

بهینه‌سازی طراحی مجتمع‌های سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ با رویکرد بهبود عملکرد با استفاده از کد DRAGON^۴

امید حلال‌خور^{۱*} و امیر پایانی^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه مازندران، صندوق پستی ۱۳۵۳۴-۴۷۴۱۶، بابلسر، ایران.

^۲ سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران، ایران.

پست الکترونیکی: o.halalkhor01@umail.umz.ac.ir

چکیده

برای بهینه‌سازی طراحی یک مجتمع سوخت هسته‌ای لازم است مشخصه‌های هندسی و ابعادی، خواص مواد به‌کار رفته در آن از جنبه‌های نوترونی، ترمومکانیکی و ترموهیدرولیکی مورد بررسی قرار گیرد. در این پژوهش، بهینه‌سازی طراحی یک مجتمع سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ با استفاده از کد محاسبات سلولی و مصرف سوخت DRAGON^۴ از نقطه نظر نوترونی مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای معیار شامل ضریب تکثیر مؤثر، غلظت ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و ۲۳۸، پلوتونیوم ۲۳۹، ۲۴۰، ۲۴۱ و ۲۴۲، زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹ به‌عنوان شاخص‌های عملکردی سوخت در نظر گرفته شده‌اند. اهمیت این ایزوتوپ‌ها به‌دلیل نقش آن‌ها در واکنش‌های شکافت، تولید انرژی و همچنین اثرات پسماند هسته‌ای است. با استفاده از قابلیت‌های کد مذکور، تأثیر تغییرات پارامترهای هندسی مجتمع سوخت از جمله قطر حفره مرکزی قرص سوخت، ضخامت قرص سوخت، گپ بین قرص سوخت و غلاف و ضخامت غلاف بر پارامترهای معیار مورد بررسی قرار گرفته است. دامنه تغییرات این پارامترها از ۵۰ درصد کاهش تا ۲۴۰ درصد افزایش نسبت به مقدار طراحی فعلی در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که ضخامت قرص سوخت بیشترین تأثیر را بر تغییرات پارامترهای معیار دارد. به‌عبارت دیگر، تغییرات در ضخامت قرص سوخت باعث تغییرات قابل توجهی در ضریب تکثیر مؤثر و غلظت ایزوتوپ‌های مختلف می‌شود. همچنین، کاهش در پارامترهای هندسی مجتمع سوخت به‌طور کلی منجر به بهبود پارامترهای معیار و عملکرد بهتر سوخت می‌شود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند در طراحی بهینه مجتمع‌های سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ و بهبود عملکرد آن‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژگان: راکتور VVER-۱۰۰۰، مجتمع سوخت، بهینه‌سازی، کد DRAGON^۴، ضریب تکثیر مؤثر، تغییر غلظت ایزوتوپ‌های سوخت، تحلیل حساسیت.

۱. مقدمه

برخوردار است [۴،۳]. بهینه‌سازی مصرف سوخت به معنای کاهش هزینه‌های سوخت‌گذاری، افزایش طول عمر راکتور و کاهش تولید پسماندهای پرتوزا است.

راکتورهای هسته‌ای به عنوان یکی از منابع مهم تولید انرژی، نقش محوری در تأمین انرژی پایدار ایفا می‌کنند [۲،۱]. با این حال، بهینه‌سازی مصرف سوخت در این راکتورها از جنبه‌های مختلف اقتصادی، ایمنی و محیط زیستی از اهمیت بالایی

شده است، مقایسه گردید. در شکل ۱، تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های مختلف اورانیوم و پلوتونیوم در طول زمان در مصرف سوخت‌های مختلف برای یک مجتمع سوخت با غنای ۳/۶ درصد به صورت نموداری ارائه شده است. در این شکل، نتایج حاصل از شبیه‌سازی با کد DRAGON با داده‌های FSAR مقایسه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی با کد DRAGON و داده‌های متناظر در مدرک FSAR نیروگاه اتمی بوشهر وجود دارد [۱۱]. به منظور ارزیابی کمی این تطابق، بیشینه خطای نسبی محاسبات غلظت ایزوتوپ‌های مختلف با کد DRAGON نسبت به داده‌های FSAR در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): بیشینه خطای نسبی محاسبات غلظت ایزوتوپ‌ها با

کد DRAGON نسبت به داده‌های FSAR.

ایزوتوپ	بیشینه خطای نسبی
اورانیوم ۲۳۵	کمتر از ۱٪
اورانیوم ۲۳۸	کمتر از ۱٪
پلوتونیوم ۲۳۹	۸٪
پلوتونیوم ۲۴۰	کمتر از ۱٪
پلوتونیوم ۲۴۱	۱۲٪
پلوتونیوم ۲۴۲	کمتر از ۱٪

نتایج فوق نشان می‌دهد که این کد توانایی بالایی در پیش‌بینی تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های مختلف در طول زمان را دارد. تطابق خوب بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های FSAR، اعتبارسنجی مناسبی برای کد DRAGON محسوب می‌شود و اطمینان از دقت نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های بعدی را فراهم می‌آورد.

یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد راکتور، مصرف سوخت است. مصرف سوخت به عنوان میزان کاهش غلظت ایزوتوپ‌های شکافت‌پذیر در طول زمان تعریف می‌شود [۶،۵]. برای محاسبه دقیق مصرف سوخت، از معادلات پیچیده‌ای موسوم به معادلات بیتمن^۱ استفاده می‌شود. این معادلات تغییرات غلظت ایزوتوپ‌های مختلف را در طول زمان در نظر می‌گیرند [۸،۷].

