

## بررسی عملکرد نوترونیک چند جاذب سوختنی شناخته شده در مجتمع‌های سوخت راکتور بوشهر

زهرا پاپی<sup>۱</sup>، فرخ خوش احوال<sup>۲\*</sup>، رضا پورایمانی<sup>۱</sup>، یاسر کاسه ساز<sup>۲</sup>

۱. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه اراک، ۳۸۴۸۱۷۷۵۸۴، اراک - ایران

۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۱۵۵۱۳۳۹، تهران - ایران

### چکیده:

در دهه اخیر افزایش طول سیکل برای راکتورهای آب سبک از جمله راکتور WWER-1000 به منظور کاهش میزان هزینه تولید برق، توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌است. هدف، کاهش هزینه‌های مربوط به تجدید سوخت هسته‌ای در طول یک دوره کارکرد و به تبع آن بهبود هزینه‌های مربوط به تولید سوخت می‌باشد. به علت کمبود نسبی منابع اورانیوم در ایران و همچنین به کارگیری سوخت جدید در راکتور قدرت بوشهر، به نظر میرسد استفاده از جاذب‌های سوختنی یکپارچه (IBA)، در جهت اهداف ذکر شده‌است. در این پژوهش، پس از شبیه‌سازی سه‌بعدی نوترونیک توسط کد MCNPX2.6 پارامترهای نوترونیک شامل محاسبات برناب، نوسان راکتیویته و توزیع توان جاذب‌های سوختنی یکپارچه شامل  $Gd_2O_3-UO_2$ ،  $Er_2O_3-UO_2$  و  $Dy_2O_3-UO_2$  مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج با جاذب فعلی ( $CrB_2Al$ ) در راکتور بوشهر مقایسه گردید. مشاهده می‌شود که جاذب سوختنی اربیوم کمترین اثر ( $3465\text{ pcm}$ ) و جاذب سوختنی گادولونیوم بیشترین اثر را ( $10893\text{ pcm}$ ) روی مقادیر راکتیویته اولیه دارند. همچنین جاذب سوختنی گادولونیوم با کمترین نوسان راکتیویته ( $0.277\text{ } \Delta K$ ) و افزایش طول سیکل به میزان  $1.01\text{ GWd/MTU}$  گزینه مطلوبتری به نظر میرسد.

**کلیدواژه‌ها:** راکتور بوشهر، فرسایش سوخت، توزیع توان، طول سیکل

## Analysis of neutronic performance of some well-known burnable absorbers in Bushehr fuel assemblies

Zahra Papi<sup>1</sup>, Farrokh Khoshahval<sup>2,\*</sup>, Reza Pour-Imani<sup>1</sup>, Yaser Kasesaz<sup>2</sup>

1. Department of Physics, Faculty of Science, Arak university, 3848177584, Arak, Iran

2. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), 141551339, Tehran, Iran

### Abstract

Nowadays, reducing fuel consumption and fuel cost is obtained by increasing the reactor cycle length as essential goals in light water reactors (WWER-1000). Due to the scarcity of uranium resources in Iran, the use of Integral Burnable Absorbers (IBAs) in Bushehr WWER-1000 reactor is in line with the intended goal. In this paper, after a 3D simulation of the reactor core, using MCNPX2.6 code, the neutronic evaluation including, burnup changes, reactivity swing, and power distribution in  $Gd_2O_3-UO_2$ ,  $Er_2O_3-UO_2$ , and  $Dy_2O_3-UO_2$  was performed and compared them with the current burnable absorber ( $CrB_2Al$ ). It is observed that erbium has the lowest effect ( $3465\text{ pcm}$ ) and gadolinium has the most effect ( $10893\text{ pcm}$ ) on the initial values of the reactivity. Gadolinium, has the lowest reactivity swing ( $0.277\text{ } \Delta K$ ) and increases the cycle length value about  $1.01\text{ GWd/MTU}$ .

