



## محاسبات مصرف سوخت راکتور کوچک و ماژولار MASLWR با استفاده از کد MCNPX

کریمی، جواد\* (۱) - شایسته، محسن (۲) - زنگیان، مهدی (۳)

دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده علوم پایه، مرکز علم و فناوری فیزیک (۱و۲)

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه راکتور (۳)

### چکیده:

امروزه راکتورهای کوچک ماژولار به دلیل داشتن برخی قابلیت از جمله کوچک بودن، به طور قابل توجهی مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است و فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای نیز در زمینه طراحی و ساخت آنها در حال انجام است. یکی از مسائل مهم در طراحی نوترونی قلب این راکتورها، انجام محاسبات مصرف سوخت و بررسی میزان تغییرات عناصر مختلف موجود در قلب، در طول فعالیت راکتور است. در این پژوهش برای راکتور کوچک ماژولار و مدرن MASLWR، با استفاده از کد MCNPX محاسبات مصرف سوخت برای سوخت با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ در صد، انجام شده است. در این محاسبات میزان تغییرات ایزوتوپ‌های اورانیوم (۲۳۵ و ۲۳۸)، ایزوتوپ‌های پلوتونیوم (۲۳۹ و ۲۴۱) و سموم نوترونی زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹ برای یک دوره مشخص از فعالیت راکتور بررسی شده است.

**کلمات کلیدی:** راکتور، مصرف سوخت، کد MCNPX

### مقدمه:

در سال‌های اخیر راکتورهای کوچک ماژولار به طور قابل توجهی مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته است. در دسته‌بندی راکتورها براساس توان، به راکتورهایی با توان الکتریکی کمتر از ۳۰۰ مگاوات، راکتور کوچک گفته می‌شود. در کشورهایی مانند چین، روسیه، کره جنوبی، ژاپن و آرژانتین فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای برای توسعه این نوع راکتورها انجام شده است [۱ و ۲]. این راکتورها به صورت یکپارچه ساخته می‌شوند طوری که مولدهای بخار در مجاورت قلب و در داخل محفظه اصلی راکتور قرار گرفته و این امر موجب کاهش طول لوله‌های رابط شده است. بنابراین احتمال وقوع حادثه از دست دادن خنک کننده نیز کاهش یافته و این امر موجب افزایش ایمنی راکتور می‌شود [۳]. راکتورهای

<sup>۱</sup>Small Modular Reactor

<sup>۲</sup>Integrate

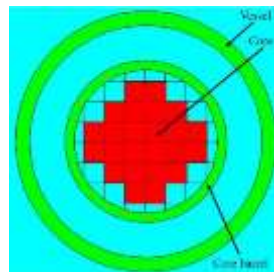
<sup>۳</sup>Loss of Coolant Accident



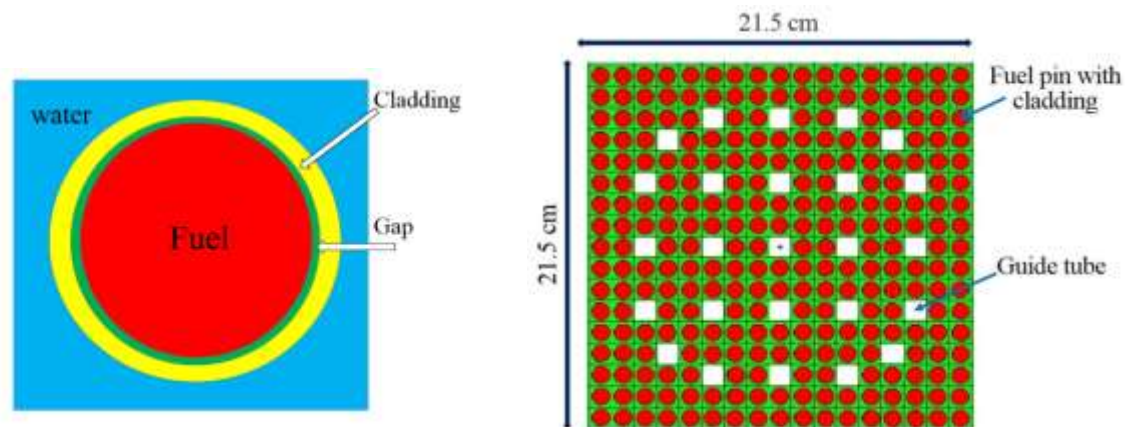
کوچک ماژولار به دلیل داشتن برخی از قابلیت‌ها از جمله کوچک بودن ابعاد، پایین بودن توان، قابلیت حمل و نقل و پایین بودن میزان سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به راکتورهای قدرت بزرگ، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۴ و ۵]. یکی از مسائل مهم در زمینه طراحی این نوع راکتورها، انجام محاسبات مصرف سوخت قلب است. در واقع با بررسی تغییرات میزان تولید و یا مصرف ایزوتوپ‌های عناصر مختلف در طول فعالیت راکتور، می‌توان میزان کارایی آن را برای یک بازه زمانی مشخص مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش راکتور کوچک ماژولار و مدرن MASLWR [۶] به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است و برای سوخت دی‌اکسید اورانیوم با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸، محاسبات مصرف سوخت شامل بررسی تغییرات ایزوتوپ‌های اورانیوم، پلوتونیوم و همچنین سموم نوترونی شامل زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹، با استفاده از کد [۷]MCNPX انجام شده است. این مقاله بر اساس همکاری با سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است.