در این پژوهش، با استفاده از کد محاسباتی DRAGON به بررسی بهینه‌سازی مصرف سوخت در راکتورهای VVER-۱۰۰۰ پرداخته شده است [۱۰،۹]. کد DRAGON ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی رفتار نوترونی در یک مجتمع سوخت راکتور هسته‌ای است. این کد قابلیت‌های گسترده‌ای از جمله محاسبات شار نوترون چند گروهی و چند بعدی، محاسبات تغییر غلظت‌های ایزوتوپی^۲ و محاسبه خودحفاظی تشدید^۳ را دارا است.

با توجه به توضیحات ارائه شده، کد DRAGON به عنوان یک ابزار کارآمد برای مدل‌سازی دقیق فرآیندهای فیزیکی درون راکتور و ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای طراحی بر مصرف سوخت به شمار می‌آید. در ادامه این پژوهش، با استفاده از این کد، به بررسی تأثیرات تغییرات پارامترهای هندسی مجتمع سوخت بر مصرف سوخت و سایر پارامترهای عملکردی نوترونی راکتور پرداخته شده است.

۲. اعتبارسنجی نتایج کد DRAGON

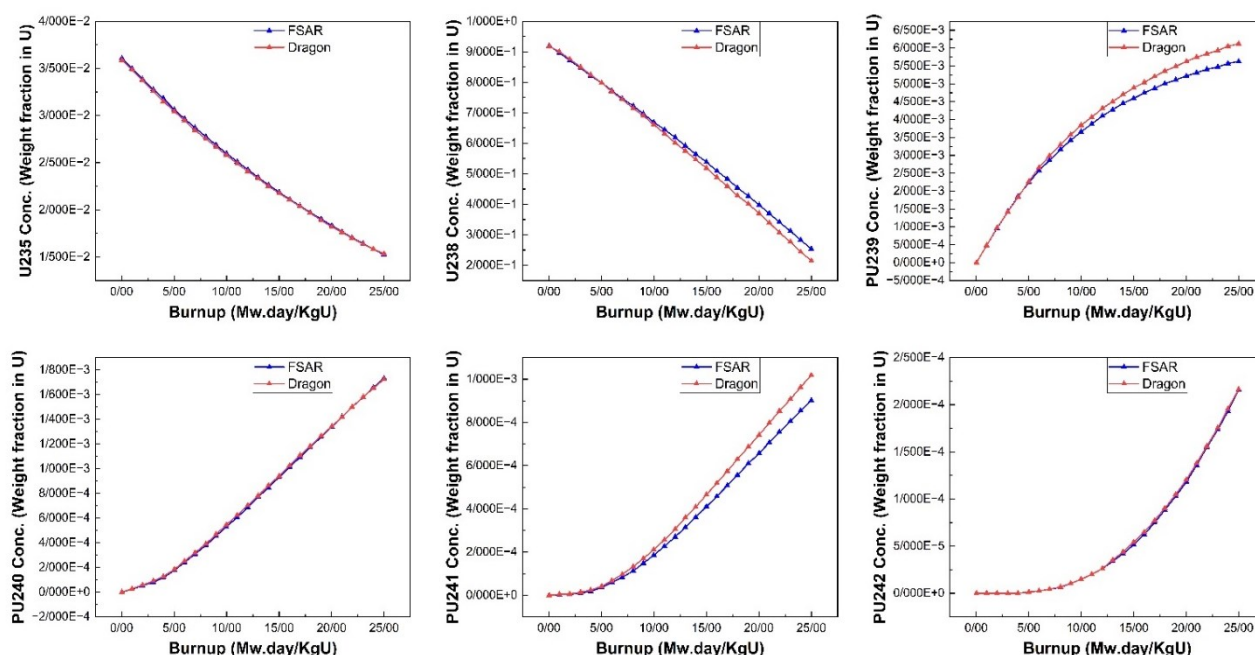
برای ارزیابی دقت محاسبات انجام شده در این پژوهش، نتایج شبیه‌سازی با کد DRAGON با داده‌های متناظر نیروگاه اتمی بوشهر که در گزارش تحلیل ایمنی نهایی (FSAR)^۴ آن ارائه

^۴ Final Safety Analysis Report

^۱ Bateman Equations

^۲ Isotope Depletion Calculations

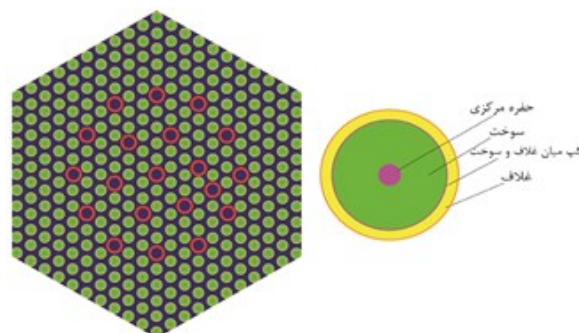
^۳ Resonance Self-shielding



شکل (۱): نمودارهای تغییر غلظت ایزوپها محاسبه شده با DRAGON در مقایسه با مدارک FSAR برای مجتمع‌های سوخت با غنای ۳.۶ درصد (الف) اورانیوم ۲۳۵ (ب) اورانیوم ۲۳۸ (پ) پلوتونیوم ۲۳۹ (ت) پلوتونیوم ۲۴۰ (ث) پلوتونیوم ۲۴۱ (د) پلوتونیوم ۲۴۲.

۳. تأثیر تغییرات هندسی مجتمع سوخت بر پارامترهای نوترونی و ایزوتوپی

مجتمع‌های سوخت در راکتورهای VVER-۱۰۰۰ معمولاً شامل ۳۱۱ میله سوخت هستند که در یک شش ضلعی قرار گرفته‌اند. در مرکز این مجتمع، یک کانال مرکزی وجود دارد و ۱۸ کانال راهنما که از آب پر شده است. شکل ۲، برش افقی یک مجتمع سوخت را نشان می‌دهد.



