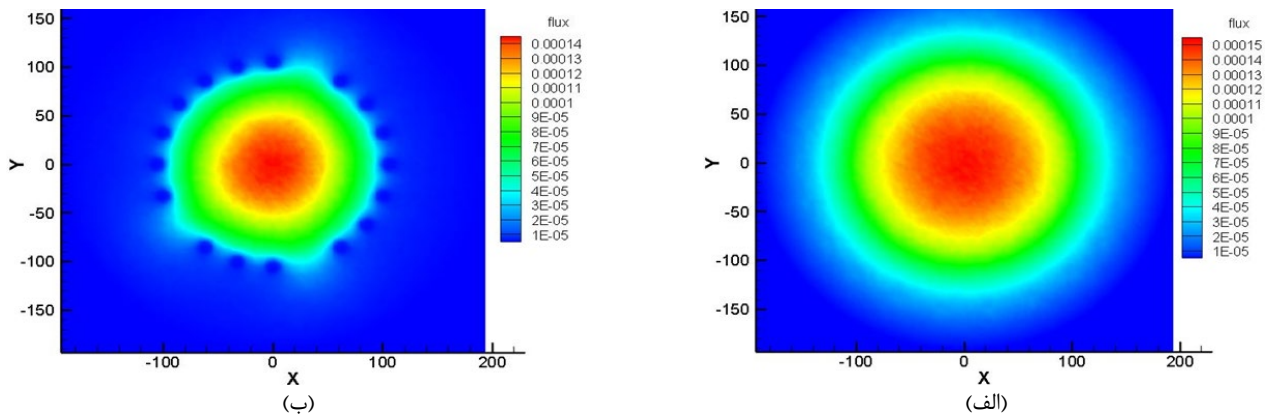
در ادامه، این گلوله سوخت به همراه گلوله کندکننده با نسبت غیریکسان و به‌طور کاملاً تصادفی درون قلب رآکتور قرار گرفته‌اند. به‌منظور قرارگیری تصادفی TRISOها درون گلوله سوخت و همچنین قرارگیری تصادفی گلوله‌های سوخت و کندکننده با نسبت غیریکسان ۵۷ به ۴۳ درون قلب رآکتور [۱]، با استفاده از برنامه‌نویسی فرتن ماتریس‌هایی تولید می‌شود. این ماتریس‌ها که به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند، به فایل ورودی کد MCNPx منتقل شدند که در نهایت هندسه موردنظر قلب رآکتور مطابق با شکل ۳ شبیه‌سازی می‌شود.

۴. نتایج و بحث

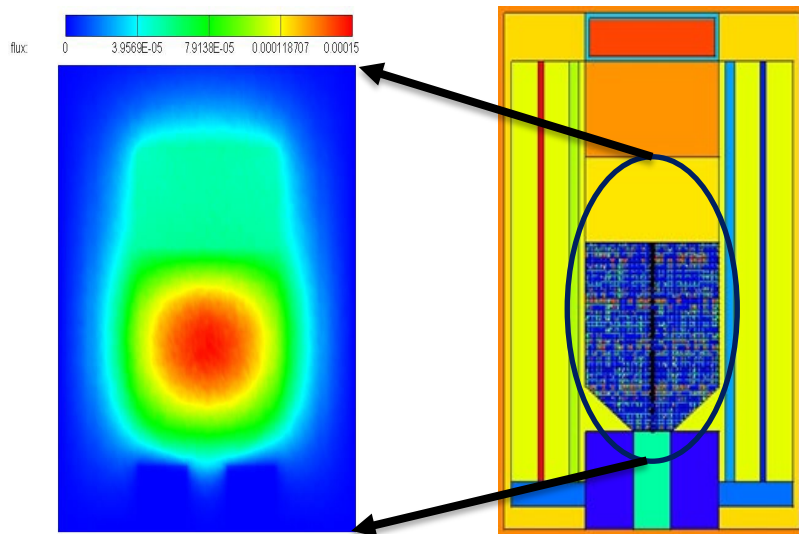
پس از شبیه‌سازی قلب رآکتور، اولین گام جهت راستی آزمایی محاسبه مقدار ارتفاع بحرانی است. محیط از جنس هلیوم و دمای قلب به‌صورت یکنواخت ۲۰ درجه سلسیوس یعنی حالت کاری سرد صفر قدرت^۱ در نظر گرفته شده است. مطابق با جدول ۲، بحرانیات در ارتفاع ۱۲۵ سانتی‌متر صورت گرفته است که نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با مرجع [۱] دارند.