## روش کار :

راکتور مورد نظر در این پژوهش، راکتور کوچک و ماژولار MASLWR است. پروژه طراحی و ساخت این راکتور توسط وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا پشتیبانی و هدایت می‌شود [۸]. در این راکتور در مجموع تعداد ۲۴ مجموعه سوخت با هندسه مربعی قرار دارد که مطابق شکل (۱) درون یک محفظه استوانه‌ای قرار می‌گیرند. قلب راکتور دارای چند لایه مختلف است که قطر داخلی اولین لایه آن ۱/۵ متر است. لایه‌ها شامل core barrel، محفظه‌های نگهدارنده اولیه و ثانویه بوده که فضای بین این لایه‌ها با آب پر شده است [۹ و ۸]. هر مجموعه سوخت مربعی قلب راکتور یک آرایش ۱۷\*۱۷ دارد و در هر مجموعه تعداد ۲۸۹ فضا برای قرارگیری میله‌های مختلف مانند میله سوخت، کنترل و ... تعبیه شده است. در هر مجموعه سوخت، ۲۶۴ میله سوخت و ۲۵ محل خالی به عنوان guide tube در نظر گرفته شده است. هندسه مجموعه‌های سوخت قلب و میله‌های مورد استفاده در آن، در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۱): شبیه‌سازی مقطع استوانه‌ای قلب راکتور MASLWR با استفاده از کد MCNPX [۸].



الف): ساختار مربعی یک مجموعه سوخت

ب): مقطع استوانه‌ای میله سوخت

شکل (۲): شبیه‌سازی اجزای قلب راکتور MASLWR با استفاده از کد MCNPX

در این پژوهش با استفاده از کد MCNPX [۷] و همچنین اطلاعات موجود از راکتور MASLWR، قلب این راکتور به صورت سه بعدی شبیه‌سازی شده است. در این محاسبات از اثر توزیع دما بر مصرف سوخت صرف نظر شده است. محاسبات مصرف سوخت با استفاده از کارت BURN موجود در کد برای سوخت با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد انجام شده است.

### نتایج :

- در بخش اول از این پژوهش و با هدف اطمینان از صحت قلب راکتور شبیه‌سازی شده با کد MCNPX، مقدار ضریب تکثیر قلب برای سوخت دی‌اکسید اورانیوم با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد محاسبه شده و این نتایج با مقادیر محاسبه شده با کد CASMO (ارائه شده توسط (Alexey I. Soldatov [۹])) مقایسه شده است (جدول (۱)).
- در شکل (۳) نمودار تغییرات چگالی اتمی ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸ برحسب BURNUP برای سوخت با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد، رسم شده است. مطابق شکل چگالی اتمی ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و



۲۳۸ در ابتدای فعالیت راکتور که سوخت تازه داریم، دارای مقدار بی‌شینه بوده که به تدریج با گذر زمان و مصرف سوخت، این مقادیر کاهش می‌یابد. کاهش چگالی اورانیوم ۲۳۵ به دلیل شکافت و همچنین گیراندازی نوترون و تولید اورانیوم ۲۳۶ است و دلیل اصلی کاهش اورانیوم ۲۳۸ نیز گیراندازی‌های متوالی نوترون است که این امر موجب تولید عناصر فرااورانیومی<sup>۵</sup> مختلف در قلب راکتور می‌شود.

- نمودار تغییرات چگالی اتمی سموم نوترونی زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹ بر حسب BURNUP برای سوخت اورانیوم با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد، در شکل (۴) رسم شده است. مطابق این شکل در ابتدای فعالیت راکتور و با شروع واکنش‌های زنجیره‌ای شکافت در قلب، چگالی اتمی زینان افزایش یافته و دارای یک مقدار بیشینه است. میزان سموم نوترونی زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹ به غنای سوخت بستگی داشته و با افزایش غنا میزان آنها نیز در قلب افزایش می‌یابد.