**Keywords:** Bushehr reactor, Burnup, Power distribution, Cycle length

Email: fkhoshahval@aeoi.org.ir

## ۱. مقدمه

در دهه اخیر افزایش طول سیکل برای راکتورهای آب سبک سوخت‌گذاری شده با اکسید اورانیوم از جمله راکتور WWER-1000 به منظور کاهش میزان هزینه تولید برق، مخصوصاً در کشورهایی که توان نیروگاهی کمتری دارند توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌است. برای این کشورها افزایش سوختگی سوخت و طول سیکل راکتور از اهداف مهم است. در زمان فعالیت راکتور میزان سوخت در قلب راکتور دائماً در حال کاهش است. اگر راکتور برای مدت طولانی در حال کار باشد به سوخت بیشتری مازاد بر آنچه برای بحرانی شدن دقیق راکتور به کار میرود نیاز دارد. راکتیویته مثبت ناشی از سوخته‌های اضافی باید از طریق راکتیویته منفی ناشی از مواد جاذب نوترونی متعادل شود. میله‌های کنترل با قابلیت جابجایی که حاوی مواد جاذب نوترون هستند یکی از روشهای متوازن کردن سوخته‌های اضافه است. استفاده از میله‌های کنترل برای کنترل راکتیویته به تنهایی خیلی مطلوب نیست. تغییرات میزان ایمنی قلب در صورت کنترل همگی راکتیویته اضافی موجود با میله کنترل و همچنین انحراف شار محوری در قلب ناشی از ورود میله کنترل، دلایل استفاده کمتر از میله‌های کنترل هستند [۱]. در راکتورهای PWR استفاده از جاذبه‌های محلول در خنک‌کننده/کندکننده مرسوم است و می‌توان با آن راکتیویته اضافی را جبران کرد. در یک حدی از غلظت اسید، ضریب دمایی کندکننده راکتور مثبت می‌شود. برای جلوگیری از چنین وضعیتی غیر قابل قبولی، جاذبه‌های سوختنی در نظر گرفته شدند. با کاهش راکتیویته مازاد قلب توسط جاذب سوختنی، محتوای بورون کاهش یافته و از ضریب دمایی مثبت کندکننده جلوگیری به عمل می‌آید. جاذبه‌های سوختنی موادی با سطح مقطع جذب نوترون بالا هستند که در اثر جذب نوترون به موادی با سطح مقطع جذب پایین تبدیل میشوند و برای جبران راکتیویته مثبت ناشی از سوخته‌های تازه به کار میروند [۲]. استفاده از جاذبه‌های سوختنی باعث کاهش راکتیویته اضافی قلب راکتور میشود. دو نوع جاذب سوختنی در راکتورهای آب سبک استفاده میشود. اولین نوع، جاذب سوختنی یکپارچه (IBA) است که در این نوع، جاذب سوختنی به شکل ترکیب با سوخت است. این نوع جاذبه‌ها برداشتنی نیستند و مواد جاذب نوترون به عنوان اجزای مجتمع سوخت میباشند. دومین نوع جاذبه‌ها، میله سم سوختنی است (BPR) که به شکل مستقل از سوخت مورد استفاده قرار میگیرند. در زمینه جاذبه‌های نوترونی مطالعات مختلفی در سرتاسر دنیا انجام شده است که میتوان از آن جمله به موارد زیر اشاره کرد: به کارگیری و استفاده از سوخت گادولونیوم در فرانسه، ژاپن، کره و بلژیک [۲]. بررسی در مورد انواع جاذبه‌های نوترونی و تاثیرات آنها بر روی طراحی نوترونیک، در سال ۲۰۱۶ تا ۲۰۱۹ در مصر انجام گرفت [۳]. در ایران نیز پروژه‌ای به طور محدود به بررسی اثر میله‌های جاذب گادولونیوم بر روی عملکرد نوترونیک مجتمع سوخت (FA-24B20) راکتور بوشهر پرداخته است [۴]. در این بررسی از جاذب سوختنی گادولونیوم به صورت BPR در راکتور استفاده شده است.

