



بررسی حادثه تزریق راکتیویته در راکتور زیربحرانی آب سبک طراحی شده با استفاده از

مجتمع های سوخت میله ای ساخته شده در ایران

سارا، کمال پور^{۱*}؛ حسین، خلفی^۲؛ سید محمد، میروکیلی^۲

۱. دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته ای

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشگاه راکتور

چکیده

راکتورهای زیربحرانی بدلیل ایمنی ذاتی بالا و وسایل بسیار مناسبی برای آشنایی دانشجویان با مفاهیم و پارامترهای فیزیک راکتور می باشند. در این مقاله به بررسی ایمنی راکتور زیربحرانی طراحی شده با استفاده از مجتمع های سوخت ساخته شده در کشور در صورت تزریق راکتیویته پرداخته شده است. به این منظور دو کانال دغ و متوسط انتخاب شده و با استفاده از کد PARET، رفتار راکتور در شرایط حادثه مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی تغییرات راکتیویته، قدرت، دمای سوخت، غلاف و خنک کننده نشان می دهند که در صورت تزریق راکتیویته مثبت تا حدود ۱/۴ در ۵٪، راکتور به مقابله با راکتیویته وارد شده پرداخته و در شرایط کاملاً ایمن خواهد بود.

کلیدواژه: تزریق راکتیویته، کد PARET، راکتور زیربحرانی، دمای سوخت

مقدمه

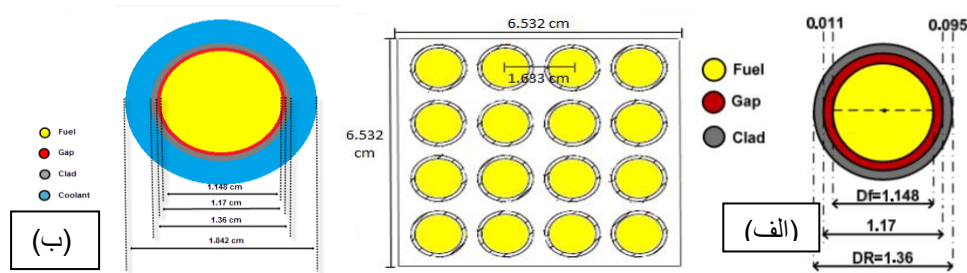
راکتورهای زیربحرانی، راکتورهایی کاملاً آموزشی و تحقیقاتی هستند. ایمنی ذاتی بالا، کم حجم بودن و تأسیسات جانبی کم مورد نیاز، ساخت این راکتورها را در موسسات دانشگاهی و پژوهشی امکان پذیر ساخته و به تحقق دانش هسته ای در ایران کمک زیادی خواهد کرد. با توجه به مزیت های ذکر شده در مورد این نوع از راکتورها، یک راکتور زیربحرانی با استفاده از مجتمع های سوخت قابل ساخت در کشور طراحی گردیده است. هدف از این مقاله بررسی رفتار ترموهیدرولیکی راکتور طراحی شده در شرایط حادثه تزریق راکتیویته مثبت می باشد.

روش کار

PARET یک کد نوترونیک - ترموهیدرولیک می باشد که برای تخمین حوادث تزریق راکتیویته غیر مخرب در قلب راکتورهای تحقیقاتی استفاده می شود و در شرایط مخرب و یا زمانی که تغییرات فضایی - زمانی در شار نوترون وجود دارد، قابل استفاده نیست. نشان داده شده که PARET پیش بینی های دقیقی در زمینه قدرت قلب راکتورهای تحقیقاتی، ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و خنک کننده دارد. هرچند محدود به یک میله سوخت و کانال می باشد. [۱]

قلب راکتور از مجتمع های سوخت مربعی که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده و به صورت ۹×۹ چیده شده، تشکیل شده است. محاسبات برای دو سوخت U با غلاف Al و UO₂ با غلاف ۱٪ Zr-Nb با غنای

طبیعی انجام شده است. آب سبک به عنوان خنک کننده و بازتابنده استفاده شده است. بعلاوه جهت بازگشت نوترون ها به راکتور و حفظ اقتصاد نوترونی از بازتابند بریلیم در اطراف قلب استفاده شده است. از آنجا که مجموعه زیربحرانی برای فعالیت نیاز به یک چشمه نوترونی خارجی دارد، از چشمه Am-Be با اکتیویته Ci ۵ استفاده شده است. پارامترهای بدست آمده از طراحی نوترونیک مجموعه زیربحرانی در جدول ۱ گردآوری شده است.