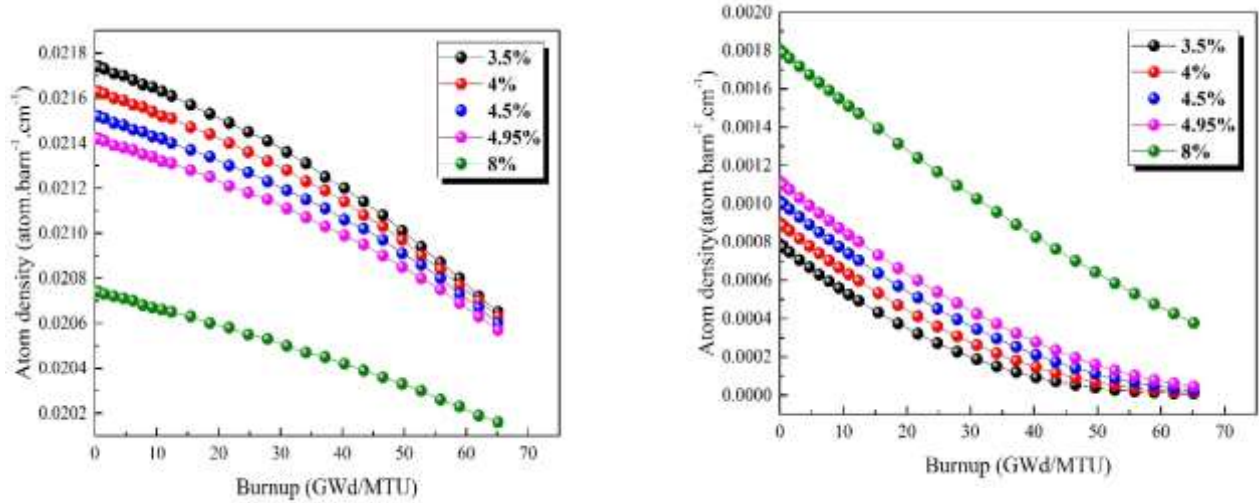
- در شکل (۵) نمودار تغییرات جرم ایزوتوپ‌های پلوتونیوم ۲۳۹ و ۲۴۱ بر حسب زمان، برای سوخت اورانیوم با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد، رسم شده است. با توجه به اینکه در ابتدای فعالیت راکتور در قلب فقط اورانیوم داریم، مقدار پلوتونیوم در ابتدا صفر است و به تدریج با گذر زمان و گیراندازی‌های متوالی نوترون توسط اورانیوم ۲۳۸، ایزوتوپ‌های مختلف آن تشکیل و مقدار آنها در قلب افزایش می‌یابد. در مورد ایزوتوپ‌های پلوتونیوم ۲۳۹ و ۲۴۱، مقدار موجودی آن‌ها در قلب با گذر زمان به یک مقدار بی‌شینه رسیده و روند صعودی آن متوقف می‌شود. دلیل این امر، این است که ایزوتوپ‌های ۲۳۹ و ۲۴۱ می‌توانند با نوترون حرارتی شکافته شوند و بخشی از آن‌ها در قلب مصرف شود. همچنین مقدار تولید پلوتونیوم به غنای سوخت نیز بستگی داشته و به طور کلی با افزایش غنا مقدار آن کاهش می‌یابد.

جدول (۱): مقایسه مقادیر ضریب تکثیر محاسبه شده با استفاده از کدهای CASMO و MCNPX

برای سوخت با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد

خطای محاسبه ضریب تکثیر موثر با استفاده از کد MCNPX	ضریب تکثیر موثر (کد MCNPX)	ضریب تکثیر موثر (کد CASMO) [۸]	غنای سوخت (درصد)
۰/۰۰۰۴۶	۱/۳۷۰۷۶	۱/۳۶۷۴	۳/۵
۰/۰۰۰۶۷	۱/۴۰۱۶۹	۱/۳۹۳۹	۴
۰/۰۰۰۶۶	۱/۴۲۳۷۷	۱/۴۱۵۳	۴/۵
۰/۰۰۰۶۱	۱/۴۴۰۶۸	۱/۴۳۱۳	۴/۹۵

<sup>۵</sup>Transuranic elements



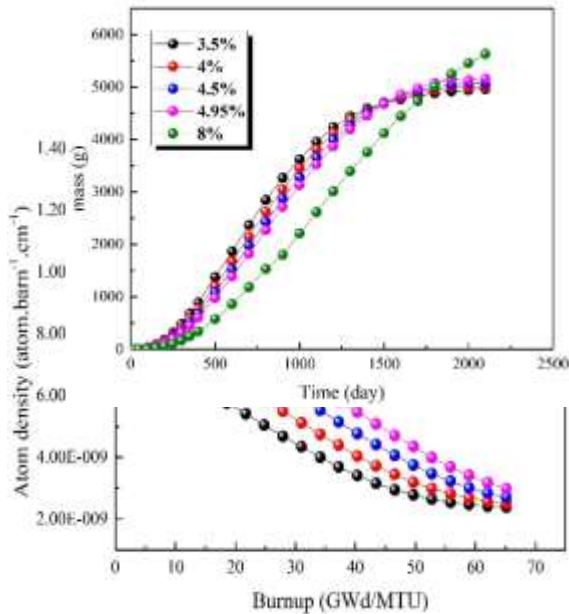
۰/۰۰۰۰۵۲	۱/۵۱۳۸۴	۱/۴۹۶۳	۸
----------	---------	--------	---

