مدیریت ایزوتوپی سوخت یک راکتور تحقیقاتی با استفاده از طراحی نوترونیکی

منصورزاده، فاطمه*[(۱)]– خوش‌احوال، فرخ[(۲)]

۱ - سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده چرخه سوخت
۲- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده ایمنی و راکتور

چکیده:

در این مقاله طراحی راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک از دیدگاه نوترونیکی با جایگزینی سوخت اورانیوم طبیعی با سوخت غنی شده به شکل مفهومی انجام می‌شود بگونه‌ای که میزان پلوتونیوم در انتهای سیکل کاری کاهش یابد. با توجه به توافق بین‌المللی برجام در سال ۱۳۹۵ مبنی بر بازطراحی و بازسازی راکتور تحقیقاتی آب سنگین اراک، در این تحقیق سعی شده تا بدون ایجاد تغییر چشمگیری در ساختار اصلی قلب راکتور میزان پسماند تولیدی در انتهای سیکل کاری راکتور به حداقل ممکن برسد. در این تحقیق محاسبات بحرانیت، آنالیز توان راکتور و توزیع شار و نیز فاکتور بیشینه توان موضعی به وسیله کد MCNPX2.6 محاسبه شده است. نتایج حاکی از این است که با افزایش غنای سوخت، کاهش توان راکتور و بدون هیچگونه تغییر جدی در ساختار قلب راکتور مرجع میزان پلوتونیوم تولیدی به شدت کاهش یافته و اکتیویته پسماند تولید شده در انتهای سیکل کاری به٪۱۵ مقدار اولیه خود (قلب مرجع) می‌رسد.

کلمات کلیدی: *راکتور تحقیقاتی آب سنگین، پسماند هسته‌ای، غنای اورانیوم، MCNPX2.6*

مقدمه :

یک روش جدید در حال توسعه برای مطالعه چرخه سوخت هسته‌ای، مدیریت اکتینیدهای موجود در پسماند تحت عنوان سوخت مصرف شده است که در آن طراحی راکتور به گونه‌ای انجام می‌شود تا عملکرد اکتنیدها درون قلب ارزیابی شود چرا که مدیریت پسماندهای تولید شده درون راکتور یک جنبه مهم از چرخه سوخت هسته‌ای را به خود اختصاص می‌دهد[۱]. با کاهش ایزوتوپ‌هایی که بیشترین میزان گرما را تولید می‌کنند، می‌توان ظرفیت ذخیره سازی مخازن نگهداری پسماند را با اعمال ملاحظات حرارتی افزایش داد. مدیریت پسماند رادیواکتیو و حمل و نقل مخازن نگهداری و طراحی آنها به شدت به اکتیویته رادیونوکلئید های موجود در سوخت مصرف شده بستگی دارد. مدیریت پسماندهای هسته ای در دو گروه پلوتونیوم گرید راکتور و اکتنیدهای جزئی[۱] بررسی می شود[۳]. به دلیل سمیت بالای ایزوتوپ های پلوتونیوم و تمایل مراکز هسته‌ای به کاهش مقدار این ایزوتوپ در پسماند تولیدی جهت عدم گسترش و اشاعه سلاح هسته‌ای، قوانین به گونه‌ای وضع می‌شوند که میزان این ایزوتوپ در انتهای سیکل کاری راکتور از حد مجاز فراتر

[۱] Minor Actinides

نرود. در این مقاله سعی شده تا با پیشنهاد ترکیب جدید سوخت و چیدمان مجتمع درون قلب در راکتور تحقیقاتی مرجع، میزان پلوتونیوم موجود در پسماند به حداقل ممکن برسد.