## ۲. روش کار

در این تحقیق، محاسبات نوترونیک در فاز سلولی با استفاده از کد MCNPX انجام گرفته‌است. در این پژوهش، بعد از انجام شبیه‌سازی سه بعدی انواع مجتمع‌های سوختی راکتور بوشهر، به ارزیابی نوترونیک انواع جاذبه‌های سوختنی پرداخته شد. این ارزیابی شامل تغییرات ضریب تکثیر بینهایت (K-inf) نسبت به فرسایش سوخت، نوسان راکتیویته و بررسی توزیع توان در انواع مجتمع و میله‌های سوخت حاوی جاذبه‌های سوختنی  $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ ،  $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$  و  $\text{Dy}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$  است. نتایج با جاذب فعلی مورد مقایسه قرار گرفت. پس از انتخاب جاذب مناسب، امکان تغییر در مکان، تعداد و تغییر غلظت جاذبه‌ها مورد تحلیل دوباره قرار گرفت. محاسبات با شرط مرزی بازتابنده انجام گرفته‌است. در شرایط بازتابنده، آهنگ نشت نوترون صفر است و در نتیجه مقدار ضریب تکثیر بینهایت و مقدار ضریب تکثیر موثر با هم برابر است. در جدول ۱ مقادیر ضریب تکثیر بینهایت برای انواع مجتمع‌های بدون جاذب و با وجود جاذب فعلی محاسبه شده‌است. مجتمع‌های سوختی راکتور بوشهر در سیکل اول دارای ۶ نوع سوخت با غناها و غلظتهای متفاوت از جاذب سوختنی  $\text{CrB}_2\text{Al}$  هستند. مجتمع‌های سوختی با اسامی FA-16، FA-24، FA-36 و FA-36 که به ترتیب حاوی میله‌های سوختی با ۲/۴، ۱/۶ و ۳/۶ درصد غنای اورانیوم و همچنین مجتمع‌های سوختی از نوع FA-24B20، FA-24B36 و FA-36B36 که به ترتیب حاوی میله‌های سوخت با غنای اورانیوم ۲/۴، ۲/۴ و ۳/۶ درصد و دارای ۱۸ عدد میله جاذب با غلظتهای ۰/۲۰ و ۰/۳۶ گرم

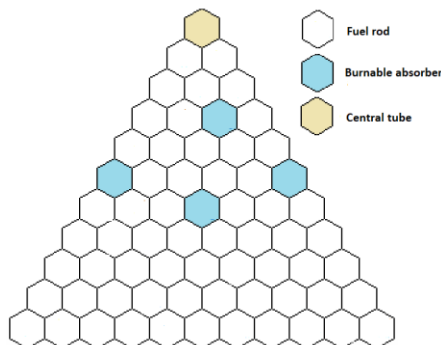
بر سانتی‌متر مکعب جاذب هستند. لازم به ذکر است که بررسیها در شرایط حداکثر توان (HFP) راکتور انجام گرفته‌است. با توجه به اینکه توان حرارتی راکتور ۳۰۰۰ مگاوات حرارتی است توان تولیدی هر مجتمع در محاسبات برناپ به طور میانگین ۱۸/۴ مگاوات حرارتی در نظر گرفته شده‌است. محاسبات ضریب تکثیر با استفاده از دستور KCODE، با تعداد ۴۰۰ سیکل فعال و ۵۰۰۰۰ ذره (نوترون) در هر سیکل انجام گرفته‌است. در جدول ۱ نتایج این محاسبات و مقایسه نتایج با کدهای PARCS و WIMS نشان داده شده‌است. جدول ۱ نشان میدهد که توافق نسبتاً خوبی بین نتایج خروجی کد MCNPX2.6 و نتایج حاصله از کد PARC و WIMS موجود در مرجع ۵ دیده میشود.

جدول ۱. مقایسه مقادیر ضریب تکثیر بینهایت انواع مجتمعهای سوختی راکتور بوشهر در سه کد مختلف

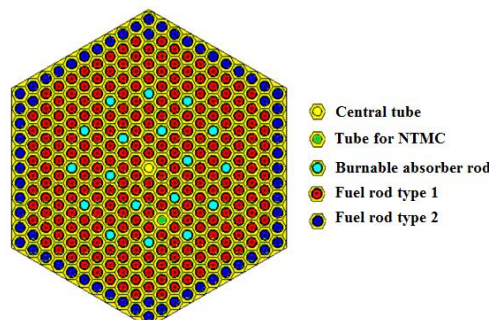
| نوع مجتمع | K-inf<br>MCNPX  | K-inf<br>PARCS [Δ] | K-inf<br>WIMS [Δ] | اختلاف<br>محاسبات با کد<br>PARC | اختلاف<br>محاسبات با کد<br>WIMS |
|-----------|-----------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| FA-36     | ۱/۲۲۰۳۶±۰/۰۰۰۱۵ | ۱/۲۰۹۷۶۹           | ۱/۲۰۹۷۳۲          | ۰/۰۱۰۶                          | ۰/۰۱۰۶                          |
| FA-24B20  | ۱/۰۱۸۱۱±۰/۰۰۰۱۳ | ۱/۰۱۸۷۹۳           | ۱/۰۱۸۶۹۷          | ۰/۰۰۰۷                          | ۰/۰۰۰۶                          |
| FA-24B36  | ۰/۹۸۶۷۶±۰/۰۰۰۱۵ | ۰/۹۸۵۵۹۲           | ۰/۹۸۵۴۷۷          | ۰/۰۰۱۱                          | ۰/۰۰۱۳                          |
| FA-36B36  | ۱/۱۲۰۸۰±۰/۰۰۰۱۵ | ۱/۱۱۸۷۱۰           | ۱/۱۱۸۶۴۰          | ۰/۰۰۲۱                          | ۰/۰۰۲۲                          |