شکل (۲): برش سطح مقطع میله و مجتمع سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، چهار پارامتر هندسی اصلی بر رفتار نوترونی و ایزوتوپی یک مجتمع سوخت تأثیرگذار هستند که عبارتند از [۹، ۱۴-۱۲]:

۱.۳. **قطر حفره مرکز:** قطر این حفره بر توزیع شار نوترونی و در نتیجه بر نرخ مصرف سوخت و تولید محصولات شکافت تأثیر می‌گذارد.

۲.۳. **ضخامت سوخت:** ضخامت لایه سوخت، بر احتمال وقوع واکنش‌های شکافت و تولید نوترون‌های ثانویه تأثیرگذار است.

۳.۳. **ضخامت شکاف:** وجود گپی بین سوخت و غلاف، بر احتمال نشت نوترون‌ها و همچنین بر انتقال حرارت از سوخت به خنک‌کننده تأثیر می‌گذارد.

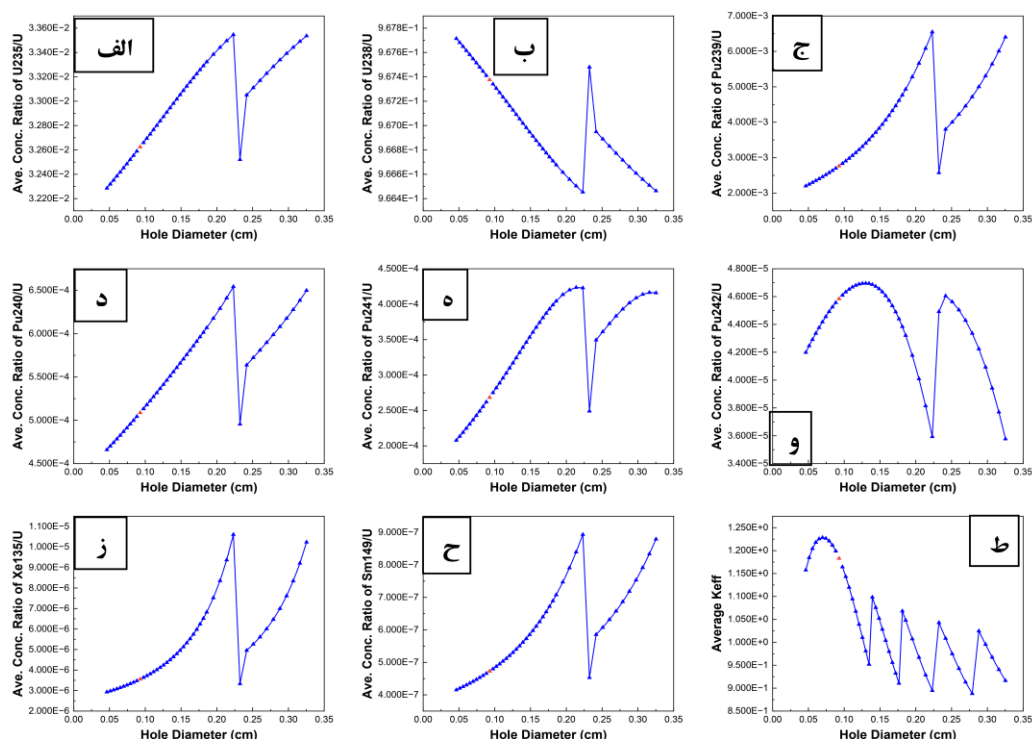
۴.۳. **ضخامت غلاف:** ضخامت غلاف، بر مقاومت مکانیکی و خوردگی غلاف و همچنین بر جذب نوترون‌ها تأثیرگذار است.

در این پژوهش، با استفاده از کد محاسباتی DRAGON، تأثیر تغییرات چهار پارامتر کلیدی بر رفتار پارامترهای نوترونی و ایزوتوپی در مجتمع سوخت با غنای ۴/۰۶ درصدی اورانیوم به‌طور جامع مورد بررسی قرار گرفته است. برای هر یک از این پارامترها، دامنه تغییرات گسترده‌ای بین ۵۰- تا ۲۴۰+ درصد نسبت به حالت استاندارد فعلی در نظر گرفته شده است تا حساسیت سیستم به تغییرات هندسی و فیزیکی به‌طور دقیق ارزیابی شود. نتایج این شبیه‌سازی‌ها که در شکل‌های ۳ تا ۶ ارائه شده‌اند، نشان‌دهنده رفتار پیچیده و غیرخطی سیستم در برابر تغییرات پارامترهای مختلف است. در این شکل‌ها، محور عمودی نمودارها نشان‌دهنده نسبت میانگین غلظت ایزوتوپ مورد نظر بر میانگین غلظت ایزوتوپ‌های اورانیوم است.

