



محاسبات عمق مصرف سوخت راکتور VVER1000 با مجتمع های سوخت نسل TVSA جهت استفاده در راکتورهای نسل آتی نیروگاه هسته ای بوشهر

مقدسیان، نجمه^(۱) - قیصری، روح اله*^(۱و۲) - اسلامی زاده، محمدهادی^(۱)

^۱ دانشگاه خلیج فارس، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

^۲ دانشگاه خلیج فارس، مرکز پژوهشی انرژی هسته ای

چکیده:

در این مقاله، محاسبات عمق مصرف سوخت نسل مجتمع‌های سوخت TVSA در راکتور VVER1000 در دو دوره کاری به کمک کد محاسباتی MCNPX مورد بررسی قرار گرفته است. دمای مواد قلب در کد NJOY اعمال و سطح مقطع‌های مربوطه محاسبه گردیده‌اند. در طراحی مجتمع‌های TVSA از میله های جاذب $Gd_2O_3 + UO_2$ با سه ترکیب متفاوت از اکسید اورانیوم استفاده شده و همچنین طول چرخه فعالیت سوخت‌گذاری راکتور از ۱۲ ماه به ۱۸ ماه افزایش پیدا کرده است. در نتیجه این تغییرات، عمق مصرف سوخت به طور قابل توجهی افزایش و نتایج حاصل، با نتایج راکتور بوشهر مقایسه و با نتایج آلوم نوترونیک راکتور مطابقت داده شده تا دقت محاسبات مشخص شود.

کلمات کلیدی: مجتمع سوخت، عمق مصرف سوخت، میله های جاذب، دوره کاری

مقدمه:

راکتورهای هسته ای قدرت نقش تولید انرژی را به عهده دارند. امروزه گرمای تولید شده در راکتورهای هسته ای قدرت، بیشتر به منظور تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور مدیریت سوخت و طراحی سیکل‌های کاری قلب راکتور، عمق مصرف سوخت با توجه به نوع و مقدار سوخت و مقدار انرژی تولیدی در طول سیکل کاری راکتور می‌بایست محاسبه گردد از راهکارهای اصلی برای افزایش توان و طول چرخه فعالیت راکتورها، تغییر در طراحی المان‌های سوخت است. با توجه هزینه‌های ساخت و فرآیند تعمیر و نگهداری نیروگاه اتمی بوشهر و مدت زمان طولانی مورد نیاز جهت انجام عملیات تعویض سوخت و تعمیرات اساسی در قلب راکتور، همواره تلاش می‌شود که در جهت کاهش هزینه‌ها و بهبود عملکرد راکتور گام‌هایی برداشته شود. با توجه به پیچیدگی روزافزون تجهیزات و مشکلات نصب و مونتاژ و تعمیر و نگهداری این تجهیزات عملاً کاهش مدت زمان توقف راکتور جهت تعمیرات اساسی پس از هر توقف میسر نمی‌باشد. همچنین کاهش زمان صرف شده برای عملیات تعویض سوخت با توجه الزامات ایمنی و مدیریت و کنترل راکتیویته میسر نمی‌باشد [۱]. یک راهکار نوین مطرح شده در صنعت هسته‌ای،



افزایش طول سیکل فعالیت راکتور می‌باشد. افزایش طول سیکل باعث می‌شود زمان کارکرد راکتور افزایش یافته و از طرف دیگر زمان‌های صرف شده برای عملیات تعویض سوخت کاهش یابد [۲]. در طراحی مجتمع‌های TVSA از میله‌های جاذب Gd_2O_3 با سه ترکیب متفاوت از اکسید اورانیوم استفاده شده ماده جاذب اکسید گادولینیم Gd_2O_3 به صورت مخلوط یا میکس با UO_2 در میله‌های سوخت انتخابی بکار برده شد. میله‌های جاذب گادولونیوم اکسید امکان افزایش مصرف و طول سیکل و شاخص‌های اقتصادی را در پی دارد [۳و۴]. کد MCNP یک کد محاسباتی چند منظوره و با طیف انرژی پیوسته برای طراحی مسائل گوناگون از جمله طراحی راکتور و حفاظ است. این کد، یکی از قوی‌ترین کدهای محاسباتی هسته‌ای به شمار می‌رود و بر اساس روش مونت کارلو که خود یک روش آماری است، روی معادله ترابرد و در مدهای مختلف کار می‌کند. شبیه‌سازی با استفاده از کد محاسباتی MCNPX2.6 انجام شده است. یکی از قابلیت‌های مهم نسخه X2.6، توانایی آن در محاسبه میزان مصرف سوخت به کمک کد جانبی CINDER90 است [۵].