روش کار :

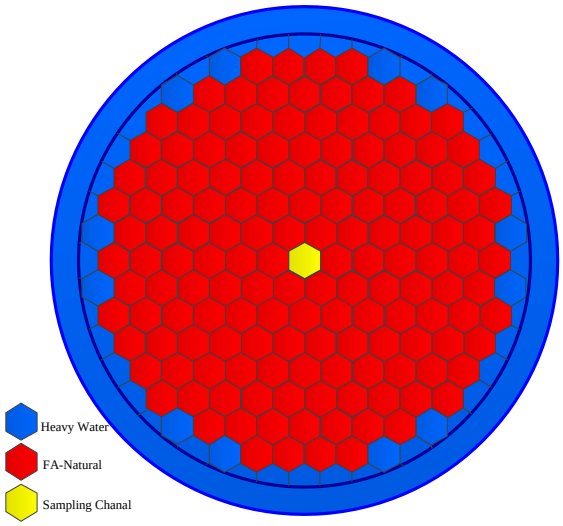
در این تحقیق یک راکتور تحقیقاتی با سوخت UO_2 با غنای طبیعی و آب سنگین به عنوان کندکننده و خنک‌کننده که برای کارکرد در قدرت حرارتی۴۰MW طراحی شده است در یک ساختار هگزاگونال مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجا که در راکتور تحقیقاتی مورد نظر با طراحی اولیه، امکان تولید پلوتونیوم در گرید سلاح سلاح هسته‌ای در حدود ۱۰kgوجود دارد[٦]، در این تحقیق سعی شده تا بدون اعمال تغییرات اضافی در ساختار قلب راکتور، تنها با تغییر میزان غنای سوخت مورد استفاده و همچنین توان راکتور، اقدام به کاهش میزان پلوتونیوم تولیدی گردد. قلب راکتور توسط کد محاسباتی MCNPX2.6 [۲] مدلسازی شده است (شکل(۱)). گام اول، اعتبار سنجی محاسبات و مقایسه نتایج بدست آمده با استفاده از کد MCNPX2.6 با مراجع موجود در ارتباط با صحت نتایج بدست آمده می‌باشد. در جدول (۱) مشخصات مربوط به مجتمع سوخت در راکتور مرجع آورده شده است. سپس با ثابت در نظر گرفتن کلیه پارمترهای قلب راکتور و با آرایش کنونی، محاسبات برن‌آپ سوخت در غناهای مختلف سوخت و آب سنگین انجام شده و میزان پلوتونیوم تولیدی در طی ۳۰۰ روز کاری محاسبه شده است.

اشاره به این نکته لازم است که بر طبق محاسبات انجام شده بحرانی نمودن راکتور با آب سبک حتی در غنای ۲۰٪ نیز غیر ممکن است. بنابراین تمرکز در انجام محاسبات بر روی شرایطی قرار گرفت که آب سنگین به عنوان کند کننده و خنک کننده مورد استفاده قرار گیرد.

جدول (۱) مشخصات مجتمع سوخت در راکتور مرجع

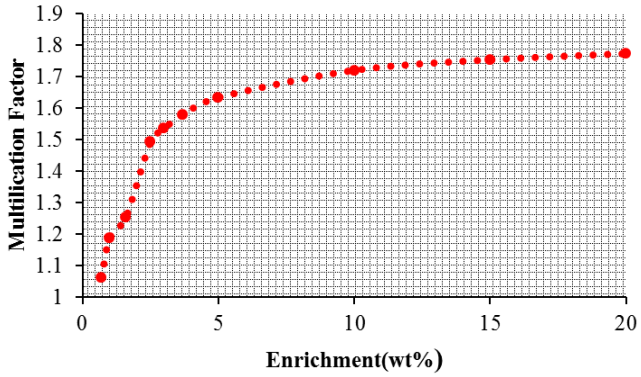
درجه خلوص آب سنگین	۹۹/۷۵
گام شبکه(cm)	۲٦/۵
تعداد مجتمع های سوخت	۱۵۰
شعاع سوخت(cm)	۰/۵۷٤
شعاع غلاف(cm)	۰/٦۸۱۵
دانسیته سوخت(g/cm^3)	۱۰/۱٤
شکل مجتمع سوخت	استوانه ای
تعداد میله های سوخت در مجتمع	۱۸
طول مؤثر میله سوخت(cm)	۳٤۳

مهمترین محدودیت موجود در تبدیل قلب راکتور پارامترهای ایمنی درون راکتور می باشد. راکتیویته تولید شده در قلب باید به گونه‌ای باشد که امکان کار مداوم راکتور با اعمال ملاحظات ایمنی برقرار باشد. در این تحقیق راکتیویته اولیه قلب (نسبت به زمانی که سوخت آن اکسید اورانیوم با غنای طبیعی است)، ثابت در نظر گرفته شده است تا بتوان از امکانات کنترل راکتیویته موجود بهره جست.