همان‌طور که از نمودارها استنباط می‌شود، رفتار اورانیوم ۲۳۸ در مقایسه با سایر ایزوتوپ‌ها در برابر تغییرات هندسی، رفتار معکوس از خود نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند ناشی از تفاوت در سطح مقاطع واکنشی و مکانیزم‌های جذب نوترون در این ایزوتوپ باشد. یکی از نکات قابل توجه در نمودارهای غلظت ایزوتوپ‌ها، وجود نقاط شکست در روند تغییرات است که به‌وضوح در برخی بازه‌های انرژی مشاهده می‌شود. این نقاط شکست عمده‌تاً به دلیل اثرات تشدید در سطح مقاطع واکنش‌های هسته‌ای رخ می‌دهند [۱۶، ۱۵]. به عبارت دیگر، در برخی از بازه‌های انرژی نوترون‌ها، سطح مقاطع واکنش هسته‌ای به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کند، که این امر می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر نرخ مصرف سوخت و تولید محصولات شکافت داشته باشد. این پدیده به‌ویژه در تغییرات ضخامت قرص سوخت نسبت به سایر پارامترهای هندسی بیشتر مشهود است، که نشان‌دهنده

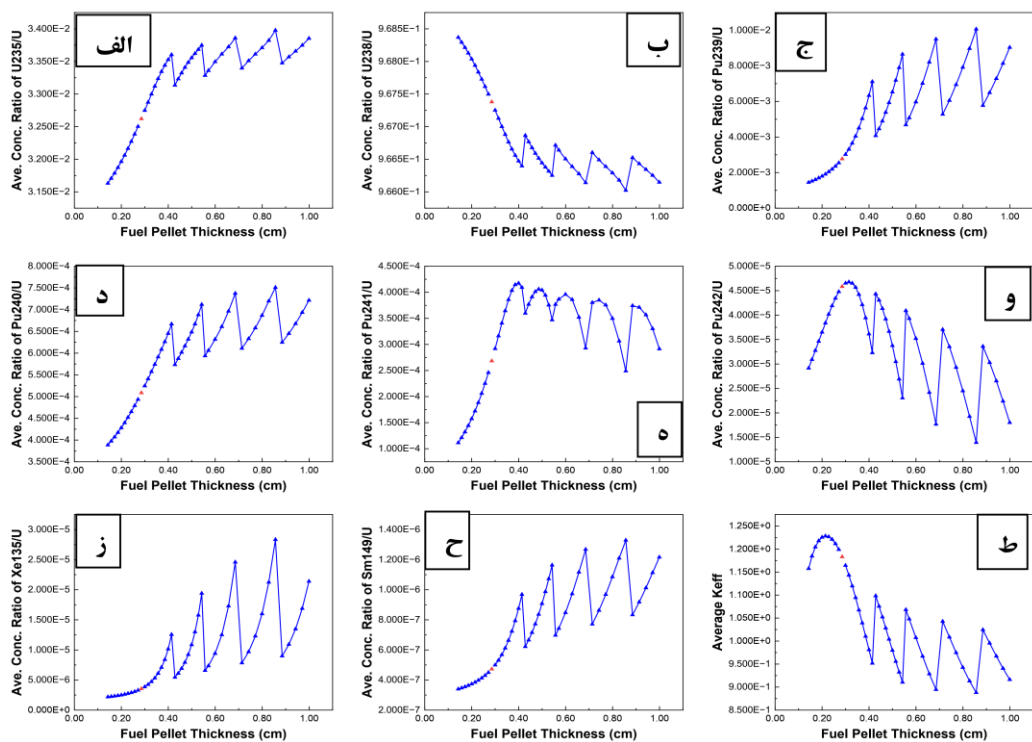
حساسیت بالای مصرف سوخت به ضخامت قرص سوخت در برخی از بازه‌های انرژی خاص است. به‌طور کلی، با کاهش پارامترهای هندسی نسبت به حالت استاندارد، میانگین غلظت اکثر ایزوتوپ‌ها کاهش می‌یابد. این کاهش می‌تواند ناشی از کاهش احتمال برخورد نوترون‌ها با هسته‌های سوخت و در نتیجه کاهش نرخ واکنش‌های هسته‌ای باشد. از سوی دیگر، با افزایش پارامترهای هندسی، تا رسیدن به نقطه شکست، میانگین غلظت اکثر ایزوتوپ‌ها افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش نرخ مصرف سوخت است. با این حال، پس از رسیدن به نقطه شکست، با کاهش غلظت ایزوتوپ‌ها مواجه می‌شویم که این امر به دلیل اثرات رزونانسی و تغییر در توزیع شار نوترونی درون راکتور است [۱۷، ۱۸].

ضریب تکثیر مؤثر (K_{eff}) به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی وضعیت بحرانی راکتور، به‌شدت تحت تأثیر تغییرات هندسی قرار دارد [۱۹]. به‌طور کلی، با کاهش پارامترهای هندسی (به جز ضخامت قرص سوخت)، ضریب تکثیر مؤثر افزایش می‌یابد. این افزایش می‌تواند ناشی از افزایش احتمال برخورد نوترون‌ها با هسته‌های سوخت و در نتیجه افزایش تعداد نوترون‌های تولید شده در فرآیند شکافت باشد. در مورد ضخامت سوخت، با افزایش ضخامت، ضریب تکثیر مؤثر تا رسیدن به یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد. اما پس از این نقطه، با افزایش بیشتر ضخامت سوخت، ضریب تکثیر مؤثر کاهش می‌یابد. این پدیده به دلیل اثرات خودحفاظتی نوترون‌ها [۲۰، ۲۱] در سوخت‌های با ضخامت زیاد رخ می‌دهد، که در آن نوترون‌ها قبل از رسیدن به هسته‌های سوخت، جذب یا پراکنده می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی‌ها (شکل‌های ۳-۶) به‌وضوح نشان می‌دهد که تغییرات هندسی مجتمع سوخت تأثیر قابل توجهی بر رفتار نوترونی و ایزوتوپی راکتور دارد.



