

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

Calculation of the Neutronic Parameters in the Burn up Effect in an Electron Accelerator Driven Subcritical ALMR Reactor transmutation of LLFP

محاسبات پارامتر نوترونی در اثر مصرف سوخت (برن آپ) در یک راکتور زیر بحرانی ALMR واداشته با شتاب دهنده الکترونی جهت تبدیل هسته‌ای محصولات شکافت با عمر بالا

کوروش رهبری^۱، مصطفی حسن زاده^۲، سید امیر حسین فقهی^۳، داریوش مستی^۱

۱- دانشگاه علوم و تحقیقات بوشهر- دانشکده فنی مهندسی- گروه راکتور

۲- سازمان انرژی اتمی- پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده راکتور

۳- دانشگاه شهید بهشتی - دانشکده مهندسی هسته‌ای - گروه کاربرد پرتوها

چکیده:

بررسی اثر مصرف سوخت بر روی پارامترهای نوترونی یکی از مهمترین مراحل طراحی در راکتورهای هسته‌ای می‌باشد. در این مطالعه، محاسبه پارامترهای نوترونی شامل: ضریب تکثیر موثر، توزیع مکانی شار نوترون و مقدار مصرف سوخت در یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی موسوم به ALMR، با استفاده از کد MCNPX برای حالت توزیع مکانی سهمی‌گون باریکه الکترونی انجام شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش میزان مصرف سوخت، مقدار ضریب تکثیر موثر و میزان جرمی TRU ها کاهش ولی مقدار پاره های شکافت افزایش می‌یابند. با توجه به نتایج، میانگین اختلاف نسبی حاصل از محاسبات با داده های مرجع کمتر از مقدار ۵٪ است.

کلید واژه: شتاب‌دهنده الکترونی، پارامترهای نوترونی، تبدیل هسته‌ای، کد MCNPX، راکتور ALMR و محصولات شکافت با عمر بالا

Abstract

One of the key components in a nuclear reactor is calculation of the neutronic parameters and burn up effect on these parameters. In this paper, neutronic parameters such as effective multiplication factor (k_{eff}), distribution of neutron flux and burn up are calculated in an Accelerator Driven Subcritical ALMR reactor to transmutation of TRUs by using of MCNPX code for the parabolic spatial distribution of electron beam. The findings indicate that with burn up increasing, the values of k_{eff} and TRU have been decreased, but in the fission products have been increased. According to the results, the average relative difference between the results of calculations compared with the reference data are 5.0%.

Long – lived fission products ^۱

۱۶ و ۱۷ شهریور ماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

۱- مقدمه

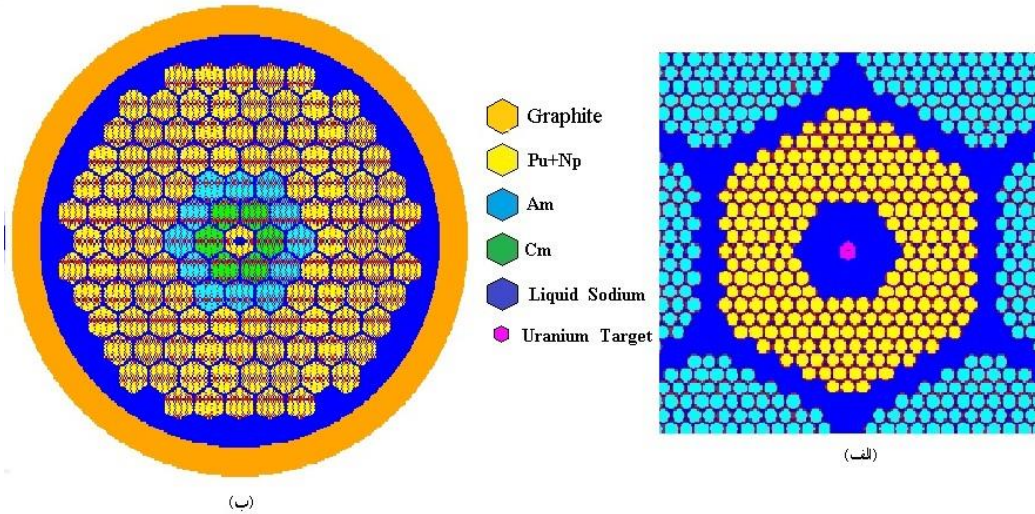
تبدیل هسته‌ای محصولات شکافت بلند مدت یک راهکار امید بخش برای کاهش پسمان رادیواکتیو و دوره‌ی طولانی سمیت رادیواکتیو آن‌ها است. فرآیند تبدیل هسته‌ای می‌تواند بوسیله بمباران کردن یک ماده با ذرات مختلف شامل آلفا، الکترون، پروتون، دوترون و غیره انجام شود. طی این فرآیند یک ایزوتوپ به ایزوتوپ مشابه همان ماده و یا به عناصر دیگری تبدیل می‌شوند. تبدیل هسته‌ای می‌تواند جرم، حجم، اکتیویته، بهره‌ی گرمایی، سمیت پسمان رادیواکتیو و غیره را کاهش دهد [۱ و ۲]. در این تحقیق از سیستم واداشته با شتاب‌دهنده الکترونی (ADS^1) به دلیل کاهش تشعشعات مخرب، هزینه و تکنولوژی شناخته شده آن در اکثر کشورها، برای تبدیل هسته‌ای محصولات شکافت بلند مدت استفاده شده است.