### ۳. نتایج و محاسبات

جاذب سوختنی فعلی راکتور بوشهر  $CrB_2Al$  است که به صورت BPR در کانالهای راهنما قرار داده میشود. شبیه‌سازی سه‌بعدی انواع مجتمعهای سوخت راکتور بوشهر با استفاده از کد MCNPX انجام شد. در شکل ۱ و شکل ۲ سطح مقطع عرضی مجتمع سوخت FA-36B36 نشان داده شده است. به منظور بررسی تاثیر دیگر جاذبهای سوختنی بر پارامترهای نوترونیک، جاذبهای گادولونیوم، اریبوم و دیسپرسیوم با غلظتهای ۳، ۵ و ۱۰ درصد وزنی در نظر گرفته شد که این مقادیر در سوختهای واقعی مورد استفاده است [۶]. شایان ذکر است که محل فرارگیری جاذبها در مجتمع یکسان بوده و مشابه با جاذب سوختنی فعلی بوشهر است.



شکل ۱: سطح مقطع عرضی مجتمع سوخت FA-36B36

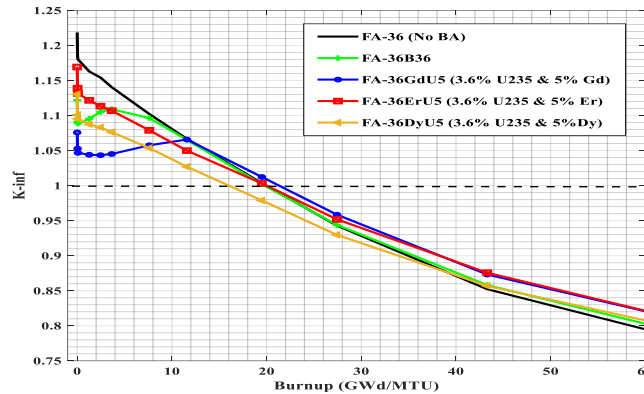


شکل ۲: نمای از یک ششم متقارن مجتمع سوخت FA-36B36

### ۳.۱. مقایسه پارامترهای نوترونیک در انواع جاذبهای سوختنی

برای مقایسه نوترونیک انواع جاذبهای سوختنی با هم، ضروری است چند پارامتر را از لحاظ کمی با هم مقایسه کرد. اولین پارامتر، ارزیابی فرسایش سوخت برای هر جاذب سوختنی است. پس از بررسی انواع مختلف مجتمعهای سوختی موجود در قلب راکتور بوشهر محاسبات برناپ مربوط به مجتمعهای دارای غنای سوخت ۳/۶٪ و غلظت ۰/۰۳۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دلیل دارا بودن شرایط بحرانی و مفاهیم طول سیکل مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۳ تغییرات ضریب تکثیر بینهایت (K-inf) نسبت به فرسایش سوخت (برناپ) را با غلظت ۵ درصد وزنی از جاذبهای مختلف نشان میدهد. هدف از بررسی این نمودار این است که نشان دهد کدام جاذب سوختنی از لحاظ کاهش مقدار راکتیویته اولیه و همچنین نوسان راکتیویته عملکرد مناسبتری از خود نشان میدهد.

نوسان راکتیویته (Reactivity swing) به صورت تفاوت بین ماکزیمم مقدار و مینیمم مقدار ضریب تکثیر بینهایت در طول عملیات و فعالیت راکتور تعریف میشود. برای جلوگیری از جابجایی مکرر میله‌های کنترل، نوسان و تغییرات راکتیویته نسبت به فرسایش سوخت (برناپ) تا حد امکان پایین نگه داشته میشود.