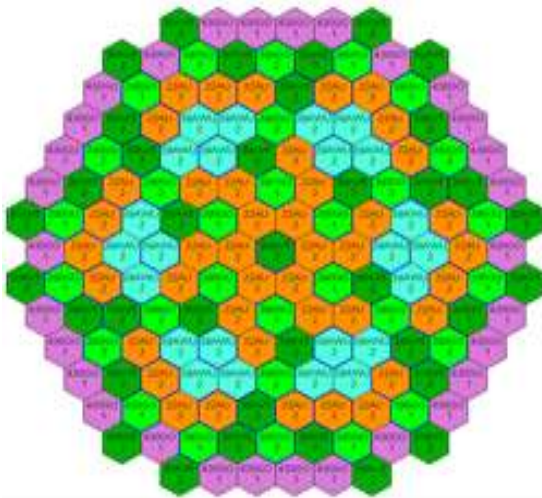
روش کار :

سند نهایی نیروگاه بوشهر با استفاده از کد مذکور صورت گرفته و سپس چیدمان جدید قلب راکتور با مجتمع سوخت جدید TVSA با توجه به اطلاعات طراحی ارائه شده توسط شرکت روس اتم انجام پذیرفته است. ماده‌ی جاذب درون میله‌های جاذب ثابت، GdO_3+UO_2 با غلظت ۱۰/۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. در جدول ۱، مشخصات مجتمع‌های سوخت در دوره اول کاری راکتور TVSA داده شده‌اند.

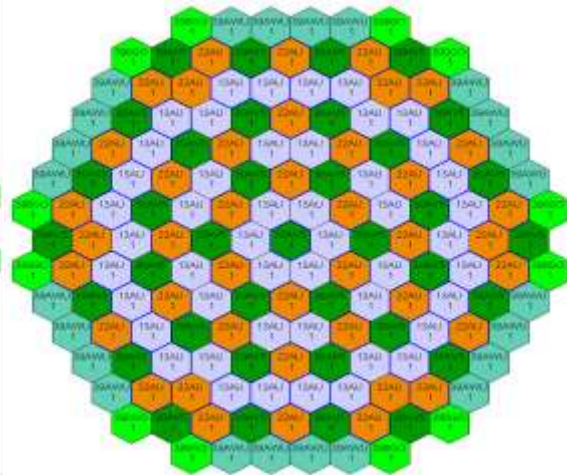
جدول ۱: مشخصات مجتمع‌های سوخت راکتور TVSA در دوره اول کاری (درصد غنا ونحوه چینش آن [۴])

نوع مجتمع	میانگین غنا (درصد)	تعداد میله‌های سوخت (درصد غنا)	سم جاذب در مجتمع سوخت	تعداد میله‌های شامل سم جاذب ($Gd_2O_3/235U$)	تعداد هر نوع مجتمع سوخت در قلب
۲۲AU	۲/۲۰	۳۱۲(۲/۲۰)	-	-	۴۲
۳۰AV۵	۲/۹۹	۳۰۳(۳/۰۰)	وجود دارد	۹(۵/۲/۴)	۳۷
۳۹AWU	۳/۹۰	۲۴۳(۴/۰۰) ۶۰(۳/۶۰)	وجود دارد	۹(۵/۳/۳)	۲۴
۳۹۰GO	۳/۹۰	۲۴۰(۴) ۶۶(۳/۶۰)	وجود دارد	۶(۵/۳/۳)	۱۲
۳۹۰GO	۳/۹۰	۲۴۰(۴) ۶۶(۳/۶۰)	وجود دارد	۶(۵/۳/۳)	۱۸
۴۳۰GO	۴/۳۰	۲۴۰(۴) ۶۶(۳/۶۰)	وجود دارد	۶(۵/۳/۶)	۳۰