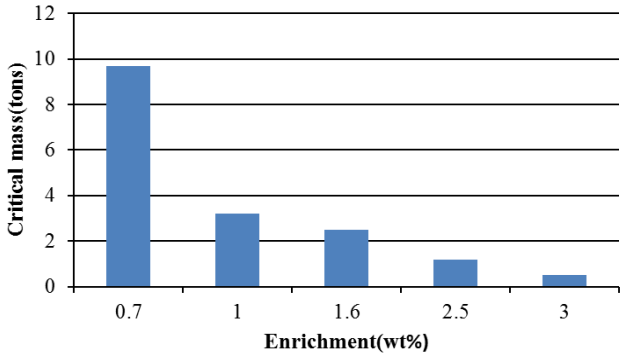


شکل(۱) نحوه چیدمان مجتمع‌های سوخت درون قلب مرجع

در این بخش تعداد مجتمع‌های سوخت، ثابت و بدون تغییر باقی مانده است(۱۵۰ عدد) و تنها غنای سوخت تا میزان ٪۲۰ افزایش یافته است. در این حالت مطابق شکل (۲) مقدار k_{eff} از 1.06099 ± 0.00016 برای سوخت طبیعی تا میزان 1.77362 ± 0.00022 برای سوخت با غنای ٪۲۰ افزایش می‌یابد. بنابراین به منظور استفاده از سوخت غنی شده در طراحی جدید قلب، بدون ایجاد تغییر در ساختار آن لازم است تا میزان سوخت غنی شده مورد نیاز برای بحرانی شدن قلب مورد محاسبه قرار گیرد. محاسبات انجام شده بیانگر این موضوع می‌باشند که در غناهای بیشتر از ٪۱/۰ مقدار جرم بحرانی به شدت کاهش می‌یابد. همانطور که ملاحظه می‌شود میزان جرم بحرانی از ۹/۷ تن(۱۵۰ مجتمع) سوخت طبیعی به شدت به ۲۶۰kg سوخت با غنای ٪۳ تنزل می‌یابد (شکل (۳)).



شکل (۲) تغییرات میزان ضریب تکثیر مؤثر با افزایش غنا



شکل(۳) مقدار جرم بحرانی بر حسب غنا

بنابراین از آنجا که با ثابت نگه داشتن ساختار قلب میزان جرم بحرانی برای غناهای بیشتر از ۱٪ به شدت افت می‌کند می‌توان علاوه بر پیشنهاد سوخت با غنای ۱٪ ، از سوخت با غنای بیشتر استفاده نمود به گونه‌ای که با استفاده از مواد جاذب بتوان راکتیویته اضافی را جبران نمود. در این تحقیق به منظور کاهش میزان پلوتونیوم تولیدی دو استراتژی مورد بررسی قرار گرفته است. ۱- بررسی تغییرات توان راکتور و ۲- بررسی تغییرات غنای سوخت. در ادامه به دو چیدمان جدید قلب، به منظور کاهش میزان پلوتونیوم تولیدی و اکتیویته موجود در پسماند اشاره می‌شود.