شکل ۱: (الف): مدل میله و مجتمع سوخت راکتور زیربحرانی طراحی شده در کد MCNPX و (ب): ابعاد کانال در نظر گرفته شده در کد PARET

جدول ۱: پارامترهای اصلی بدست آمده از طراحی نوترونیک مجموعه زیربحرانی بوسیله کد MCNPX

پارامتر	راکتور با سوخت U	راکتور با سوخت UO ₂
ضریب تکثیر	۰/۸۳۰۳۹ ± ۰/۰۰۰۴۹	۰/۷۹۰۴۹ ± ۰/۰۰۰۴۸
شار جرمی کانال خنک کننده (kg/s.m ^۲)	۰/۰۹۹۷۰ (گردش طبیعی)	۰/۰۹۹۷۰ (گردش طبیعی)
کسر نوترون های تأخیری	۰/۰۰۶۹۰	۰/۰۰۶۳۰
مدت زمان تولید نوترون های آنی (S)	۱/۶۳۴۶۹E-۰۴	۲/۴۱۸۸۰E-۰۴
ضریب راکتیویته دمایی سوخت (β/°C)	-۰/۰۰۷۶	-۰/۰۳۴۱۲
ضریب راکتیویته دمایی کندکننده (β/°C)	-۰/۰۲۶۲	-۰/۰۱۴۰۴
ضریب خلا (β/%)	۴۴/۴	۳۶/۷

مدل ورودی PARET برای راکتور زیربحرانی مورد نظر امکان شبیه سازی نوترونیک و ترموهیدرولیک قلب راکتور را در حالت تزریق راکتیویته فراهم می کند. هدف از شبیه سازی این حادثه، تأیید خود حفاظی راکتور زیربحرانی طراحی شده در صورت ورود راکتیویته به آن می باشد.

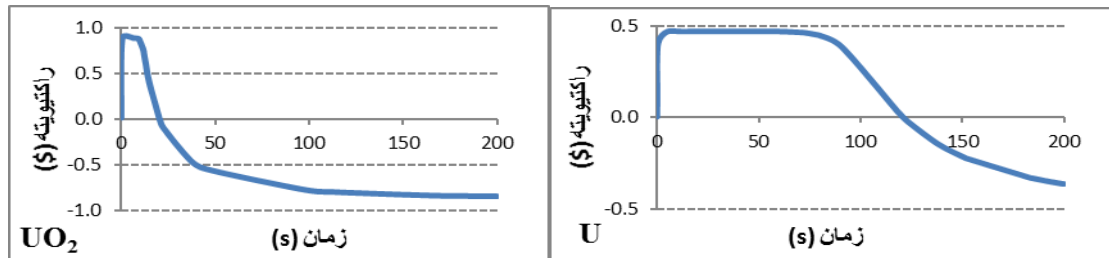
برای این راکتور دو کانال داغ و متوسط انتخاب شده است که کانال داغ شامل داغ ترین میله سوخت یعنی میله ای که بیشترین فاکتور پیک قدرت را دارد و شعاعی از آب اطراف آن به عنوان خنک کننده می باشد. برای کانال متوسط نیز یکی از میله های سوخت با فاکتور پیک قدرت متوسط به همراه شعاعی از آب مشابه با کانال داغ به عنوان خنک کننده انتخاب شده که نمایانگر رفتار متوسط قلب خواهد بود. هر یک از کانال ها به ۲۰ قسمت محوری و هر قسمت محوری به ۸ قسمت شعاعی تقسیم بندی شده است. در شکل ۱ (ب) ابعاد کانال شامل میله سوخت و خنک کننده اطراف آن نشان داده شده است. لازم به ذکر است که دمای ورودی خنک کننده ۲۰ °C و در فشار ۱E۰۵Pa در نظر گرفته شده است.