(الف)

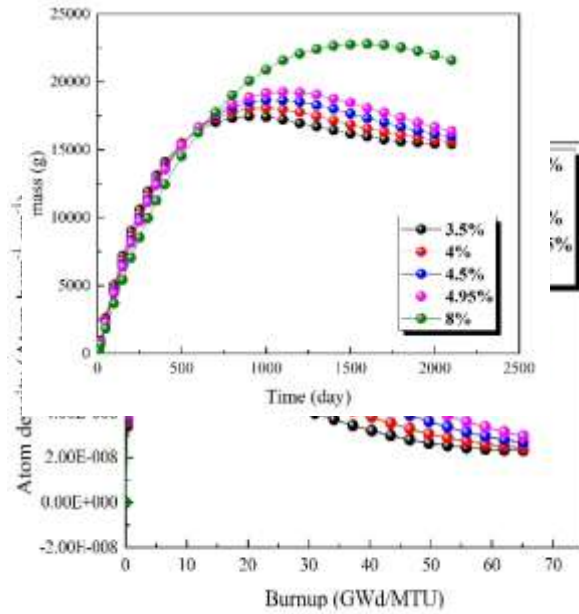
ب) اورانیوم ۲۳۸

اورانیوم ۲۳۵

شکل (۳): تغییرات چگالی اتمی ایزوتوپ‌های اورانیوم بر حسب Burnup، برای سوخت با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد



(ب) زینان ۱۳۵



(الف) ساماریوم ۱۴۹

شکل (۴): تغییرات چگالی اتمی زینان و ساماریوم بر حسب **Burnup**، برای سوخت با غناهای

۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد

(ب) پلوتونیوم ۲۴۱

(الف) پلوتونیوم ۲۳۹

شکل (۵): تغییرات میزان ایزوتوپ‌های پلوتونیوم بر حسب زمان برای سوخت با

غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد

**بحث و نتیجه‌گیری :**

در این پژوهش محاسبات مصرف سوخت برای دی‌اکسید اورانیوم با غناهای ۳/۵، ۴، ۴/۵، ۴/۹۵ و ۸ درصد انجام شده است و تغییرات زمانی میزان ایزوتوپ‌های مختلف موجود در قلب راکتور ABV، برای ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و



۲۳۸، ایزوتوپ های پلوتونیوم شکافای ۲۳۹ و ۲۴۱ و همچنین سموم نوترونی زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹، برای یک دوره مشخص از فعالیت راکتور انجام شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش غنای سوخت، میزان سموم نوترونی موجود در قلب این نوع راکتورها به طور قابل توجهی افزایش یافته و می تواند عملکرد راکتور را در حین فعالیت تحت تاثیر قرار دهد. بنابراین در طراحی نوترونی قلب یک راکتور کوچک، جهت فعالیت ایمن و کارآمد با طول سیکل طولانی، بایستی به این مسئله توجه شود.

### مراجع :

- [1] IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments," ed: IAEA Vienna, 2014.
- [2] L. Adamovich, S. Banerjee, M. Bolshunikhin, E. Budylov, M. C. I. Dulera, P. Fomichnko, K. Furukawa, B. Gabaraev, and E. Greenspan, "Status of Small Reactor Designs without On-Site Refueling," *IAEA, Vienna*, 2007.
- [3] Z. Liu and J. Fan, "Technology readiness assessment of small modular reactor (SMR) designs," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 70, pp. 20-28, 2014.
- [4] D. Ingersoll, "Small modular reactors (SMRs) for producing nuclear energy: international developments," in *Handbook of Small Modular Nuclear Reactors*, ed: Elsevier, 2015, pp. 27-60.
- [5] Carelli, Mario D., and Daniel T. Ingersoll, eds. *Handbook of small modular nuclear reactors*. Elsevier, 2014.
- [6] A. Soldatov and T. S. Palmer, "A five-year core for a small modular light water reactor," *Nuclear Science and Engineering*, vol. 167, pp. 77-90, 2011.
- [7] U. S. M. MCNPXTM and B. P. Denise, "Version 2.6. 0," ed: April, 2008.
- [8] S. Modro, J. Fisher, K. Weaver, J. Reyes, J. Groome, P. Babka, and T. Carlson, "Multi-application small light water reactor final report," Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, ID ...2003.
- [9] A. I. Soldatov, "Design and analysis of a nuclear reactor core for innovative small light water reactors," 2009.