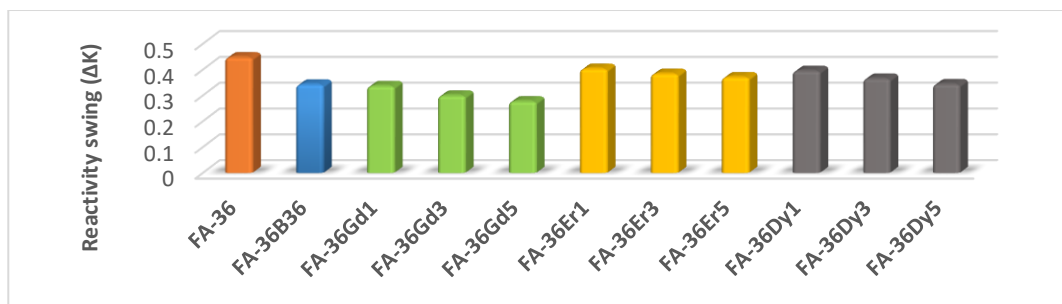
شکل ۳. تغییرات  $K_{\infty}$  نسبت به فرسایش سوخت در چهار جذب سوختی مختلف

همانطور که در شکل ۳ دیده میشود در شروع نمودارها یک افت ناگهانی در مقدار ضریب تکثیر بینهایت مشاهده میشود که به دلیل وجود  $^{135}\text{Xe}$  و  $^{139}\text{Sm}$  است. مقدار  $K_{\infty}$  در ابتدای سیکل در حالت بدون جذب FA-36 (No BA) نسبت به دیگر حالات بیشتر است که به علت عدم حضور جذب سوختی است. مقدار راکتیویته ابتدایی در مراحل اولیه از مصرف سوخت در جذب گادولونیوم کمتر از دیگر جذبهاست که به دلیل سطح مقطع جذب نوترون بسیار بالای گادولونیوم نسبت به دیگر جذبهاست. همانطور که شکل ۳ نشان میدهد در شرایط یکسان، سرعت تهی‌شدگی گادولونیوم از جذب فعلی بوشهر کمتر است که این مسئله بر نحوه مدیریت بهتر سوخت تاثیرگذار است. تغییرات  $K_{\infty}$  در جذب اربیم و دیسپرسیوم مشابه حالت بدون جذب است. نمودارها تقریباً کاهشی خطی است و مانند گادولونیوم افزایش راکتیویته به دلیل تهی‌شدگی جذب در مراحل اولیه دیده نمیشود که به دلیل سرعت مصرف پایین این نوع جذبها نسبت به دیگر جذبهاست. کاهش اولیه در مقدار  $K_{\infty}$  در دو نمودار دیده میشود. در مورد دیسپرسیوم مقدار این کاهش نسبت به اربیم بیشتر است که به دلیل تعداد فراوان برهمکنش‌های مربوط به ایزوتوپهای دیسپرسیوم و سطح مقطع جذب نوترون حرارتی بیشتر نسبت به اربیم است. شکل ۳ نشان میدهد که جذب گادولونیوم نسبت به حالت بدون جذب و دیگر جذبها که تاثیر محسوسی بر طول سیکل ندارند، طول سیکل را تقریباً به میزان ۱ GWd/MTU افزایش میدهد. جدول ۲ تغییرات راکتیویته در ابتدای سیکل در چهار جذب سوختی را نشان میدهد.  $K_{(BA)}$  مربوط به مقدار ضریب تکثیر بینهایت مجتمع با حضور جذب سوختی در ابتدای سیکل و  $K_{FA-36(No BA)}$  مربوط به مقدار ضریب تکثیر بینهایت در حالت بدون جذب و در ابتدای سیکل میباشد. همانطور که در جدول ۲ مشاهده میشود جذب اربیم کمترین اثر (۳۴۶۵ pcm) و جذب گادولونیوم بیشترین اثر (۱۰۸۹۳ pcm) را روی مقادیر اولیه راکتیویته دارند. میتوان نتیجه گرفت که جذب گادولونیوم با غلظت ۰.۵٪ نسبت به دیگر جذبهای سوختی بیشترین اثر را روی مقادیر راکتیویته اولیه و کمترین تغییرات نوسان راکتیویته را در طول عملیات راکتور دارد (۰/۲۷۷ΔK). جدول ۲ نشان میدهد که مقدار نوسان راکتیویته در اربیم بزرگتر از بقیه جذبهای سوختی است (۰/۳۷۱ ΔK) که به دلیل سطح مقطع جذب نوترون بسیار پایین اربیم نسبت به دیگر جذبهاست (۱۶۰ بارن). همچنین گادولونیوم با غلظت ۵ درصد کمترین مقدار نوسان راکتیویته را نسبت به دیگر جذبها دارد (۰/۲۷۷ ΔK) که به دلیل سطح مقطع جذب نوترون بالای گادولونیوم است. باید توجه داشت که نوسان راکتیویته کمتر، شرایط پایدارتر و کنترل شده در راکتور را یادآوری میکند. شکل ۴ مقادیر نوسان راکتیویته در جذبهای مختلف را با غنای ۳/۶٪ سوخت و غلظتهای متفاوت از انواع جذب (۰/۱٪، ۰/۳٪، ۰/۵٪) نشان میدهد. از میان درصدهای بررسی شده و با این تعداد و چینش جذب‌های سوختی به این نتیجه رسیده است که تغییرات غلظت اثر جزئی و نامحسوس روی مقادیر نوسان راکتیویته دارد و نوع ماده جذب سوختی تاثیر بارزتری روی تغییرات راکتیویته دارد. البته تغییرات غلظت روی کاهش اولیه مقادیر