در دره اول کاری راکتور نحوه چینش همانند دوره دوم کاری می باشد با این تفاوت که مجتمع سوخت ۱۳ AU در قلب به تعداد ۴۸ با میانگین غنای ۱/۳ درصد وجود دارد و مجتمع سوخت ۴۳۰ GO وجود ندارد. با بهینه‌سازی ابعاد طراحی مجتمع‌های سوخت نسل TVSA و افزایش تعداد محدود میله‌های سوخت بارگذاری شده در قلب راکتور ۱۰۰۰ VVER، افزایش ۴ درصدی توان (شار) را در قلب راکتور مقدار ۳۱۲۰ مگاوات حرارتی در نظر گرفته شده است. اکسید گادولینیم Gd_2O_3 به صورت مخلوط یا میکس با سه ترکیب متفاوت از اکسید اورانیوم به ترتیب ۲/۴٪ و ۳/۳٪ و ۳/۶٪ با نسبت ۵/۰٪ به ۹۵/۰٪ استفاده شده است. در شکل ۱، نقشه‌های چیدمان مجتمع‌های سوخت قلب در دوره اول کاری و دوره دوم کاری راکتور TVSA (با غنای متفاوت) داده شده‌اند.



(ب)



(الف)

شکل ۱: چیدمان مجتمع‌های سوخت (با غنای متفاوت) در قلب راکتور TVSA (الف) دوره اول کاری (ب) دوره دوم کاری [۴]

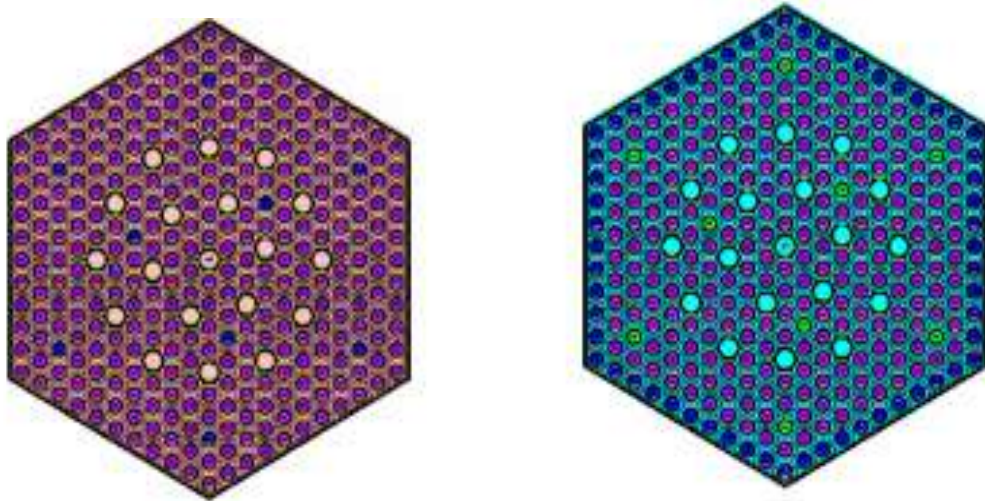
از مهم ترین پارامترهای اقتصادی یک راکتور هسته‌ای، میزان مصرف سوخت می باشد اغلب میانگین عمق مصرف (B) را به صورت مقدار انرژی که از واحد جرم هسته‌های سوخت بارگذاری شده در راکتور هسته‌ای، در عرض مدت زمان قرار داشتن آن در قلب راکتور بدست می آید، تعریف می‌کنند. اگر راکتورهای هسته‌ای با سوخت گذاری $m_{fuel}(kg)$ انرژی $Q_k(MWday) = N (MW) \times t(day)$ را تولید کرده باشد، در این صورت عمق مصرف سوخت برابر است با:

$$BURNUP = \frac{Q_k}{M_{fuel}}$$

محاسبات مصرف سوخت در کد MCNPX با استفاده از کارت Burn محاسبه و نتایج کار در بخش بعدی داده شده‌اند.