نتایج :

با حفظ ساختار قلب و افزایش غنای سوخت در توان ثابت ٤٠MW، میزان پلوتونیوم تولیدی از ۸/۰۳kg برای اورانیوم طبیعی به ۳/۱۵kg برای اورانیوم با غنای ۲/۵٪ می‌رسد(جدول (۲)). زیرا در اثر افزایش غنا، میزان U-238 کاهش یافته و در نتیجه میزان جذب نوترون در این ایزوتوپ کاهش می‌یابد، بنابراین میزان Pu-239 تولیدی کمتر می‌شود. در شرایطی که غنای سوخت ثابت بماند و تنها میزان توان راکتور تغییر کند نتایج حاکی از این است که مقدار پلوتونیوم تولیدی ارتباط مستقیمی با مقدار توان راکتور دارد. بنابراین با

کاهش توان از ۴۰MW تا ۱۰MW میزان پلوتونیوم تولیدی برای غنای ثابت ٪۱، از ۶/۱kg به ۱/۷۴kg می رسد(جدول (۳)). بنابراین می‌توان با افزایش غنا و کاهش توان چیدمان‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد.

جدول (۲) تغییرات میزان پلوتونیوم بر حسب غنا در توان ثابت ۴۰MW

غنا (wt%)	۰/۷۱۱٪	۱/۰٪	۱/۶٪	۲/۵٪
(kg)Pu-239	۸/۰۳	۶/۳۱	۵/۵۹	۳/۱۵

جدول (۳) تغییرات میزان پلوتونیوم بر حسب توان راکتور در غنای ثابت ۱/۰٪

توان (MW)	۱۰	۱۵	۲۰	۴۰
(kg)Pu-239	۱/۷۴	۲/۳۳	۳/۳۷	۶/۳۱

پس از بررسی دقیق استراتژی‌های مذکور و با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود به منظور ایجاد کمترین تغییر در ساختار قلب راکتور دو چیدمان ۱) حاوی مجتمع سوخت بدون جاذب، ۲) حاوی مجتمع سوخت با جاذب پیشنهاد شده است. جدول (۴) به پارامترهای تغییر یافته در چیدمان‌های پیشنهادی در مقایسه با چیدمان قلب مرجع اشاره می‌کند. توجه به این نکته لازم است که تعداد مجتمع‌های سوخت در چیدمان ارائه شده به گونه‌ای انتخاب شده است که میزان راکتیویته قلب در ابتدای سیکل تقریبا نزدیک به راکتیویته قلب مرجع باشد. بنابراین مقدار k_{eff} که در قلب مرجع برابر ۱/۰۶۰۹۹ می‌باشد، برای قلب (الف) و قلب (ب) به ترتیب برابر ۱/۰۶۹۹۶ و ۱/۰۸۱۴۲محاسبه شده است. توجه به این نکته لازم است که در این مقاله در هیچ یک از موارد بررسی شده درجه خلوص آب سنگین کاهش نیافته است.

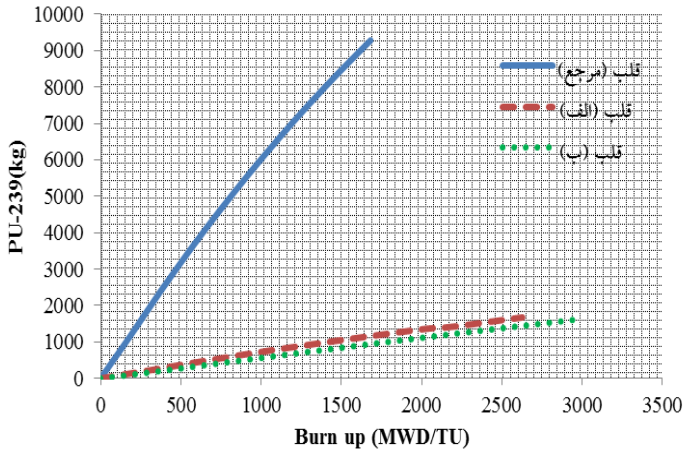
شکل (۴) میزان تغییرات ایزوتوپ‌های مختلف پلوتونیوم تولیدی در طول ۳۰۰ روز را بر حسب میزان برن آپ برای دو راکتور پیشنهادی در مقایسه با راکتور مرجع نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در قلب (الف) و (ب) میزان پلوتونیوم تولیدی به ترتیب تا ۱/۴۲kg و ۱/۳۸kg کاهش می‌یابد در حالی که میزان شار نوترون حرارتی در سطح قابل قبولی است و همچنین میزان مصرف سوخت از ۱۴۹۵MWD/TU در ۳۰۰ روز قلب مرجع به ترتیب به ۲۱۹۰MWD/TU برای قلب (الف) و ۲۵۰۳MWD/TU برای قلب (ب) می-رسد.

