

امکان سنجی استفاده از میله‌های اکسید توریوم در راکتور بوشهر

جزء وزیری، عطیه*^(۱) - میروکیلی، سید محمد^(۲) - غلامزاده، زهره^(۳) علیزاده کاوافشاری، معصومه^(۴)

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

در این پروژه امکان‌سنجی استفاده از توریوم به منظور تولید اورانیوم ۲۳۳ در راکتور بوشهر مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا ۴۸ میله اکسید توریوم در مجتمع مرکزی با کد MCNPX2.6 مدل شد و پس از آن ۷ مجتمع مرکزی به همین شکل در نظر گرفته شد. طبق نتایج بدست آمده با استفاده از میله‌های توریومی در قلب β و β_{eff} تغییر چندانی نمی‌کند ولی فاکتور پیک توان شعاعی کاهش می‌یابد. در طرح دوم از ۴۲۸ kg توریوم بارگذاری شده در حدود ۶ kg در طول یک سال مصرف شده که موجب تولید $3/5 \text{ kg } ^{233}\text{U}$ و $624 \text{ g } ^{233}\text{Pa}$ می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن ۶ ماه زمان خنک‌سازی و تبدیل ^{233}Pa به ^{233}U در حدود $4/173 \text{ kg } ^{233}\text{U}$ پس از ۱۸ ماه خواهیم داشت.

کلمات کلیدی: تولید ^{233}U ، کد MCNPX2.6، راکتور بوشهر، اکسید توریوم

مقدمه :

با توجه به محدودیت در منابع اورانیوم و همچنین خطر پلوتونیوم تولیدی در این سوخت‌ها، نیاز به جایگزینی برای این سوخت در راکتورهای مختلف احساس می‌شود. یکی از گزینه‌های مناسب استفاده از عنصر توریوم می‌باشد که نسبت به اورانیوم فراوانی بیشتری در طبیعت دارد. شاهین و همکارانش به منظور تخت کردن توان مجتمع‌های سوخت در راکتور CANDU با استفاده از کد SCALE از ترکیب سوخت ThO_2 استفاده کردند، که موجب کاهش پیک توان شعاعی در قلب شد [۱]. در سال ۲۰۱۵ تحقیقاتی در زمینه بهره‌برداری از توریوم و تبدیل پسمان ^1TRU توسط کیتادا و همکارش انجام شد. در این پژوهش از seed-blanket توریومی و سوخت بازفراوری شده در راکتور ^2ADS استفاده شد. نتایج نشان داد که توریوم باعث تخت شدن توان می‌شود، همچنین ۲۰٪ از میزان سمیت عناصر ^1TRU در طول سیکل کاهش یافته است [۲،۳]. امکان‌سنجی استفاده از سوخت ^{233}U - ^{232}Th در راکتور اراک در تحقیقات قبلی مورد بررسی قرار گرفت، که در نتیجه آن میزان پلوتونیوم تولیدی پس از یکسال به شدت کاهش یافت [۴]. همان‌طور که می‌دانید به منظور تولید ^{233}U نیاز به قراردادن میله‌های توریومی درون راکتورهای قدرت می‌باشد. به

¹ Transuranium elements

² Accelerator driven system

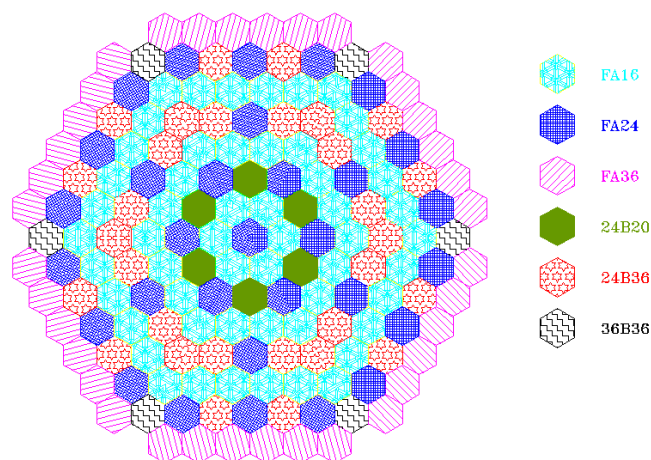
همین منظور امکان‌سنجی استفاده از میله‌های اکسید توریوم در راکتور بوشهر و بررسی میزان ^{233}U تولیدی در آن هدف این پژوهش قرار گرفته است.