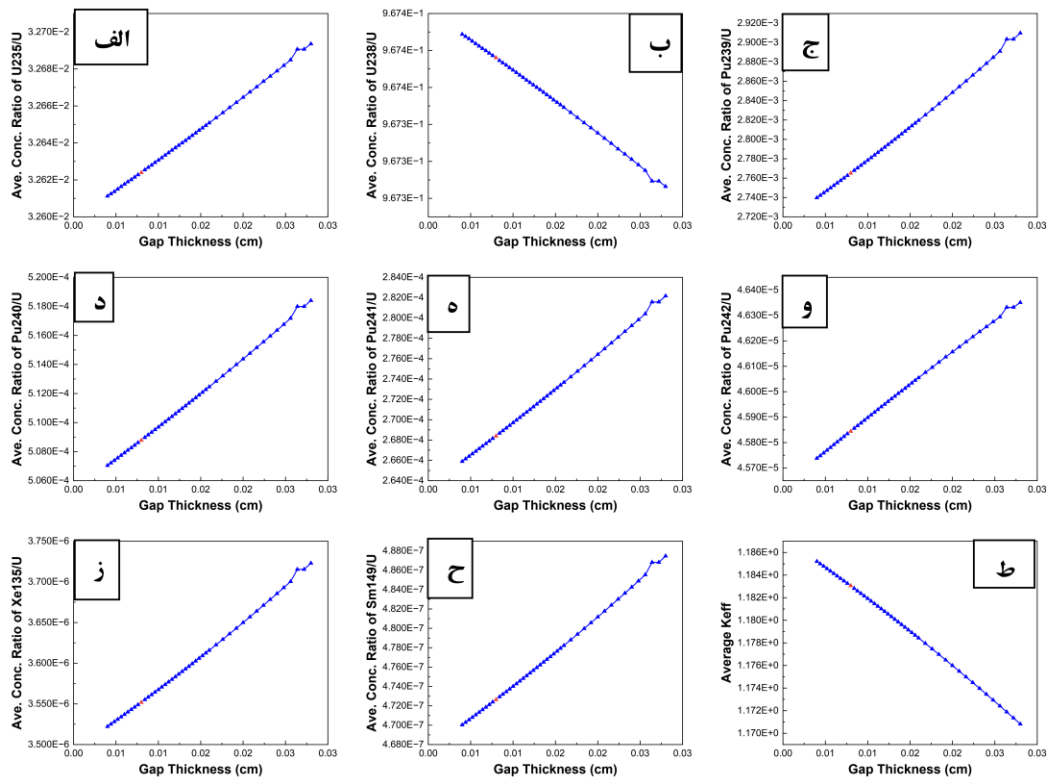
شکل (۳): تغییرات میانگین غلظت ایزوتوپ‌های مختلف، و ضریب تکثیر مؤثر بر حسب تغییرات قطر حفره مرکزی سوخت (الف) U۲۳۵ (ب) U۲۳۸

(ج) Pu۲۳۹ (د) Pu۲۴۰ (ه) Pu۲۴۱ (و) Pu۲۴۲ (ز) Xe۱۳۵ (ح) Sm۱۴۹ (ط) K_{eff} .



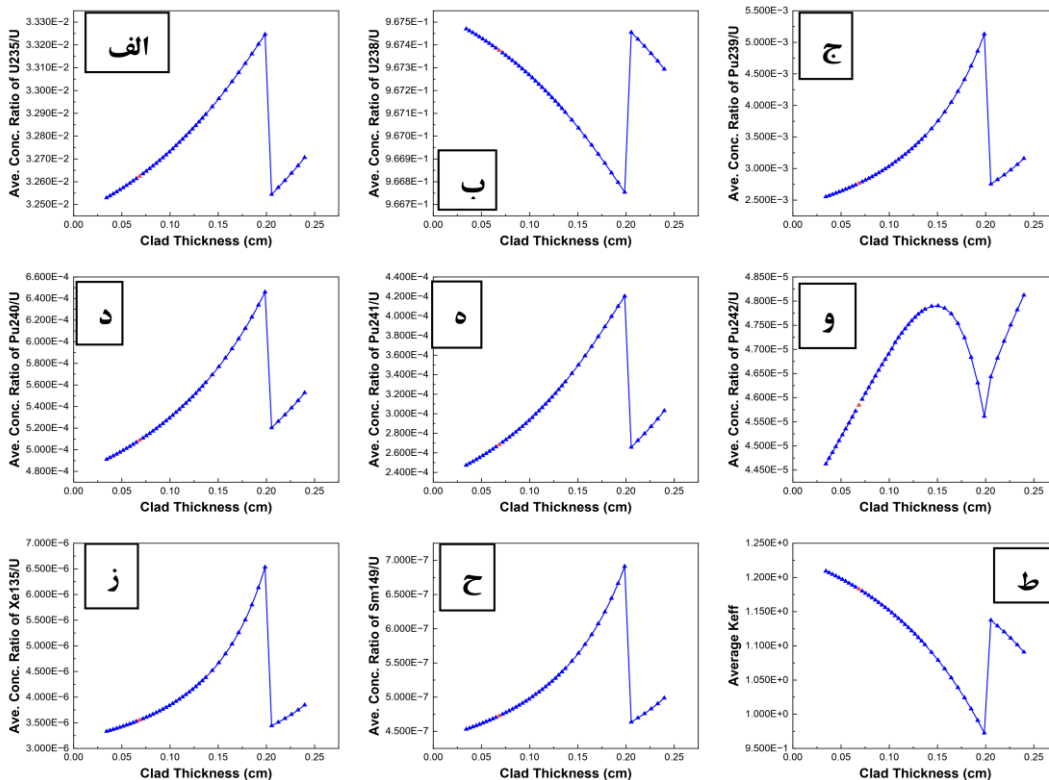
شکل (۴): تغییرات میانگین غلظت ایزوتوپ‌های مختلف، و ضریب تکثیر مؤثر بر حسب تغییرات ضخامت قرص سوخت (الف) U۲۳۵ (ب) U۲۳۸

(ج) Pu۲۳۹ (د) Pu۲۴۰ (ه) Pu۲۴۱ (و) Pu۲۴۲ (ز) Xe۱۳۵ (ح) Sm۱۴۹ (ط) K_{eff} .