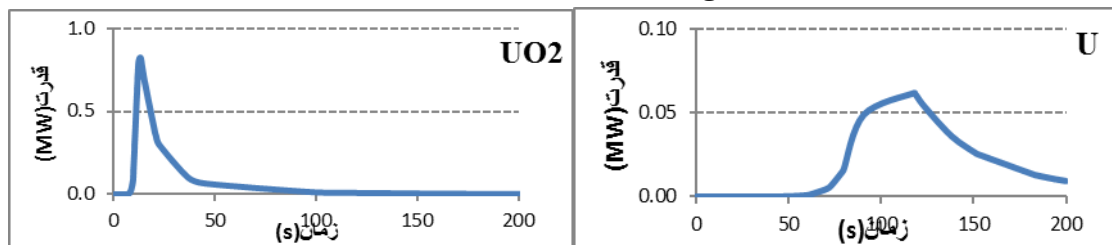
با توجه به این که برای راکتور زیربحرانی طراحی شده، میله کنترلی در نظر گرفته نشده و با در نظر گرفتن شرایط حادثه، رفتار راکتور تنها با توجه به فیدبک ناشی از ضرایب راکتیویته بررسی شده است. در واقع با در نظر گرفتن اثر فیدبک در طی حادثه، می توان ایمنی ذاتی راکتور را نیز مورد بررسی قرار داد. حادثه مدل شده برای قلب راکتور زیربحرانی مورد نظر، وارد شدن راکتیویته به راکتور در اثر سقوط یک بسته سوخت به قلب می باشد. به این منظور راکتیویته ناشی از یک بسته سوخت برای هر دو قلب با سوخت U و سوخت UO_2 که با استفاده از کد $MCNPX$ محاسبه شده در طی زمان لازم برای سقوط بسته سوخت به داخل راکتور تزریق شده است. سپس به بررسی تغییرات قدرت، راکتیویته، دمای سوخت، غلاف و کند کننده برای هر دو قلب برای دو کانال داغ و متوسط پرداخته شده است. ذوب غلاف یکی از نگرانی های اصلی پارامترهای ایمنی در همه راکتورهای تحقیقاتی می باشد و می تواند موجب نشت محصولات شکافت به محیط زیست شود. تزریق یک راکتیویته بزرگ می تواند چنین حادثه ای را ایجاد کند. [۲] بنابراین رفتار راکتور در طی افزایش تدریجی تزریق راکتیویته نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج

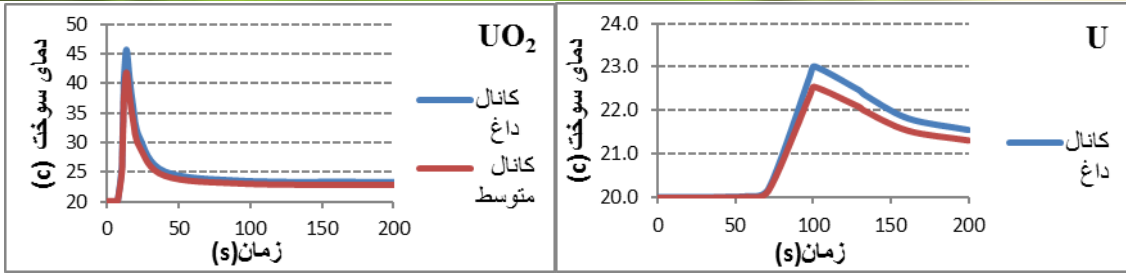
برای راکتور با سوخت U ، حادثه تزریق راکتیویته $\$ 0.47$ در مدت زمان $S 0.26$ معادل با راکتیویته یک مجتمع سوخت در زمان لازم برای سقوط به قلب مدل شده است. این مقدار برای راکتور با سوخت UO_2 ، حادثه تزریق راکتیویته $\$ 0.883$ در مدت زمان $S 0.26$ می باشد.



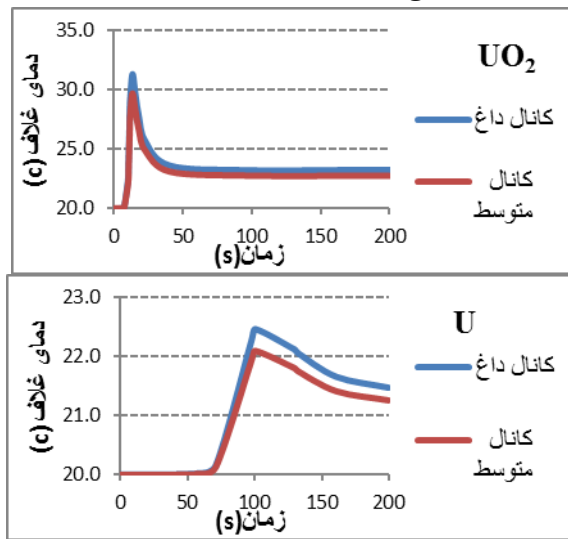
شکل ۲: نمودار تغییرات راکتیویته تابع زمان در اثر سقوط یک بسته سوخت به راکتور با سوخت U و UO_2