۲- مدل سازی هدف و قلب زیر بحرانی

انتخاب هدف مناسب یکی از مهمترین مراحل طراحی و محاسبه‌ی پارامترهای نوترونی یک راکتور زیر بحرانی واداشته با شتاب دهنده می باشد، در این طراحی از یک هدف اورانیومی استوانه‌ای شکل با قطر و ارتفاع 4cm و 10cm که در معرض شارش باریکه‌ی الکترون با انرژی 1000MeV و توزیع مکانی سهمی گون قرار گرفته، استفاده شده است [۱]. چیدمان شبکه قلب راکتور $ALMR^2$ اصلاح شده (راکتور زیر بحرانی) بدین صورت می‌باشد که شامل: 120 مجتمع سوخت با تعداد 271 عدد میله سوخت و یک مجتمع مرکزی که شامل هدف و 234 میله سوخت تشکیل شده است. سوخت این راکتور شامل $11\% \text{TRU}^3 + 89\% \text{Zr}$ با خنک کننده سدیم مذاب و بازتابنده گرافیت می‌باشد. نمایی از مجتمع سوخت مرکزی و قلب شبیه سازی شده با کد $MCNPX$ در شکل ۱، نشان داده شده است [۱-۳].

¹ Accelerator Driven System
Liquid Metal Reactor ² Advanced
³ Transuranic Element

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل ۱: قلب راکتور ALMR شبیه سازی شده با کد MCNPX (الف) مجتمع سوخت مرکزی، (ب) نمای کلی قلب با بازتابنده.

در صد فراوانی ایزوتوپ های به کار رفته در هر مجتمع سوخت در جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱: ایزوتوپ های TRU در مجتمع سوخت Np-Pu [۱]

ایزوتوپ های TRU	درصد کل ترکیب TRU در یک مجتمع سوخت
237Np	3.57251
238Pu	7.356948
239Pu	26.85437
240Pu	42.0224
241Pu	7.780805
242Pu	12.41296

جدول ۲: ایزوتوپ های TRU در مجتمع سوخت Am [۱]

ایزوتوپ های TRU	درصد کل ترکیب TRU در یک مجتمع سوخت
241Am	60.56701
242Am	7.731959
243Am	31.70103

۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد

جدول ۳: ایزوتوپ های TRU در مجتمع سوخت Cm [۱]

ایزوتوپ های TRU	درصد کل ترکیب TRU در یک مجتمع سوخت
244Cm	78.97023
245Cm	15.79405
246Cm	4.817184
247Cm	0.418542