روش کار :

در ابتدا قلب نیروگاه بوشهر توسط کد MCNPX2.6 شبیه‌سازی شد. مشخصات کلی قلب در جدول ۱ ارائه شده است. سوخت راکتور بوشهر UO_2 و غلاف آن آلیاژی از زیرکونیوم می‌باشد. تعداد میله‌های سوخت در هر مجتمع ۳۱۱ عدد بوده و در حدود ۴۹۰ کیلوگرم سوخت در هر مجتمع بارگذاری می‌شود. نمای کلی از قلب اولیه راکتور بوشهر در شکل ۱ نشان داده شده است.

جدول شماره ۱- اطلاعات کلی قلب راکتور بوشهر

3000 MW	توان حرارتی اسمی
163	تعداد مجتمع‌های سوخت موجود در قلب
23.6 cm	گام شبکه مجتمع‌ها
353 cm Cold state	ارتفاع قلب در حالت کاری راکتور
355 cm Hot state	
316 cm	قطر معادل قلب
42.6 kW/kgU	دانسبته توان متوسط سوخت
84000 m ³ /h	دبی خنک‌کننده
291 °C	دمای ورودی خنک‌کننده
321 °C	دمای خروجی خنک‌کننده



شکل ۱- نمای کلی از چیدمان قلب اولیه راکتور بوشهر

قلب راکتور در دو حالت HZP و CZP مدل شده است که راکتیویته اضافه قلب در این دو حالت در جدول ۲ بیان شده است.

جدول شماره ۲- راکتیویته اضافه قلب در دو حالت CZP و HZP

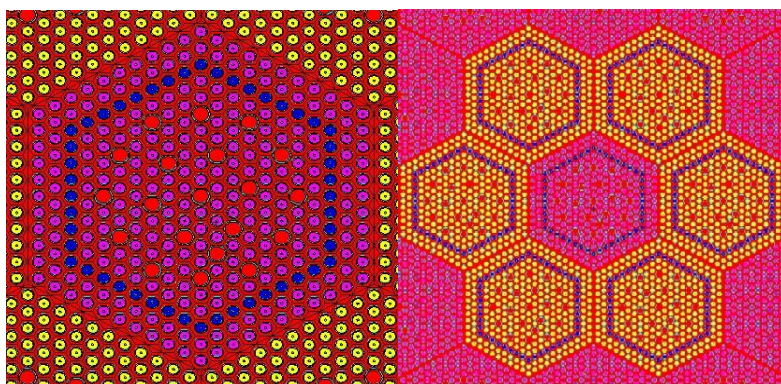
parameter	CZP	CZP in FSAR	HZP
K_{eff}	1.24448	1.225	1.17157
Excess reactivity	19645±10pcm	18367 pcm	14644±10pcm

پس از شبیه‌سازی قلب در حالت اولیه، تعدادی از میله‌های سوخت برخی از مجتمع‌ها را با میله‌های اکسید توریم جایگزین کردیم. اطلاعات مربوط به این میله‌های در جدول ۳ بیان شده است.

جدول شماره ۳- اطلاعات مربوط به میله‌های توریمی

48	تعداد میله‌های توریمی در مجتمع‌های توریمی	
9.5g/cm ³	دانسیته اکسید توریم	
طرح ۲	طرح ۱	جرم کل اکسید توریم
487.2Kg	69.6Kg	
427Kg	61Kg	جرم کل توریم
7	1	تعداد مجتمع‌های دارای میله‌های توریمی

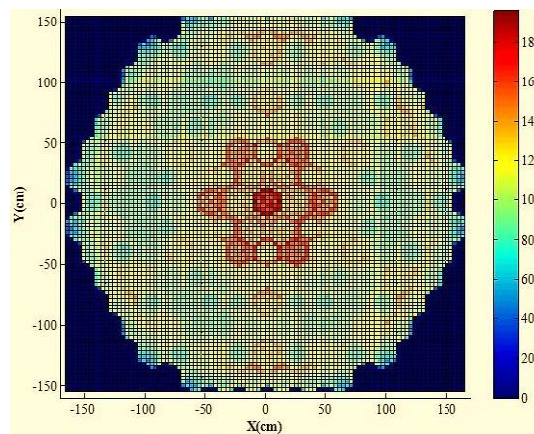
در ابتدا ۴۸ میله توریمی در مجتمع مرکزی چیده شد که در شکل ۲ (سمت چپ) قابل مشاهده می‌باشد. پس از آن در طرح دوم ۷ مجتمع مرکزی قلب را با مجتمع‌های شبیه طرح اول بارگذاری کردیم که در شکل ۲ (سمت راست) قابل مشاهده می‌باشد.