ضریب تکثیر تاثیر قابل توجهی دارد. در نهایت هر دو فاکتور (کاهش مقدار اولیه ضریب تکثیر بینهایت و کاهش نوسان راکتیویته) برای انتخاب جاذب مناسب، اهمیت ویژه‌ای دارند.

جدول ۲. مقایسه پارامترهای نوترونیکی در چهار جاذب مختلف با درصد وزنی ۵ درصد

| نوع جاذب      | K-inf at BOC  | K(BA) - K FA-36 (No BA) | $\rho$ (BA) - $\rho$ FA-36 (No BA) (pcm) | ( $\Delta K$ ) نوسان راکتیویته |
|---------------|---------------|-------------------------|--|--------------------------------|
| FA-36 (No BA) | ۱/۲۱۹±۰/۰۰۰۹۱ | ۰/۰۰۰                   | ۰/۰۰                                     | ۰/۴۴۸                          |
| FA-36B36      | ۱/۱۲۲±۰/۰۰۰۹۶ | ۰/۰۹۷                   | ۷۰۶۱                                     | ۰/۳۴۳                          |
| FA-36GdU5     | ۱/۰۷۶±۰/۰۰۱۱۶ | ۰/۱۴۳                   | ۱۰۸۹۳                                    | ۰/۲۷۷                          |
| FA-36ErU5     | ۱/۱۶۹±۰/۰۰۰۸۶ | ۰/۰۴۹                   | ۳۴۶۵                                     | ۰/۳۷۱                          |
| FA-36DyU5     | ۱/۱۳۱±۰/۰۰۰۹۸ | ۰/۰۸۸                   | ۶۳۹۹                                     | ۰/۳۴۴                          |