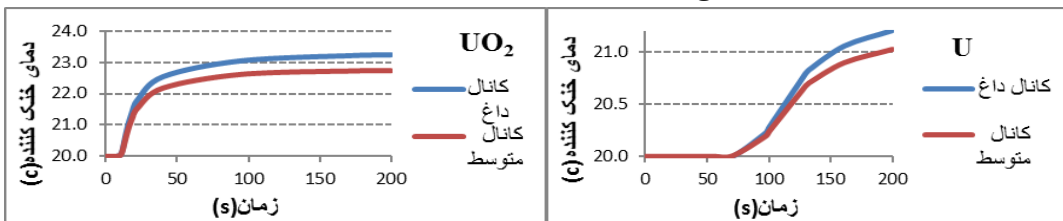
شکل ۳: نمودار تغییرات قدرت تابع زمان در اثر سقوط یک بسته سوخت به راکتور با سوخت U و UO_2



شکل ۴: نمودار تغییرات دمای سوخت تابع زمان در اثر سقوط یک بسته سوخت به راکتور با سوخت UO_2 و U



شکل ۵: نمودار تغییرات دمای غلاف تابع زمان در اثر سقوط یک بسته سوخت به راکتور با سوخت UO_2 و U



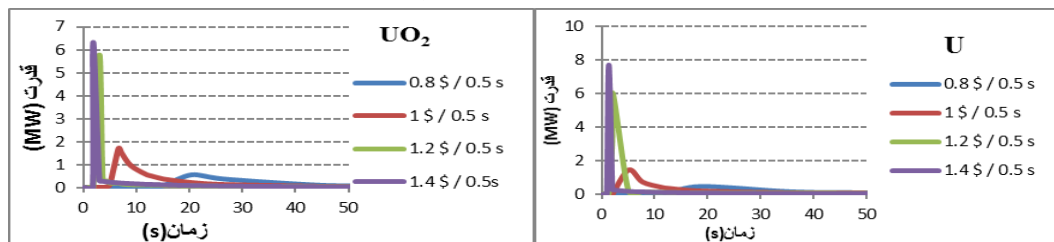
شکل ۶: نمودار تغییرات دمای خنک کننده تابع زمان در اثر سقوط یک بسته سوخت به راکتور با سوخت UO_2 و U

رفتار راکتیویته سیستم در شکل ۲ برای راکتور با سوخت های UO_2 و U نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، ابتدا راکتیویته به صورت خطی از صفر تا مقدار ماکزیمم راکتیویته تزریق شده افزایش می یابد و برای مدت زمانی ثابت باقی مانده و سپس با توجه به ضرایب راکتیویته دمایی شروع به کاهش می کند. با تزریق راکتیویته، قدرت به صورت غیرخطی افزایش می یابد که پس از آن با توجه به ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده، شاهد کاهش قدرت می باشیم. با توجه به افزایش و کاهش قدرت به دلایل ذکر شده، یک پیک در پروفایل قدرت ایجاد می شود که در شکل ۳ مشاهده می شود. پیک قدرت به ازای تزریق راکتیویته به مقدار 0.47% در مدت زمان 0.26 s برای راکتور با سوخت U برابر با 63 KWt و به ازای تزریق راکتیویته به مقدار 0.883% در مدت زمان 0.26 s برای راکتور با سوخت UO_2 برابر با 830 KWt می باشد.