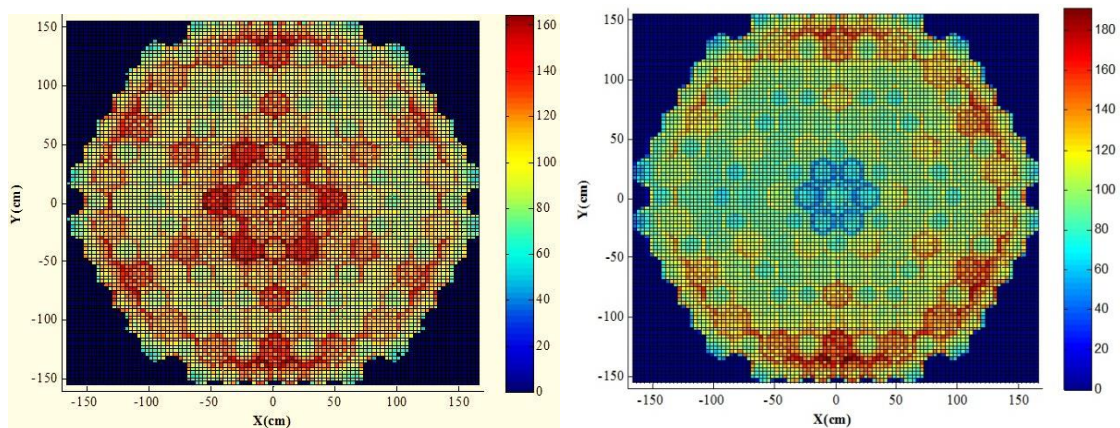
شکل ۲- نمای کلی از مجتمع میله‌های توریمی سمت چپ طرح ۱ سمت راست طرح ۲ در قلب راکتور بوشهر

نتایج :

در شکل‌های زیر توزیع توان در قلب اولیه راکتور بوشهر و ۲ قلب دارای میله‌های توریومی در صفحه XY رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید با استفاده از میله‌های اکسید توریوم در مرکز قلب پیک توان افت شدیدی می‌کند.



شکل ۳- توزیع توان در قلب اولیه راکتور بوشهر بر حسب وات



شکل ۴- توزیع توان در قلب سمت چپ طرح ۱ سمت راست طرح ۲ در قلب راکتور بوشهر

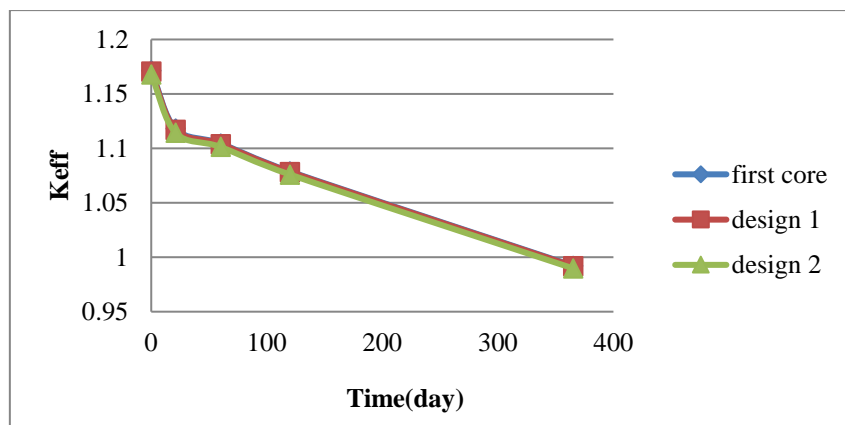
با استفاده از کد MCNPX2.6 برخی از پارامترهای نوترونیکی و ایمنی این ۳ قلب محاسبه شده که در جدول زیر ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید کسر نوترون‌های تأخیری و کسر نوترون‌های تأخیری مؤثر در شکافت در اکثر موارد نسبت به قلب اولیه افزایش یافته است، ولی افزایش در حد خطای محاسباتی

می‌باشد. همچنین فاکتور پیک توان شعاعی کاهش چشمگیری داشته در نتیجه با بارگذاری میله‌های توریومی در راکتور بوشهر پارامترهای ایمنی راکتور بهبود پیدا می‌کنند.

جدول شماره ۴- مقایسه پارامترهای نوترونیک و ایمنی راکتور بوشهر در ۳ حالت مدل شده با قلب اولیه

Parameters	SAR	First core	Design 1	Design 2
Multiplication factor(K_{eff})	-	1.1715	1.1705	1.1679
Excess reactivity(pcm)	-	14644	14568	14376
Delay neutron fraction(pcm)	-	694	704	699
Effective delay neutron fraction(pcm)	740	691	671	715
Axial PPF	-	1.53	1.55	1.59
Radial PPF	1.6	1.59	1.34	1.42
Total PPF	2.23	2.49	2.08	2.26
Radial PPF in central SFA	-	1.12	1.29	-
Total neutron flux in core($\#/cm^2.s$)		3.58441×10^{14}	3.58507×10^{14}	3.58555×10^{14}

در نمودار K_{eff} ۵ بر حسب روزهای مختلف کارکرد راکتور برای ۳ قلب مختلف رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌کنید با استفاده از مجتمع‌های توریومی تغییر معنی‌داری در راکتیویته قلب رخ نداده است. فقط در حدود 200pcm افت راکتیویته در تمام بازه‌های زمانی دیده می‌شود.