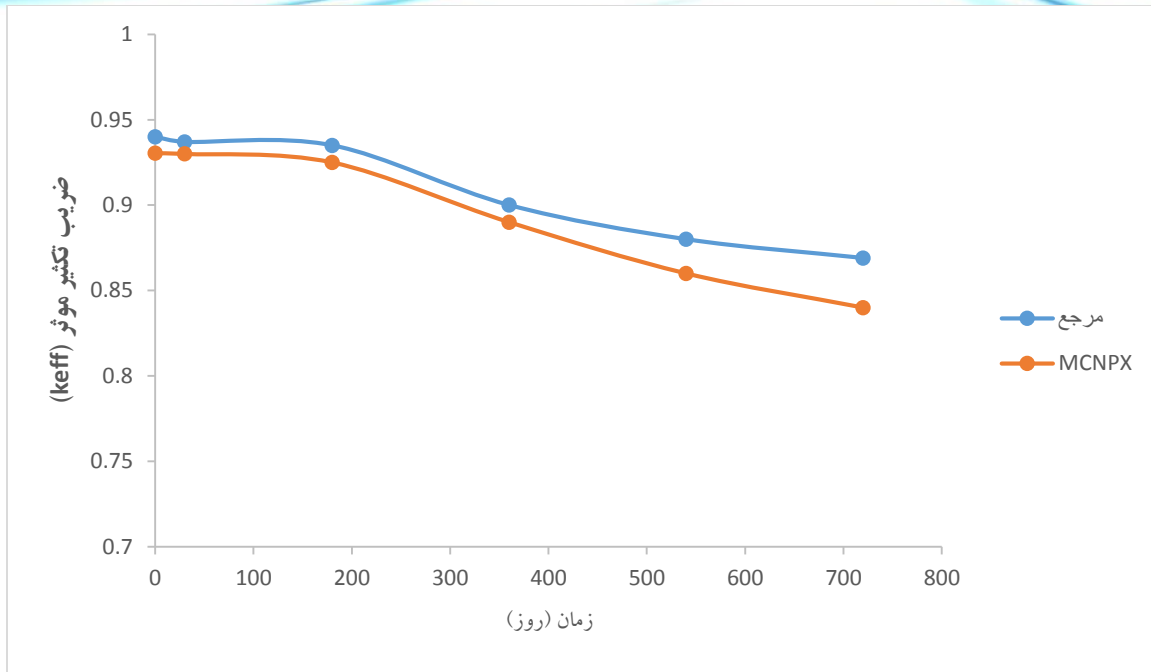
۳- نحوه‌ی محاسبات مصرف سوخت

در این مقاله از کد MCNPX نسخه ۲/۶ آن برای محاسبه میزان مصرف سوخت استفاده شده است. الگوریتم محاسبه مصرف سوخت توسط کد CINDER90 که نسخه ارتقاء یافته کد CINDER می‌باشد و در داخل کد MCNPX قرار داده شده است، انجام می‌گیرد. کارت مناسب برای محاسبه مصرف سوخت، کارت BURN می‌باشد که شامل کارت‌های TIME (انتخاب بازه زمانی مناسب برحسب روز)، MAT (انتخاب مواد مورد نظر جهت مصرف سوخت)، POWER (توان کل راکتور برحسب مگاوات)، PFRAC (کسر توانی و یا گاهی ضریب نرمالیزاسیون هم می‌باشد)، MATVOL (حجم کل مواد سوخت برحسب سانتی متر مکعب)، OMIT (ایزوتوپ‌هایی که می‌تواند در نظر گرفته نشود و یا چندان مهم نمی‌باشند)، BOPT (کارت‌های کنترلی جهت چاپ خروجی مثلا برحسب کسر اتمی و یا جرمی و غیره)، AFMIN (کسر اتمی ایزوتوپ‌هایی که در محاسبه ترابرد در نظر گرفته می‌شود) و غیره می‌باشند. ضمناً واحد مصرف سوخت در کد MCNPX گیگا وات روز بر متریک تن است [۳و۴].