1. Cold Zero Power





شکل ۴. توزیع شار نوترونی شعاعی بدون (الف) و با (ب) وجود کانال جاذب.



شکل ۵. توزیع شار نوترونی در راستای محوری.

با تغییر نوع گلوله‌های سوخت قلب از اکسید اورانیوم به اکسید توریوم به‌علاوه اکسید پلوتونیوم نیز محاسبات فرسایش سوخت انجام شده است. برای این منظور TRISOها به نسبت $37/60$ درصد و $62/40$ درصد به ترتیب از اکسید پلوتونیوم و اکسید توریوم پر شده‌اند. استفاده از این درصدها به علت به دست آوردن ارتفاع بحرانی 125 سانتی‌متری است. برای این نوع سوخت، تغییرات ضریب تکثیر برحسب فرسایش سوخت مطابق شکل ۸ به دست آمد و تغییرات جرم ایزوتوپ‌های مهم از جمله اورانیوم 233 برای این حالت نیز مطابق شکل ۹ نتیجه شده است. مطابق انتظار با توجه به وجود توریوم، اورانیوم 233 تولید می‌شود هم‌چنین پلوتونیوم 239 رند نزولی دارد که نشان‌دهنده مصرف آن است. برای سوخت اکسید توریوم-پلوتونیوم، طول سیکل برابر 450 روز و هم‌چنین فرسایش سوخت تخلیه برابر با $58/92 \frac{\text{GW.d}}{\text{MTU}}$ به دست آمد.

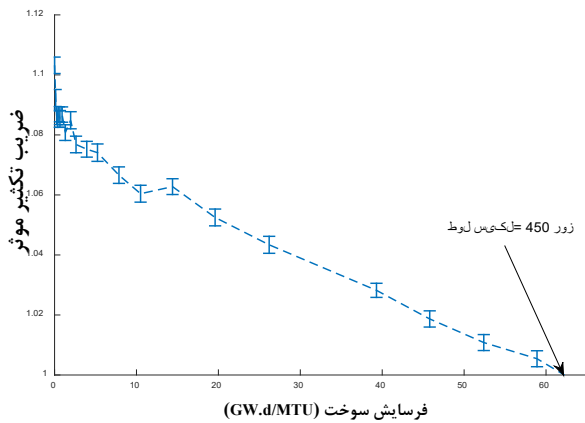
جدول ۳. ارزش انتگرالی یک میله کنترل برای سوخت اکسید اورانیوم

ارزش انتگرالی (%)	این پژوهش	چین	آلمان	فرانسه
-	۱,۴۱۶	۱,۳۴۳	۱,۴۸۰	۱,۳۵۰

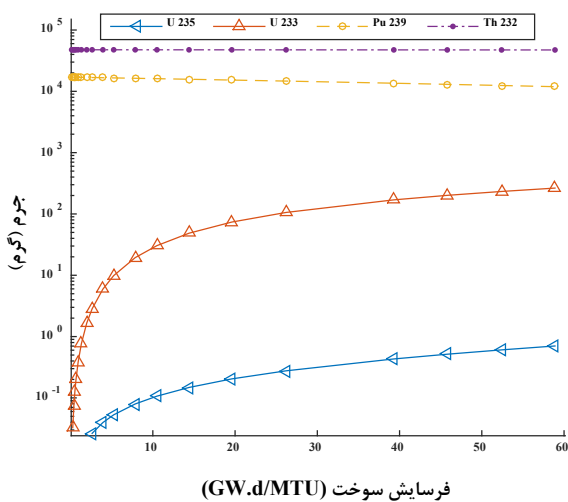
پس از راستی‌آزمایی قلب رآکتور شبیه‌سازی شده، به بررسی فرسایش سوخت رآکتور در حالت کاری گرم با قدرت کامل^۱ پرداخته می‌شود. برای این منظور برای قلب پر شده با سوخت تازه اکسید اورانیوم و با غنای 17 درصد محاسبات انجام شده که تغییرات ضریب تکثیر برحسب فرسایش سوخت مطابق شکل ۶ به دست آمده است. هم‌چنین طول سیکل برابر با 350 روز و فرسایش تخلیه برابر $45/76 \frac{\text{GW.d}}{\text{MTU}}$ نتیجه شده است. تغییرات جرم اورانیوم و پلوتونیوم برای این حالت نیز مطابق شکل ۷ به دست می‌آید. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل وجود اورانیوم 238 ، جرم پلوتونیوم 239 روند صعودی دارد. لازم به ذکر است که جرم پلوتونیوم 239 تولیدی در انتهای سیکل برابر 360 گرم است.