شکل ۴. نمودار مقادیر نوسان راکتیویته در جاذبهای مختلف با غلظتهای مختلف

توزیع ضرایب بیشینه توان مربوط به میله‌های مجتمع با جاذبهای مختلف (PPPF) پارامتر مهم دیگری است که نیاز به بررسی دارد. ضریب توزیع توان نسبی حول میله جاذب (SPPPF) به صورت میانگین توان نرمالیزه شده میله‌های سوخت اطراف میله جاذب تعریف میشود [۴]. در جدول ۳ مقادیر PPF برای انواع میله‌های جاذب و مقادیر SPPPF برای جاذبهای مختلف محاسبه شده است. اختلاف مقدار SPPPF و میانگین PPF در ردیف بیرونی مجتمع به عنوان ملاکی برای ارزیابی یکنواختی توزیع توان مجتمع نیز محاسبه شده است. علت استفاده از روش مذکور تعداد فراوان میله‌های سوخت در هر مجتمع و همچنین تعداد جاذبهای مورد بررسی میباشد که روند ارزیابی را مشکل میکند و میانگین‌گیری روش مناسبتری برای ارزیابی داده‌ها میباشد. باید توجه داشت که مقادیر محاسبه شده برای میله‌های جاذب سوختنی به دلیل تقارن مجتمعها یکسان است. همانطور که در جدول ۳ دیده میشود در ابتدای سیکل، مقادیر SPPPF اطراف میله‌های جاذب سوختنی نسبت به مقادیر میله‌های بدون جاذب کاهش یافته است. مقدار این کاهش در میله‌های گادولونیوم بیشتر است که به دلیل سطح مقطع جذب نوترون بیشتر در این جاذب نسبت به دیگر جاذبهاست. بدیهی است که جذب نوترون بیشتر باعث کاهش شار نوترون و در نهایت کاهش مقدار SPPPF در اطراف میله‌های جاذب میشود. بیشترین مقدار SPPPF مربوط به جاذب اربوم است که دارای کمترین سطح مقطع جذب نوترون حرارتی در بین جاذبهای ذکر شده است (۰/۹۳۵). به طور کلی مقادیر SPPPF در انتهای کار راکتور نسبت به ابتدای کار افزایش یافته است که به دلیل کاهش غلظت جاذب سوختنی با گذشت زمان و در نتیجه کاهش مقدار جذب نوترون در میله‌های جاذب است. این افزایش مقدار در جاذب فعلی بیشتر است که به دلیل مصرف بیشتر و در نتیجه مقدار غلظت کمتر این جاذب نسبت به دیگر جاذبها و در نهایت افزایش تعداد نوترون در انتهای کار است. تفاوت مقدار SPPPF و میانگین PPF در ردیف بیرونی محاسبه شده است. اختلاف بین این دو فاکتور، میزان یکنواختی توزیع توان را نشان میدهد. واضح است که هر چه مقدار این اختلاف کمتر باشد توزیع توان یکنواختتر است. میتوان گفت که در ابتدای کار

(BOC)، کمترین مقدار اختلاف مربوط به جاذب اربیوم و در انتهای کار (EOC) مربوط به جاذب گادولونیوم است (بدون در نظر گرفتن جاذب فعلی).

جدول ۳. مقادیر PPPF و SPPPF در جاذبهای سوختی مختلف

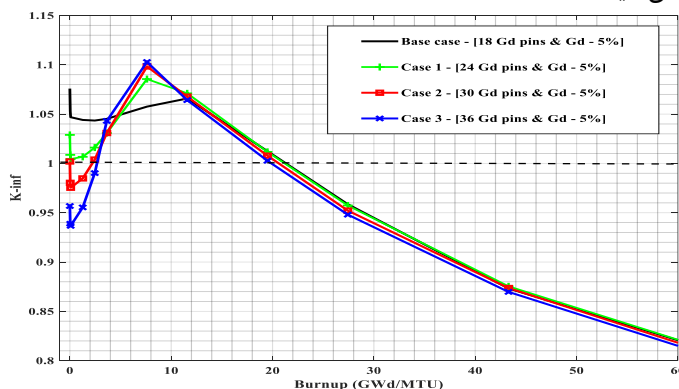
| نوع جاذب  | FA-36<br>(No BA) | FA-36B36 | FA-36Gd5 | FA-36Er5 | FA-36Dy5 |
|---|------------------|----------|----------|----------|----------|
| ضریب توزیع توان نسبی حول میله جاذب در ابتدای سیکل (SPPPF)                                       | ۱/۰۶۳            | ۰/۹۱۶    | ۰/۸۶۷    | ۰/۹۳۵    | ۰/۹۱۳    |
| ضریب توزیع توان نسبی حول میله جاذب در انتهای سیکل (SPPPF)                                       | ۱/۰۴۵            | ۱/۰۳۸    | ۰/۹۸۳    | ۰/۹۶۸    | ۰/۹۵۸    |
| میانگین ضرایب بیشینه توان جاذب سوختی در ابتدای سیکل در میله‌های سوخت اطراف مجتمع در ابتدای سیکل | ۰/۹۷۲            | ۱/۰۴۳    | ۱/۱۳۵    | ۱/۰۵۶    | ۱/۰۷۷    |
| میانگین ضرایب بیشینه توان جاذب سوختی در ابتدای سیکل در میله‌های سوخت اطراف مجتمع در انتهای سیکل | ۱/۰۰۵            | ۱/۰۰۷    | ۱/۰۲۵    | ۱/۰۲۷    | ۱/۰۲۷    |
| اختلاف مقدار SPPPF و میانگین PPPF در ردیف بیرونی مجتمع در ابتدای سیکل                           | ۰/۰۹۱            | ۰/۱۲۷    | ۰/۲۶۸    | ۰/۱۲۱    | ۰/۱۶۴    |
| اختلاف مقدار SPPPF و میانگین PPPF در ردیف بیرونی مجتمع در انتهای سیکل                           | ۰/۰۴۰            | ۰/۰۳۱    | ۰/۰۴۲    | ۰/۰۵۹    | ۰/۰۶۹    |