شکل ۵- تغییر ضریب تکثیر مؤثر سیستم نسبت به زمان مصرف سوخت

جدول ۵ نتیجه مصرف سوخت یکساله در راکتور بوشهر برای طرح‌های مختلف می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید. در طرح ۱ میزان مصرف توریوم در حدود ۱ کیلوگرم بوده که موجب تولید ۵۶۳ گرم ^{233}U و ۱۰۴ گرم ^{233}Pa در مدت یکسال می‌شود. با توجه به نیمه عمر ^{233}Pa (۲۷ روز) و زنجیره واپاشی

در صورت گذشت ۶ ماه زمان خنک‌سازی برای سوخت مصرفی در حدود ${}_{91}^{233}\text{Pa} \xrightarrow{26.697 d, \beta^-} {}_{92}^{233}\text{U}$ ۶۶۸ گرم ${}_{92}^{233}\text{U}$ بدست می‌آید.

در طرح دوم از ۴۲۸ کیلوگرم تورنیوم بارگذاری شده در قلب در حدود ۶ کیلوگرم در طول یک سال مصرف شده است که موجب تولید ۳/۵ کیلوگرم ${}_{92}^{233}\text{U}$ و ۶۲۴ گرم ${}_{91}^{233}\text{Pa}$ پس از یکسال می‌شود. همچنین با در نظر گرفتن ۶ ماه زمان خنک‌سازی و تبدیل ${}_{91}^{233}\text{Pa}$ به ${}_{92}^{233}\text{U}$ در حدود ۴/۱۷۳ کیلوگرم ${}_{92}^{233}\text{U}$ پس از ۱۸ ماه خواهیم داشت.

جدول شماره ۵- ایزوتوپ‌های تولیدی ناشی از مصرف سوخت یک ساله در راکتور بوشهر برای طرح‌های مختلف با توان 3000MW

Isotope	Mass(g)	
	Design 1	Design 2
${}^{231}\text{Th}$	0.02	0.08
${}^{232}\text{Th}$	60120.00	422000.00
${}^{233}\text{Th}$	0.06	0.37
${}^{232}\text{Pa}$	0.01	0.05
${}^{233}\text{Pa}$	104.50	624.70
${}^{233}\text{U}$	563.60	3549.00
${}^{234}\text{U}$	70.45	364.30
${}^{235}\text{U}$	8.20	36.35
${}^{236}\text{U}$	0.43	1.66

بحث و نتیجه گیری :

با استفاده از میله‌های تورنیومی در چند مجتمع مرکزی راکتور بوشهر می‌توان پیک توان را کاهش داد، در حالی که دیگر پارامترهای ایمنی تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین با توجه به نتایج بدست آمده، در صورت بارگذاری تورنیوم در ۷ مجتمع سوخت (طرح دوم) پس از یکسال مصرف سوخت و ۶ ماه زمان خنک‌سازی سوخت در حدود ۴/۱۷۳ kg ${}_{92}^{233}\text{U}$ تولید خواهد شد.

مراجع :

- [1] S. Sahin, K. Yıldız, A. Acır, Power flattening in the fuel bundle of a CANDU reactor. Nucl Eng Des 232, 7–18 (2004). doi:10.1016/j.nucengdes.2004.04.004
- [2] T.M. Vu, T. Kitada, Seed and blanket thorium-reprocessed fuel ADS: multi-cycle approach for higher thorium utilization and TRU transmutation. Ann Nucl Energy 75, 438–442 (2015). doi:10.1016/j.anucene.2014.08.025
- [3] T.M. Vu, T. Kitada, Seed and blanket ADS using thorium-reprocessed fuel: parametric survey on TRU transmutation performance and safety characteristics. Ann Nucl Energy 78, 176–179 (2015). doi:10.1016/j.anucene.2014.12.018

- [4] Seyed Mohammad Mirvakili, Masoomeh Alizadeh Kavafshary, Atiyeh Joze Vaziri, Comparison of neutronic behavior of UO_2 , $(Th-233U)O_2$ and $(Th-235U)O_2$ fuels in a typical heavy water reactor. Nuclear Engineering and Technology 47,315–322, 2015. doi.org/10.1016/j.net.2014.12.014