1. Hot Full Power

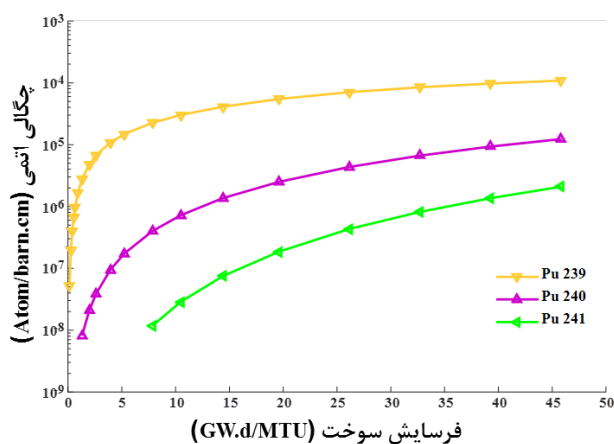




شکل ۸. تغییرات ضریب تکثیر برحسب فرسایش سوخت برای سوخت اکسید پلوتونیوم و توریم.

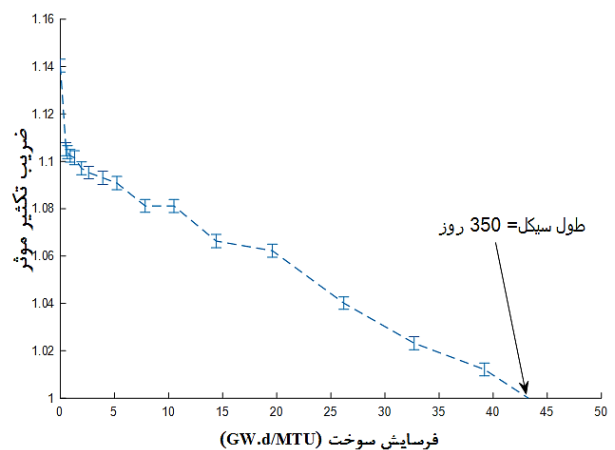


شکل ۹. تغییرات جرم اورانیوم و پلوتونیوم برحسب فرسایش سوخت برای سوخت اکسید توریم-پلوتونیوم.

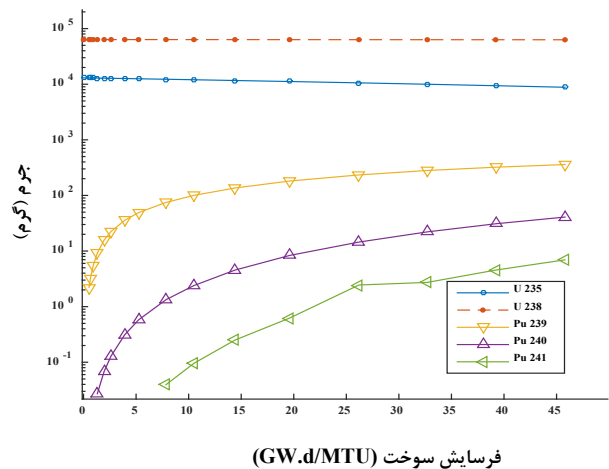


شکل ۱۰. تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های پلوتونیوم با فرسایش سوخت برای سوخت اکسید اورانیوم.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های پلوتونیوم با فرسایش سوخت به ترتیب برای دو نوع سوخت اکسید اورانیوم و اکسید توریم-پلوتونیوم نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱۰، چگالی اتمی پلوتونیوم در حالت کارکرد با سوخت اکسید اورانیوم با افزایش فرسایش سوخت روند صعودی دارد. روند صعودی غلظت پلوتونیوم به دلیل وجود اورانیوم ۲۳۸ با سطح مقطع جذب خنثی بالا در بارگذاری اولیه است. در شکل ۱۱ که برای حالت کارکرد با سوخت ترکیبی است، تغییرات پلوتونیوم ۲۳۹ به صورت نزولی است. این روند نزولی به دلیل مصرف پلوتونیوم ۲۳۹ از طریق شکافت می‌باشد. هم‌چنین تغییرات پلوتونیوم ۲۴۰ افزایشی است که دلیل آن عدم شکافت پلوتونیوم ۲۴۰ و تولید از راه جذب خنثی پلوتونیوم ۲۳۹ است. لازم به توضیح است که پلوتونیوم ۲۴۱ از جذب خنثی پلوتونیوم ۲۴۰ تولید می‌شود اما در طول سیکل به دلیل سطح مقطع شکافت بالا مصرف می‌شود.