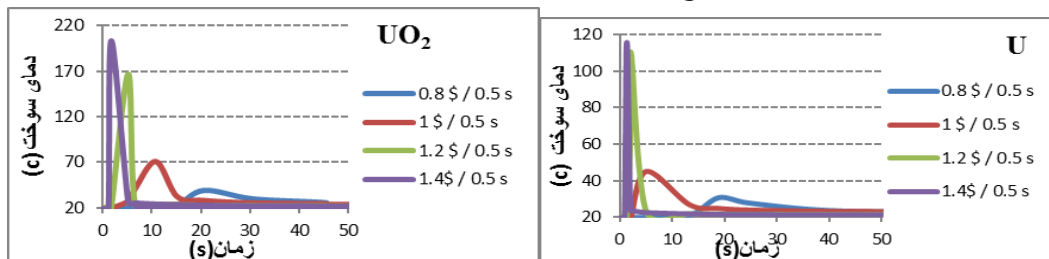


روشن است که افزایش قدرت باعث تغییر در دمای سوخت، غلاف و خنک کننده می شود که در شکل های ۴ تا ۶ برای راکتور با سوخت U و سوخت UO_2 نشان داده شده است. در واقع همین تغییر دما، منجر به کاهش راکتیویته در اثر تولید فیدبک منفی خواهد شد. چرا که افزایش ناگهانی دمای سوخت باعث ایجاد اثر دوپلر شده و با کاهش راکتیویته، قدرت را کاهش می دهد. همان طور که انتظار می رود میله ای که بیشترین فاکتور پیک قدرت را دارد (میله داغ)، دمای بالاتری نسبت به سایر میله های سوخت خواهد داشت. بنابراین در طی تزریق راکتیویته، کانال داغ به عنوان معیار ایمنی در نظر گرفته شده و محدودیت های ناشی از ذوب غلاف و ... بر این اساس اعمال می شوند.

برای سوخت U و UO_2 تزریق راکتیویته از $0.8 \$$ تا $1.4 \$$ در $0.5 s$ افزایش یافته و دمای سوخت، غلاف، خنک کننده و تغییرات قدرت برای کانال داغ که بیشترین اهمیت را دارد، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که با افزایش مقدار راکتیویته برای هر دو سوخت، ماکزیمم قدرت افزایش پیدا می کند. دمای سوخت نیز با افزایش مقدار راکتیویته افزایش می یابد اما افزایش راکتیویته تأثیر چندانی بر روی دمای خنک کننده ندارد. شکل های ۷ و ۸ نتایج افزایش راکتیویته بر روی قدرت و دمای سوخت را برای هر دو سوخت U و UO_2 نشان می دهند. همان طور که دیده می شود با افزایش مقدار راکتیویته در شرایط یکسان، راکتور در مدت زمان کمتری به مقدار ماکزیمم قدرت، دمای سوخت و غلاف می رسد. فیدبک های ناشی از افزایش دما نیز با شدت بیشتری به مقابله با راکتیویته مثبت وارد شده پرداخته و قدرت و دمای سوخت با سرعت و شیب بیشتری کاهش می یابند. به طوری که در تزریق راکتیویته $0.8 \$$ در $0.5 s$ دمای سوخت U در زمان ۱۹s به ماکزیمم مقدار خود یعنی $31^\circ C$ و دمای سوخت UO_2 در زمان ۲۱s به ماکزیمم مقدار خود یعنی $39^\circ C$ می رسد. حال آنکه در تزریق راکتیویته $1.4 \$$ در $0.5 s$ دمای سوخت U در زمان ۱۳.۶s به ماکزیمم مقدار خود یعنی $116^\circ C$ و دمای سوخت UO_2 در زمان ۱۷.۹s به ماکزیمم مقدار خود یعنی $203^\circ C$ می رسد.



شکل ۷: تغییرات قدرت کانال داغ با افزایش مقدار راکتیویته تزریقی برای راکتور با سوخت U و UO_2



شکل ۸: تغییرات دمای سوخت در کانال داغ با افزایش مقدار راکتیویته تزریقی برای راکتور با سوخت U و UO_2



بحث و نتیجه گیری

یکی از مهم ترین ویژگی های راکتورهای زیربحرانی ایمن بودن آنها است. از آنجا که در راکتورهای زیربحرانی $k_{eff} < 1$ می باشد، این راکتورها بحرانی نمی شوند و بنابراین حادثه ای نخواهیم داشت. برای مجموعه زیربحرانی طراحی شده، سیستم کنترلی در نظر گرفته نشده و بنابراین در صورت حادثه راکتور باید با توجه به فیدبک های دمایی، از خود حفاظت کند. نتایج نشان می دهند که در طی تزریق راکتیویته قدرت افزایش می یابد اما با توجه به ضرایب راکتیویته دمایی منفی سوخت و کندکننده و همین طور کار در ناحیه under-moderated، قدرت کاهش می یابد و راکتور طراحی شده ذاتاً ایمن است.

مراجع

1. Fergany M. Badri, Mohamed A. Gaheen., Using PARET Code for Analyzing Research Reactor Cores with Two Fuel Geometries. RERTR 2012-34th Meeting on REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS. 2012.
2. Rubina Nasir, Sikander M. Mirza, Nasir M. Mirza., 2013. Study of successive ramp reactivity insertion in typical pool-type research reactors. Progress in Nuclear Energy 66 (2013) 115-123.