نتایج :

در شکل ۲، دو نمونه از مجتمع‌های سوخت TVSA ارائه شده‌اند.

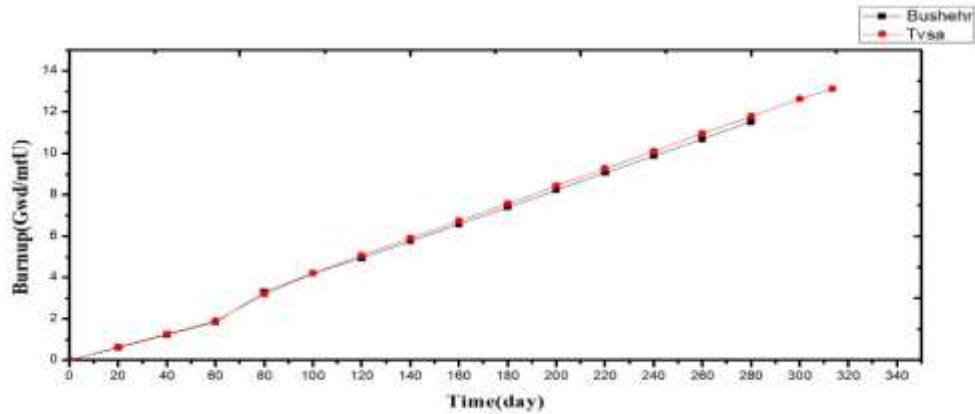


(ب)

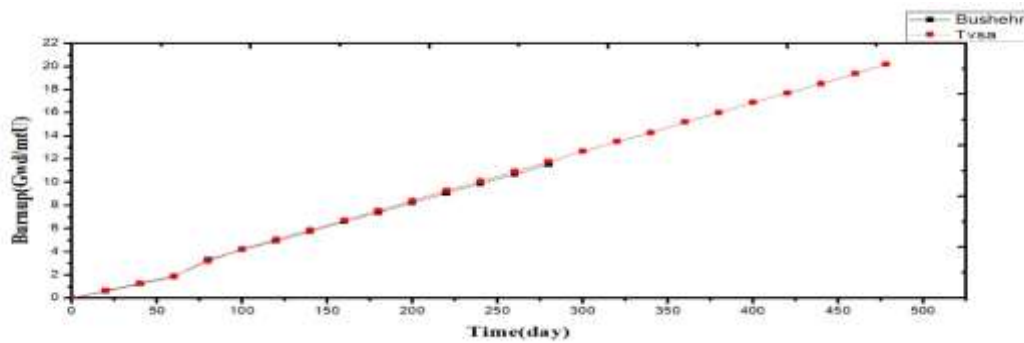
(الف)

شکل ۲: آرایش مجتمع‌های شبیه‌سازی شده راکتور TVSA نوع الف (39AWU ب) 30AV5 در آرایش مجتمع سوخت شبیه سازی شده 39 AWU شامل ۲۴۳ میله سوخت (با غنای ۴ درصد) و ۶۰ میله سوخت (با غنای ۳/۶ درصد) و ۹ تا جاذب سوختنی (با اورانیوم ۳/۳ درصد به نسبت ۹۵ درصد و گادولنیوم اکسید ۵ درصد) می باشد. عمق مصرف سوخت برای مجتمع سوخت TVSA به ازای زمان کمینه و بیشینه محاسبه شده که زمان کمینه ۳۰۱/۳ روز و زمان بیشینه ۴۷۸ روز می باشد، عمق مصرف سوخت برای راکتور بوشهر دوره اول به ازای ۲۸۹/۷ روز و دوره دوم به ازای ۲۹۳/۸ روز محاسبه شده است.