۴- نتایج شبیه سازی

برای محاسبه پارامترهای نوترونی برحسب میزان مصرف سوخت در راکتور زیربحرانی ALMR اصلاح شده در حالت زیربحرانی با ضریب تکثیر ۰/۹۳ از کد MCNPX استفاده شده است. این پارامترهای نوترونی شامل: ضریب تکثیر موثر، توزیع مکانی شار نوترون و میزان مصرف سوخت برای TRUهای موجود در قلب می‌باشند. پارامتر ضریب تکثیر موثر در حالت زیربحرانی ۰/۹۳ برای قلب راکتور ALMR اصلاح شده برحسب زمان برای یک سیکل ۷۲۰ روزه محاسبه و با داده‌های مرجع مقایسه شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طوری که شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش زمان یا با افزایش میزان مصرف سوخت مقدار ضریب تکثیر موثر کاهش می‌یابد، دلیل این کاهش به خاطر کم شدن میزان سوخت می‌باشد. متوسط اختلاف نسبی نتایج بدست آمده از محاسبات با داده‌های مرجع کمتر از مقدار ۵٪ است.

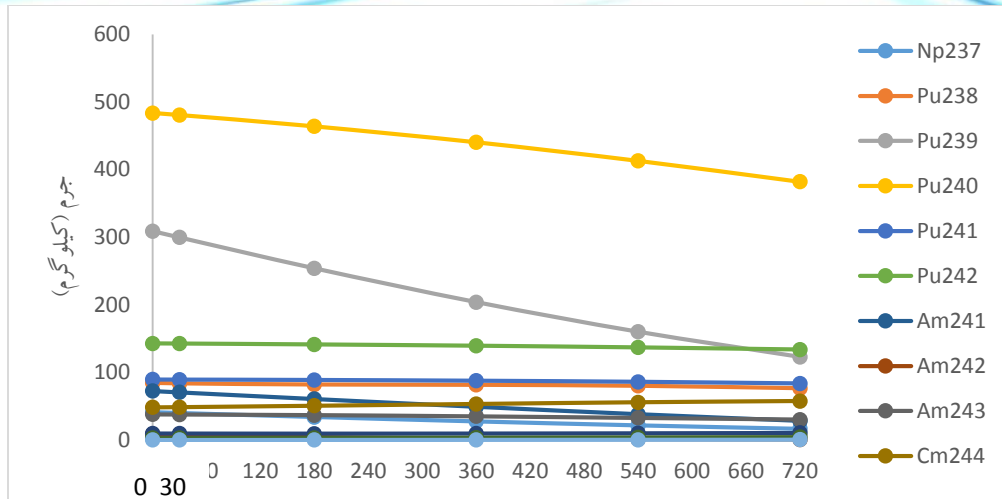
۱۶ و ۱۷ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



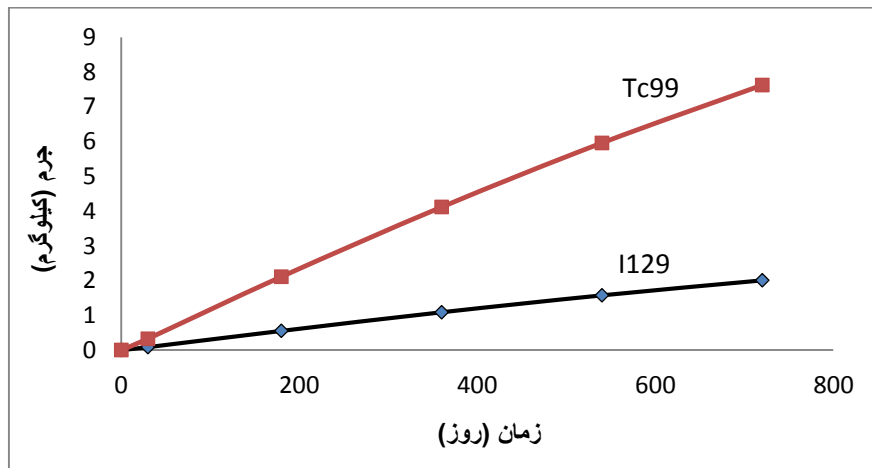
شکل ۲: منحنی های ضریب تکثیر موثر برحسب زمان برای حالت زیربحرانی ۰/۹۳ در مقایسه با مرجع [۲]. با توجه به نتایج، میانگین اختلاف نسبی حاصل از محاسبات با داده های مرجع کمتر از مقدار ۵٪ است.