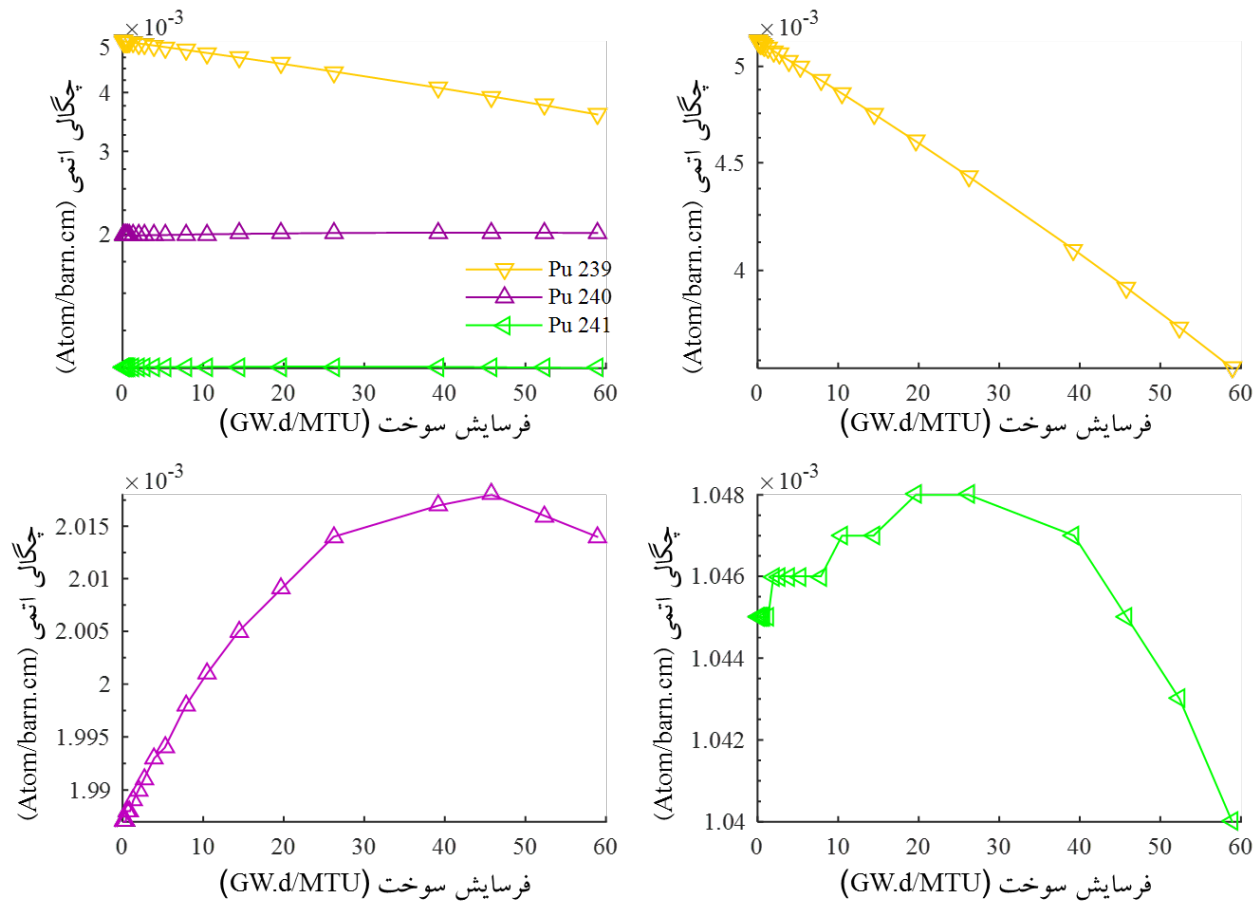


شکل ۶. تغییرات ضریب تکثیر برحسب فرسایش سوخت برای سوخت اکسید اورانیوم.