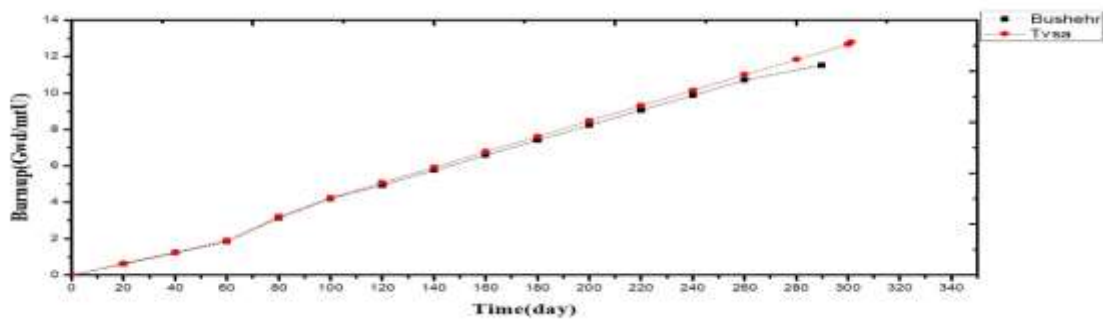
در شکل ۳ و ۴ میانگین عمق مصرف سوخت راکتور TVSA و راکتور بوشهر در دوره اول، در شکل ۵ و ۶ میانگین عمق مصرف سوخت راکتور TVSA و راکتور بوشهر در دوره دوم مقایسه شده است. در شکل ۷ و ۸ میانگین عمق مصرف سوخت در دوره اول و دوم راکتور بوشهر محاسبه و با نتایج آلبوم نوترونیک راکتور مقایسه شده است.



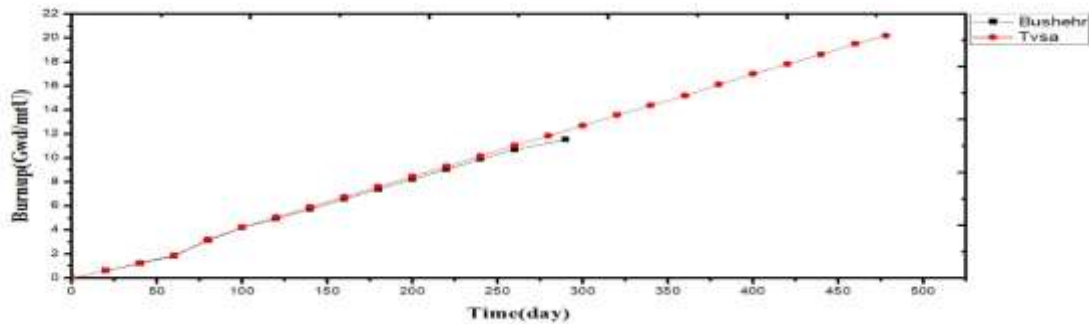
شکل ۳: میانگین عمق مصرف سوخت راکتور بوشهر در دوره اول و مقایسه آن با راکتور TVSA در زمان کمینه.



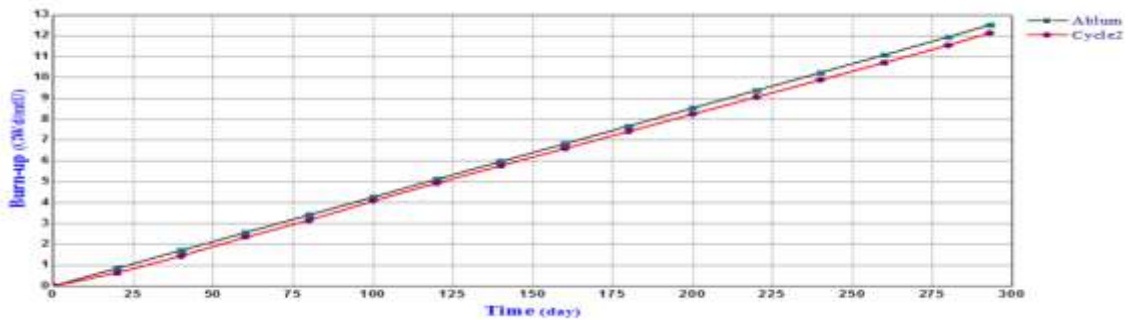
شکل ۴: میانگین عمق مصرف سوخت راکتور بوشهر در دوره اول و مقایسه آن با راکتور TVSA در زمان بیشینه.