همچنین پارامتر میزان مصرف سوخت برای حالت زیربحرانی ۰/۹۳ در قلب راکتور ALMR اصلاح شده برحسب زمان محاسبه شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طوری که شکل ۳ نشان می دهد با افزایش زمان، میزان مصرف سوخت نیز افزایش می یابد، دلیل این افزایش به خاطر مصرف سوخت می باشد. علاوه بر این، پارامتر مقدار جرمی آکتیوها در قلب راکتور زیر بحرانی ALMR اصلاح شده برحسب زمان برای نپتونیم، پلوتونیوم، آمرسیوم و کوریوم محاسبه شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طوری که در شکل ۴ نشان می دهد با افزایش زمان، مقادیر جرمی پلوتونیوم، نپتونیم و آمرسیوم به دلیل مصرف سوخت کاهش می یابند.

۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ اسفندماه دانشگاه یزد



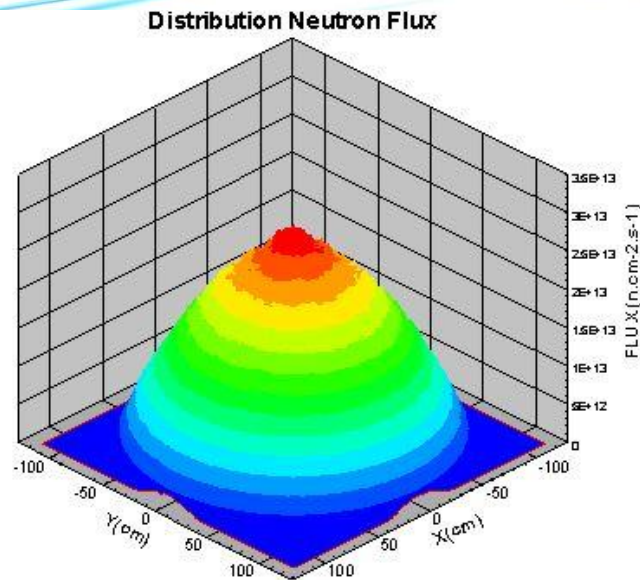
شکل ۴: منحنی مقدار جرمی ایزوتوپ های TRU بر حسب زمان



شکل ۵: منحنی مقادیر جرمی ید و تکنسیوم بر حسب زمان

محاسبه توزیع شعاعی و محوری شار نوترون در طراحی راکتور از اهمیت بالایی برخوردارند. لیکن در این مطالعه، توزیع مکانی شار نوترون در حالت سه بعدی برای حالت زیر بحرانی با ضریب تکثیر 0.93 قلب راکتور ALMR اصلاح شده برای توزیع مکانی سهمی گون باریکه ی الکترون محاسبه شده است که در شکل ۶ رسم شده است. همان طوری که در شکل ۶ نشان می دهد با افزایش فاصله از مرکز قلب میزان جذب نوترون زیاد می شود در نتیجه جمعیت نوترون کاهش می یابد بنابراین شار نوترون کم می شود.

۵ و ۶ اسفندماه ۱۳۹۴ دانشگاه یزد



شکل ۶: توزیع مکانی شار نوترون برای حالت زیر بحرانی با ضریب تکثیر ۰/۹۳

۵- نتیجه گیری

به طور کلی نتایج این مطالعه را می‌توان به طور زیر دسته بندی نمود:

- با افزایش میزان مصرف سوخت مقدار ضریب تکثیر موثر کاهش می‌یابد.
- با افزایش زمان، میزان جرمی TRU ها کاهش ولی پاره های شکافت افزایش می‌یابند.
- همچنین با افزایش شعاع قلب میزان شار نوترون کاهش می‌یابد.

مراجع

- [1]- P. M. Swaney, Target and Core Optimization for an Electron Accelerator Driven Transmutation Facility, A thesis of North Carolina University, 2007.
- [2]- D. Ridikas, et al., Conceptual study of neutron irradiator Driven by Electron Accelerator, CEA, France, 2002.
- [3]- B. P. Denise, MCNPX User's Manual Version 2.6.0, Los Alamos National Laboratory, LA-CP-07-1473, (2008).
- [4]- B. Sarer, et al., Monte Carlo studies in accelerator-driven systems for transmutation of high-level nuclear waste, Energy Conversion and Management 49, 1966-1971, 2008.