جدول(۴) مقایسه الگوهای پیشنهادی با قلب مرجع

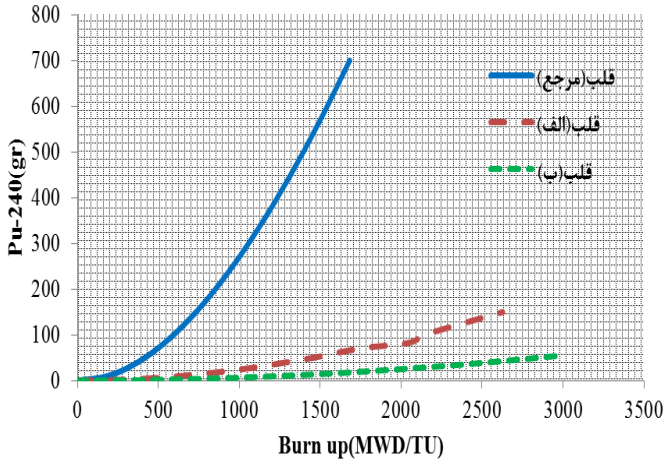
قلب	تعداد مجتمع	توان راکتور (MW)	تعداد میله در مجتمع	غنای سوخت	جاذب	خلوص آب سنگین
(الف)	۳۶	۱۰	۱۲	۱٪	–	۹۹/۷۵٪
(ب)	۵۴	۲۰	۱۴	۳/۶۷٪	Al+CrB2 0.020g/cm3B	۹۹/۷۵٪
مرجع	۱۵۰	۴۰	۱۸	۰/۷٪	–	۹۹/۷۵٪

میزان اکتیویته موجود در پسماند در انتهای سیکل کاری راکتور های (الف)، (ب) و مرجع به منظور مقایسه محاسبه شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، علاوه بر کاهش میزان Pu-239 از ۹/۲۸kg در قلب مرجع به ۱/٦۷kg در قلب(الف) و ۱/٦٤kg در قلب(ب)، در طول یکسال، مقدار اکتیویته موجود در پسماند نیز از ۵/۲۱ ×۱۰^{۷} Ci در قلب مرجع به ۱/۰۲ ×۱۰^{۷} Ci در قلب (الف) و ۸/۱۸ ×۱۰^{٦} Ci در قلب (ب) رسیده است.

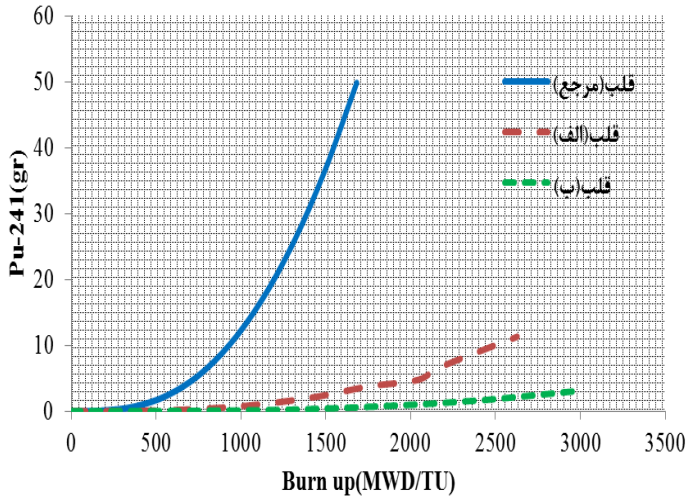
شکل‌های (۵) نیز توزیع شار نوترون حرارتی درون قلب را برای چیدمان‌های پیشنهادی نشان می‌دهند. بیشترین مقدار شار حرارتی در قلب (الف) برابر (n/cm^2.s) ۹/۷۷ ×۱۰^{۱۳} و در قلب (ب) برابر با (n/cm2.s) ۸/۵ ×۱۰^{۱۳} می‌باشد که در مرکز قلب راکتور و در جایگاه نمونه‌گیری ایجاد می‌شود. ماکزیمم ضرایب بیشینه توان برای قلب‌های (الف) و (ب) نیز به ترتیب برابر ۱/٤٦ و ۱/۷۰ می‌باشند که در مجتمع‌های سوخت نزدیک به کانال نمونه گیری ایجاد می‌شوند.