شکل ۷. تغییرات جرم اورانیوم و پلوتونیوم برحسب فرسایش سوخت برای سوخت اکسید اورانیوم.





شکل ۱۱. تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های پلوتونیوم با فرسایش سوخت برای سوخت ترکیبی اکسید توریوم-پلوتونیوم.

۵. نتیجه‌گیری

یکی از انواع رآکتورهای نسل چهارم، رآکتورهای گرافیت-گازی با دمای بالا هستند که به دلیل عمر طولانی، ایمنی بالا و فرسایش سوخت بهینه مورد توجه قرار گرفته‌اند. به همین منظور در این پژوهش بر این نوع رآکتور تمرکز شد و فرسایش سوخت برای دو نوع اکسید سوخت اورانیوم و اکسید توریوم-پلوتونیوم بررسی شد.

رآکتور گرافیت-گازی HTR-10 با در نظر گرفتن ناهمگونی دوگانه و با استفاده از کد MCNPx شبیه‌سازی شد. به منظور راستی‌آزمایی رآکتور شبیه‌سازی‌شده، ارتفاع بحرانی و ارزش انتگرالی میله کنترل محاسبه و با مراجع مقایسه شد. مطابق جدول‌های ۲ و ۳، به ترتیب ارتفاع بحرانی برابر ۱۲۵ سانتی‌متر و ارزش انتگرالی میله کنترل برابر ۱/۴۱۶ درصد به دست آمد.

پس از راستی‌آزمایی قلب شبیه‌سازی‌شده، محاسبات فرسایش سوخت برای دو نوع سوخت اکسید اورانیوم و اکسید توریوم-پلوتونیوم انجام شد و مشاهده شد که طول سیکل برای سوخت اکسید توریوم-پلوتونیوم، حدود ۲۸ درصد افزایش یافته است. همچنین مشاهده شد که با استفاده از سوخت اکسید

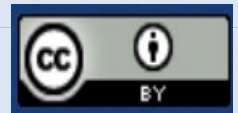
اورانیوم، چگالی اتمی ایزوتوپ‌های پلوتونیوم روند صعودی دارند که نشان‌دهنده تولید پلوتونیوم در استفاده از این نوع سوخت است ولی با استفاده از سوخت ترکیبی توریوم-پلوتونیوم، چگالی اتمی ایزوتوپ‌های پلوتونیوم روند نزولی دارند. در نتیجه هنگام استفاده از سوخت ترکیبی، پلوتونیوم به صورت صلح‌آمیز مصرف می‌شود ولی در سوخت اکسید اورانیوم، پلوتونیوم تولید می‌شود. پس استفاده از سوخت ترکیبی علاوه بر مزایای اقتصادی، از نظر پادمان هسته‌ای نیز بهتر است.



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. Abedi A, Vosoughi N. Neutronic simulation of a pebble bed reactor considering its double heterogeneous nature. Department of Energy Engineering. [Sharif University of Technology](#). Tehran. Iran. 2012.
3. Bakhshayesh K.M, Vosoughi N. A simulation of a pebble bed reactor core by the MCNP-4C computer code. [Nuclear Technology and Radiation Protection](#). 2009;24(3):177-182.
4. Liu S, Li Z. 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.
5. Seker V. HTR-10 full core first criticality analysis with MCNP. [Department of Nuclear Engineering Hacettepe University](#). Ankara, Turkey. 2003.
6. Alzamly M.A, Aziz M, Badawi A.A, Gabal H.A, Gadallah A.R.A. Burnup analysis for HTR-10 reactor core loaded with uranium and thorium oxide. [Nuclear Engineering and Technology](#). 2019.
7. Wu S.C, Sheu R.J, Peir J.J, Liang J.H. Burnup computation for HTR-10 using layer-to-layer movement. In 2013 21st International Conference on Nuclear Engineering. [American Society of Mechanical Engineers Digital Collection](#). 2013.

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

کللی، علی، نقوی دیزجی، داود، رمضانی، ایمان، وثوقی، ناصر. (۱۴۰۳)، محاسبات فرسایش سوخت برای رآکتور گرافیت-گازی HTR-۱۰ با سوخت اکسید اورانیوم و سوخت ترکیبی اکسید توریوم-پلوتونیوم. *مجله علوم و فنون هسته‌ای*، ۱۰۸(۲)، ۳۱-۳۷. DOI: <https://doi.org/10.24200/nst.2020.504.1342>.
 Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1610.html