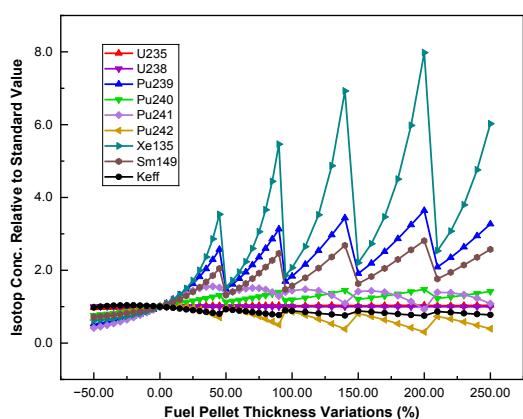
شکل (۵): تغییرات میانگین غلظت ایزوتوپ‌های مختلف، و ضریب تکثیر مؤثر بر حسب تغییرات ضخامت گپ میان غلاف و سوخت در یک میله

سوخت الف) U^{235} ب) U^{238} ج) Pu^{239} د) Pu^{240} ه) Pu^{241} و) Pu^{242} ز) Xe^{135} ح) Sm^{149} ط) K_{eff}

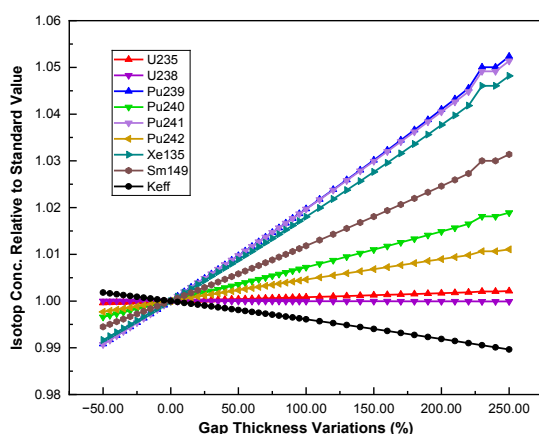


شکل (۶): تغییرات میانگین غلظت ایزوتوپ‌های مختلف و ضریب تکثیر مؤثر بر حسب تغییرات ضخامت غلاف میله سوخت الف) U^{235} ب) U^{238}

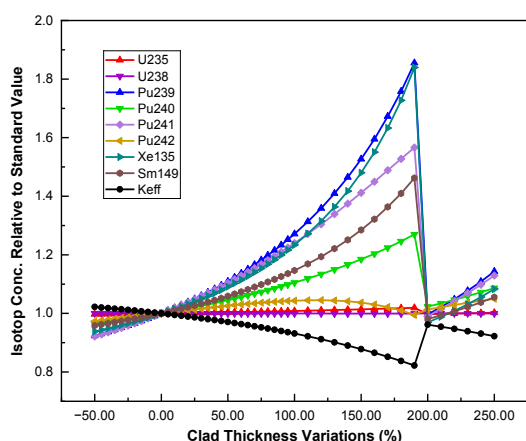
ج) Pu^{239} د) Pu^{240} ه) Pu^{241} و) Pu^{242} ز) Xe^{135} ح) Sm^{149} ط) K_{eff}



شکل (۸): نسبت تغییرات نوترونی و ایزوتوپی به حالت استاندارد در تغییرات ضخامت قرص سوخت.



شکل (۹): نسبت تغییرات نوترونی و ایزوتوپی به حالت استاندارد در تغییرات ضخامت گپ میان سوخت و غلاف در یک میله سوخت.



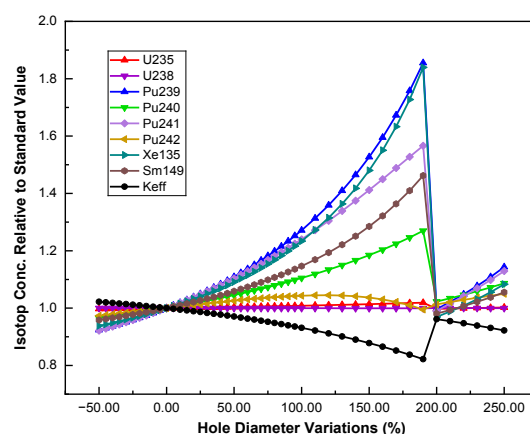
شکل (۱۰): نسبت تغییرات نوترونی و ایزوتوپی به حالت استاندارد در تغییرات ضخامت غلاف میله سوخت.

نقاط شکست مشاهده شده در نمودارها، نشان‌دهنده پیچیدگی فرآیندهای هسته‌ای درون راکتور و اهمیت در نظر گرفتن اثرات تشدید می‌مقاطع واکنش هسته‌ای در تحلیل‌های دقیق است. این یافته‌ها می‌تواند به مهندسان و طراحان راکتور کمک کند تا با درک بهتر از تأثیر پارامترهای هندسی بر عملکرد راکتور، طراحی‌های بهینه‌تری را ارائه دهند و از بروز شرایط نامطلوب در حین بهره‌برداری جلوگیری کنند. همچنین، این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای مطالعات آینده در زمینه بهینه‌سازی هندسی مجتمع‌های سوخت و بهبود عملکرد راکتورهای هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۴. تحلیل حساسیت پارامترهای نوترونی و ایزوتوپی

نسبت به تغییرات هندسی مجتمع سوخت

در بخش قبلی، تأثیر تغییرات هندسی مجتمع سوخت بر پارامترهای نوترونی و ایزوتوپی بررسی شد. در این بخش، به منظور ارزیابی دقیق‌تر حساسیت هر یک از پارامترها به تغییرات هندسی، نتایج شبیه‌سازی‌ها به صورت نموداری ارائه شده است.