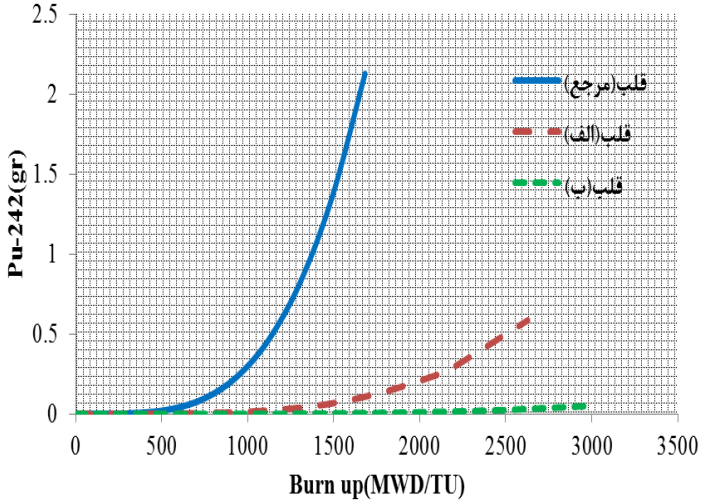
(الف)



(ب)

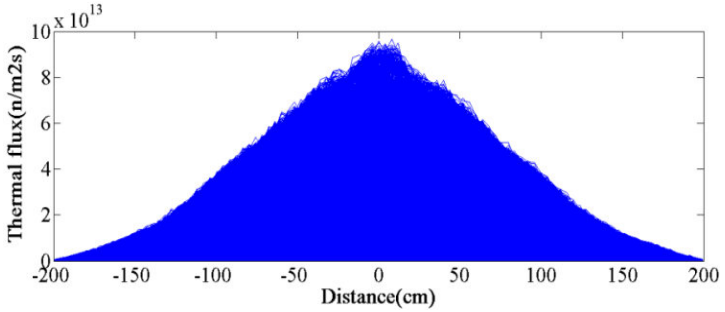


(ج)

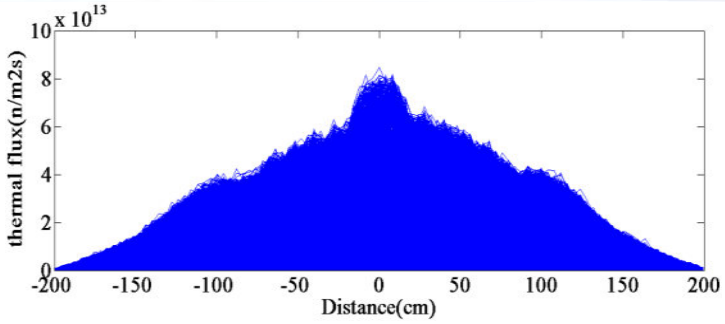


(د)

شکل(٤) الف)مقایسه میزان Pu-239 ، ب) Pu-240 ، ج) Pu-241 ، د) Pu-241 بر حسب برن آپ در ۳٦۰ روز راکتور در قلب پیشنهادی (الف)، (ب) و قلب مرجع



(الف)



(ب)

شکل (۵) الف) توزیع شار حرارتی برای قلب (الف)، ب) توزیع شار حرارتی برای قلب (ب)

بحث ونتیجه گیری :