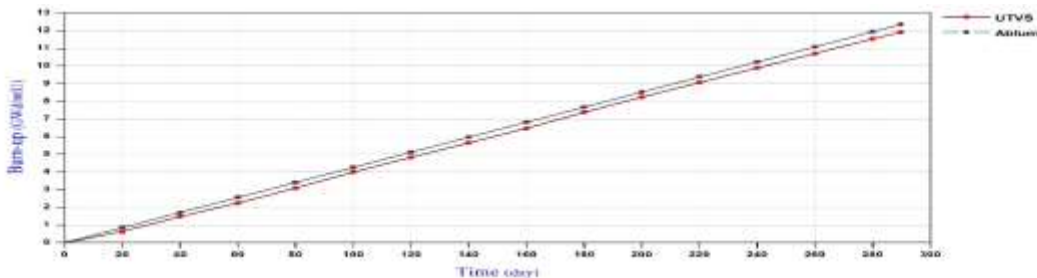
شکل ۵: میانگین عمق مصرف سوخت راکتور بوشهر در دوره دوم و مقایسه آن با راکتور TVSA در زمان کمینه.



شکل ۶: میانگین عمق مصرف سوخت راکتور بوشهر در دوره دوم و مقایسه آن با راکتور TVSA در زمان بیشتری



شکل ۷: میانگین عمق مصرف سوخت راکتور بوشهر در دوره دوم و مقایسه آن با آلوم نوترونی



شکل ۸: میانگین عمق مصرف سوخت در دوره اول راکتور بوشهر و مقایسه آن با آلوم نوترونی.

بحث و نتیجه گیری :

مقدار برناپ در سیکل اول کاری راکتور بوشهر برابر است با $11/91$ GWd/MTU و در سیکل دوم کاری $12/35$ GWd/MTU می‌باشد. مقدار برناپ در مجموع هر دو سیکل راکتور بوشهر، $24/26$ GWd/MTU حاصل شده است که در مقایسه با مقدار آلوم نوترونی راکتور در هر دو سیکل ($24/87$ GWd/MTU) نتیجه‌ای مناسب با درصد خطای ناچیز است. مقدار برناپ در سیکل اول کاری راکتور با مجتمع TVSA برای زمان کمینه، دوره اول 313 روز برابر است با $13/12$ GWd/MTU و در سیکل دوم کاری، 301 روز $12/8$ GWd/MTU می‌باشد. میزان تغییرات Burn up برای قلب



جدید در مجموع در زمان کمینه با $25/92 \text{ GWd/MTU}$ و در زمان بیشینه، $40/4 \text{ GWd/MTU}$ است؛ در صورتی که برای قلب فعلی برابر $24/26 \text{ GWd/MTU}$ می باشد. با افزایش زمان کاری راکتور و جلو رفتن در طول سیکل میزان غلظت اسید بوریک کاهش می یابد، تا اینکه در انتهای سیکل صفر می گردد. هدف گذاری اصلی که دست یابی به برناب بیشتر و طول سیکل بیشتر است حاصل شده است. به عبارت دیگر این قلب یعنی چینش قلب راکتور با سوخت TVSA بدون ایجاد تغییرات اساسی در سیستم های راکتور و توربین را چه به لحاظ مالی و اقتصادی و چه از نظر زمانی و تعداد توقف ها برای عملیات تعویض سوخت مزیت اقتصادی زیادی را نسبت به سوخت فعلی داراست.

قدردانی:

از مرکز پژوهشی انرژی هسته ای دانشگاه خلیج فارس قدردانی می گردد.

مراجع :

- [1] J.C.Wagner, C.V.Parks, "Recommendations on the Credit for Cooling Time in PWR Burnup Credit Analyses; Division of Systems Analysis and Regulatory Effectiveness, Office of Nuclear Regulatory Research, US Nuclear Regulatory Commission (2003).
- [2] V.Molchanov, "Nuclear fuel for NPPs with VVER-1000 reactors: Status and prospects" ; Proposal for Belene NPP (2004).
- [3] I.Vasilchenko, V.Mokhov, S.Ryzhov, "Core designs for new VVER reactors and operational experience of immediate prototypes" (2011).
- [4] <https://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite.eng/>.
- [5] D.B.pelowitz, "MCNPX users version 2.6.0"; Los Alamos National Laboratory, Los Alamos (NM) (2008).