شکل (۷): نسبت تغییرات نوترونی و ایزوتوپی به حالت استاندارد در تغییرات قطر حفره‌ی مرکز سوخت.

در شکل‌های ۷ تا ۱۰، تغییرات نسبی پارامترهای تغییرات غلظت ایزوتوپی و ضریب تکثیر مؤثر به ترتیب نسبت به تغییرات قطر حفره مرکزی، ضخامت سوخت، ضخامت گپ، و ضخامت غلاف نمایش داده شده است. در این نمودارها، محور افقی درصد تغییر هر پارامتر هندسی نسبت به حالت استاندارد و محور عمودی تغییرات نسبی پارامتر مورد نظر را نسبت به حالت استاندارد نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، هر شکل شامل ۹ نمودار است که به ترتیب تغییرات نسبی میانگین غلظت ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵، اورانیوم ۲۳۸، پلوتونیوم ۲۳۹ تا ۲۴۲، زینان ۱۳۵، ساماریوم ۱۴۹ و ضریب تکثیر مؤثر را نسبت به تغییرات پارامتر هندسی مربوطه نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ با جمع نقاط هر نمودار به نتایج مندرج در جدول ۲ می‌رسیم. در این جدول بیشترین تغییرات نسبت به حالت استاندارد به ترتیب مربوط به ضخامت قرص سوخت، قطر حفره مرکزی، ضخامت غلاف و در انتها ضخامت شکاف میان سوخت و غلاف، به‌ازای میزان تغییرات نسبی هندسی یکسان است. در جدول ۲، حساس‌ترین پارامترهای مورد بررسی نسبت به تغییرات هندسی به ترتیب مربوط به غلظت ایزوتوپ‌های ساماریوم ۱۴۹، پلوتونیوم ۲۳۹، زینان ۱۳۵، پلوتونیوم ۲۴۱، پلوتونیوم ۲۴۲، پلوتونیوم ۲۴۰، ضریب تکثیر مؤثر و ایزوتوپ‌های اورانیوم ۲۳۵ و اورانیوم ۲۳۸ است.

جدول (۲): مجموع تغییرات در پارامترهای ارزیابی شده نسبت به حالت استاندارد.

Hole		Fuel		Gap		Clad	
Sm۱۴۹	۲۴/۵۳۸۶	Sm۱۴۹	۷۹/۱۴۸۲	Sm۱۴۹	۰/۷۳۱۱	Sm۱۴۹	۷/۱۷۴۷
Pu۲۳۹	۲۰/۶۸۱۶	Pu۲۳۹	۴۶/۸۰۱	Pu۲۳۹	۰/۷۹۹۸	Pu۲۳۹	۸/۱۹۲۲
Pu۲۴۱	۱۳/۶۰۸۱	Pu۲۴۱	۱۵/۹۲۵۳	Pu۲۴۱	۰/۷۹۴۹	Pu۲۴۱	۶/۷۶۵۷
Xe۱۳۵	۱۳/۱۵۳	Xe۱۳۵	۳۱/۸۲۵	Xe۱۳۵	۰/۴۷۸۲	Xe۱۳۵	۴/۳۴۱۸
Pu۲۴۰	۵/۲۳۴۵	Pu۲۴۰	۹/۹۸۱۲	Pu۲۴۰	۰/۲۸۸۹	Pu۲۴۰	۳/۱۵۴۳
Keff	۳/۱۸۱۱	Keff	۵/۵۵۰۲	Keff	۰/۱۵۹۹	Keff	۲/۲۴۵۹
Pu۲۴۲	۲/۳۴۸۲	Pu۲۴۲	۱۱/۵۳۹۷	Pu۲۴۲	۰/۱۷۶۷	Pu۲۴۲	۱/۰۷۴۷
U۲۳۵	۰/۵۴۱۱	U۲۳۵	۰/۹۵۴	U۲۳۵	۰/۰۳۰۵	U۲۳۵	۰/۲۰۵۹
U۲۳۸	۰/۰۸۹۱	U۲۳۸	۰/۱۸۶	U۲۳۸	۰/۰۰۳۹	U۲۳۸	۰/۰۳۶

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

مطالعه حاضر با هدف بهینه‌سازی طراحی مجتمع سوخت راکتور VVER-۱۰۰۰ و بهبود عملکرد آن از دیدگاه نوترونی انجام شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که کاهش ضخامت قرص سوخت به میزان ۲۵ درصد می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود عملکرد سوخت در طی بهره‌برداری داشته باشد. با کاهش ضخامت قرص سوخت، به طور میانگین شاهد افزایش ضریب تکثیر مؤثر در طول سیکل کاری، کاهش غلظت سموم نوترونی

مانند ایزوتوپ‌های زینان ۱۳۵ و ساماریوم ۱۴۹ و کاهش تولید پسماندهای پلوتونیومی هستیم.

کاهش غلظت سموم نوترونی به معنای بهبود کنترل‌پذیری راکتور و کاهش نیاز به سیستم‌های کنترل پیچیده است که منجر به کاهش هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. همچنین، کاهش تولید پسماندهای پلوتونیومی به معنای کاهش هزینه‌های دفع پسماند هسته‌ای و کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی است.

بهره‌برداری سوخت را در طول زمان و در شرایط مختلف کاری با دقت بهتر پیش‌بینی کرد.

بررسی اقتصادی جامع: برای ارزیابی کامل مزایای کاهش ضخامت قرص سوخت، انجام یک تحلیل اقتصادی جامع شامل محاسبه هزینه‌های تولید سوخت، هزینه‌های دفع پسماند، هزینه‌های عملیاتی و سایر هزینه‌های مرتبط ضروری است.