در این مقاله هدف کاهش مقدار پلوتونیوم و اکتیویته موجود در پسماند راکتور تحقیقانی آب سنگین نمونه در حد مجاز راکتورهای هسته‌ای می‌باشد. به منظور نیل به این هدف دو قلب پیشنهاد شده‌اند که علاوه بر افزایش میزان بر آپ سوخت و قرار دادن شار نوترون حرارتی در محدوده قابل قبول، میزان پلوتونیوم تا حد زیادی کاهش یافته است. در این تحقیق بدون ایجاد هیچگونه تغییری جدی در ساختار قلب راکتور مرجع و تنها با افزایش غنا و کاهش توان آن، میزان پلوتونیوم تولیدی در پسماند به ٪۱۵ مقدار آن در طراحی اولیه رسید. همچنین میزان اکتیویته پسماند به ترتیب در قلب‌های (الف) و (ب) به ٪۲۰ و ٪۱۶ مقدار طراحی اولیه آن‌ها کاهش می‌یابد. جدول (۹) به پارامترهای تغییر یافته در چیدمان‌های پیشنهادی در مقایسه با چیدمان قلب مرجع و همچنین میزان پلوتونیوم تولیدی در انتهای سیکل، برن آپ سوخت و شار نوترون حرارتی اشاره می‌کند. مشاهده می‌شود که میزان پلوتونیوم به حداقل مقدار ممکن خود می رسد و در عین اینکه شار حرارتی مورد نیاز راکتور در حدی بهتر و یا مساوی راکتور مرجع تامین می‌شود میزان پسماندهای موجود در قلب راکتور نیز تا حد زیادی کاهش یافته و این امر نگهداری پسماند حاصل از فعالیت راکتور را آسان تر می‌کند. از طرفی دیگر علاوه بر اینکه مقدار برن آپ سوخت در قلب (الف) ٪۴۶ و در قلب (ب)٪۶۷ افزایش می‌یابد، مقدار مصرف U-235 نیز در قلب مرجع ، (الف) و (ب) به ترتیب ٪۲۴، ٪۲۷ و ٪۸۶ می‌باشد.

جدول(۵) مقایسه نتایج محاسبات مربوط به دو قلب پیشنهادی و قلب مرجع

قلب	پلوتونیوم ۲۳۹ (kg)	مصرف سوخت (MWD/TU)	ماکزیمم شارحرارتی ($n/cm^2.s$)	ماکزیمم شار سریع ($n/cm^2.s$)	ضریب تکثیر مؤثر	اکتویته پسماند (Ci)
(الف)	۱/۴۲	۲۱۹۰	۱۰^۱۳× ۹/۷	۱۰^۱۳× ۴/۳	۱/۰۶۹۹۶	۱۰^۷× ۱/۰۲
(ب)	۱/۳۸	۲۵۰۳	۱۰^۱۳× ۸/۵	۱۰^۱۳× ۵/۹۷	۱/۰۸۱۴۲	۱۰^۶× ۸/۱۸
مرجع	۸/۰۳	۱۴۹۵	۱۰^۱۳× ۸/۷	–	۱/۰۶۰۹۹	۱۰^۷× ۵/۲۱

مراجع :

1. Mark Massie, "A Generalized Optimization Methodology for Isotope Management", Master of Science, MIT, 2010.
2. Pelowitz, D.B., "MCNPXTM user's manual"; Los Alamos National Laboratory, (2008) .
3. Serfontein. D.E and et al, " optimization of deep burn incineration of reactor waste plutonium in a PBMR DPP-400 core, Nuclear Engineering and Design, 271 (2014) 99–105.
4. Acır. A, Cos kun. H, "Monte Carlo calculations on transmutation of plutonium and minor actinides of pebble bed high temperature reactor", Progress in Nuclear Energy, 48, (2013), 45–50.
5. Faghihi. F, "Level-1 Probability Safety Assessment of the Iranian Heavy Water Reactor Using SAPHIRE Software", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, No. 10, 1377-1409, (2008).
6. Willing, T., & et al. (2012). Converting the iranian heavy water reactor IR-40 to a more proliferation -resistant reactor. *Science and Global Security, 20,* 97-116.