توجه به محدودیت‌های ساخت: در طراحی مجدد مجتمع‌های سوخت، محدودیت‌های ساخت و تولید و همچنین الزامات ایمنی باید به دقت در نظر گرفته شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که کاهش ضخامت قرص سوخت می‌تواند به عنوان یک راهکار مؤثر برای بهبود عملکرد راکتورهای VVER-۱۰۰۰ مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، برای اتخاذ تصمیم نهایی در مورد اعمال این تغییرات در طراحی راکتور، انجام مطالعات بیشتر و جامع‌تر ضروری است.

برای ادامه کار در این زمینه پیشنهاد می‌شود موارد زیر نیز مورد بررسی قرار گیرد:

شبیه‌سازی‌های ترمومکانیکی و ترموهیدرولیکی: با انجام این شبیه‌سازی‌ها در کنار شبیه سازی نوترونی، می‌توان تغییرات در

۶. مراجع

1. M. Mathew. Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Prog. Nucl. Energy* 143 (2022) 104080.
2. K. Laha, S. Saroja, A. Moitra, R. Sandhya, T. Jayakumar, E. Kumar. Development of India-specific RAFM steel through optimization of tungsten and tantalum contents for better combination of impact, tensile, low cycle fatigue and creep properties. *J. Nucl. Mater.* 439(1-3) (2013) p. 41-50.
3. Z. Li, J. Wang, M. Ding. A review on optimization methods for nuclear reactor fuel reloading analysis. *Nucl. Eng. Design* 397 (2022) 111950.
4. M. Aghaie, S. Mahmoudi. A novel multi objective Loading Pattern Optimization by Gravitational Search Algorithm (GSA) for WWER1000 core. *Prog. Nucl. Energy* 93 (2016) p. 1-11.
5. S. P. Martinson, S. S. Chirayath. Monte Carlo neutronics benchmarks on nuclear fuel depletion: A review. *Ann. Nucl. Energy* 161 (2021) 108441.
6. S. S. Chirayath, C. R. Schafer, G. R. Long. A new methodology to estimate stochastic uncertainty of MCNP-predicted isotope concentrations in nuclear fuel burnup simulations. *Ann. Nucl. Energy* 151 (2021) 107911.
7. A. E. Isotalo, P. Aarnio. Higher order methods for burnup calculations with Bateman solutions. *Ann. Nucl. Energy* 38 (9) (2011) 1987-1995.
8. A. E. Isotalo, P. Aarnio. Comparison of depletion algorithms for large systems of nuclides. *Ann. Nucl. Energy* 38 (2-3) (2011) 261-268.
9. G. Marleau, A. Hébert, R. Roy. A user guide for DRAGON Version 4. Institute of Genius Nuclear, Department of Genius Mechanical, School Polytechnic of Montreal, 2011.
10. A. Hébert. Application of Tone's and embedded self-shielding methods to pressurized water reactor assemblies. *Ann. Nucl. Energy* 112 (2018) 439-449.
11. S. M. Motevalli, A. Payani, O. Halalkhor. Effect of Geometric Changes in of WWER-1000 Reactor's Fuel Assemblies on their Fuel Burnup Parameter. *Iranian J. Appl. Phys.* 9 (2) (2019) 65-73.
12. A. C. Kaplan-Trahan, A. P. Belian, M. Croce, D. C. Henzlova, P. Jansson, G. Long, G. E. McMath, J. R. Phillips, E. Rapisarda, M. A. Root. Spent Fuel Measurements, in Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security. *Springer* (2024) 605-637.
13. M. Ghasabian, S. Talebi, O. Safarzadeh. Application of metaheuristics optimization in fuel rod design: A case study for helium charging pressure. *Prog. Nucl. Energy* 142 (2021) 103982.
14. C. S. Brown, H. Zhang, V. Kucukboyaci, Y. Sung. Best estimate plus uncertainty analysis of departure from nucleate boiling limiting case with CASL core simulator VERA-CS in response to PWR main steam line break event. *Nucl. Eng. Design* 309 (2016) 8-22.
15. R. N. Hwang, R. Blomquist, L. Leal, W. Yang. Neutron Resonance Theory for Nuclear Reactor Applications: Modern Theory and Practices. Argonne

- National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 2016.
- 16.M. L. Williams. Resonance self-shielding Using deterministic transport methods with pointwise cross sections (Invited)-Eugene P. Wigner reactor physics award. *Trans. Amer. Nucl. Soc.* (2016) 115.
 - 17.Y. Ahmed, G. I. Balogun, S. A. Jonah, I. I. Funtua. The behavior of reactor power and flux resulting from changes in core-coolant temperature for a miniature neutron source reactor. *Ann. Nucl. Energy* 35 (12) (2008) 2417-2419.
 - 18.G. Balogun. Automating some analysis and design calculations of miniature neutron source reactors at CERT (I). *Ann. Nucl. Energy* 30 (1) (2003) 81-92.
 - 19.R. Kianpour, G. Ansarifard, M. Fathi. Optimal design of a VVER-1000 nuclear reactor core with dual cooled annular fuel based on the reactivity temperature coefficients using thermal hydraulic and neutronic analysis by implementing the genetic algorithms. *Ann. Nucl. Energy* 148 (2020) 107682.
 - 20.N.Martin, G. Youinou. Evaluation of the spatial self-shielding impact for TRISO-based nuclear fuel depletion. *Nucl. Eng. Design* 416 (2024) 112749.
 - 21.F. Xia, H. Wu, Y. Li, J. Yang. Resonance Self-Shielding Calculation for Plate-Type Fuel Assemblies. in EPJ Web of Conferences. 247 (4) (2021) 03007.