### ۲.۳. اثر تعداد، مکان، و غلظت میله‌های جاذب سوختی بر پارامترهای نوترونیک

پس از انتخاب جاذب سوختی گادولونیوم به عنوان جاذب مناسب، این پرسش به وجود می‌آید که افزایش یا کاهش، تغییر چیدمان و تغییر غلظت میله‌های جاذب سوختی چه تاثیری بر پارامترهای نوترونیک و به تبع آن مقدار طول سیکل دارد.

#### ۱.۲.۳. اثر تغییر تعداد میله‌های جاذب سوختی

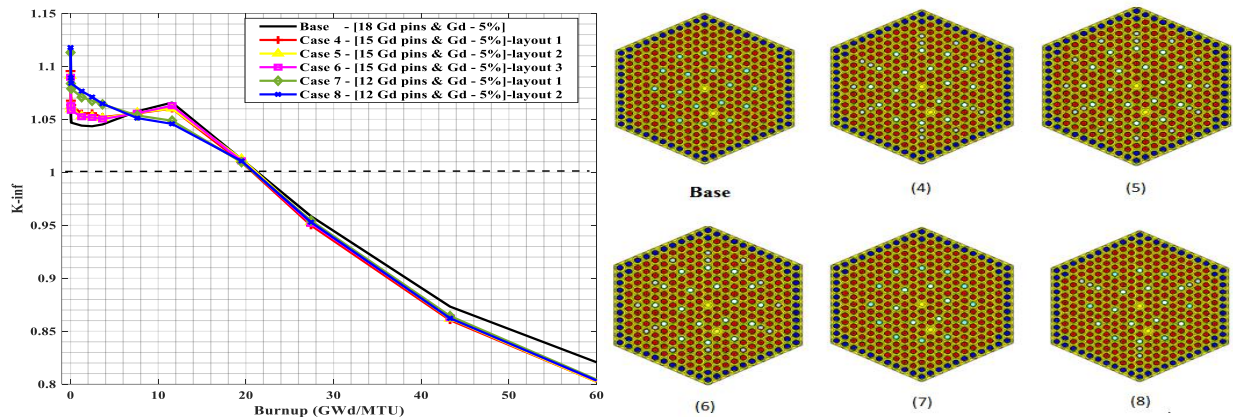
در راستای پاسخ به پرسش پیش آمده، در مرحله اول، تعداد میله‌های جاذب به ۲۴، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ عدد افزایش داده شد. جاذب گادولونیوم با تعداد ۱۸ میله جاذب، غنای سوخت ۳/۶٪ و غلظت ۰.۵٪ جاذب سوختی به عنوان مرجع مقایسه در نظر گرفته می‌شود (18GdU5). مکان میله‌های جاذب، مکان فعلی جاذب در راکتور بوشهر (کانالهای راهنما) هستند. شکل ۵ تغییرات K-inf نسبت به فرسایش سوخت در حالت‌های جدید را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تغییرات K-inf نسبت به فرسایش سوخت (برناپ) با افزایش تعداد میله‌های جاذب گادولونیوم

همان طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود با افزایش تعداد میله‌های جاذب در مدل‌های ذکر شده در این پژوهش، ماکزیمم راکتیویته در نقطه برناپ کمتری اتفاق می‌افتد و سرعت مصرف سوخت افزایش می‌یابد. هر چه قله ماکزیمم تیزتر باشد با نوسان راکتیویته بیشتری مواجه هستیم. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد میله‌های جاذب کاهش در طول سیکل مشاهده می‌شود و هر چه تعداد میله‌های جاذب بیشتر می‌شود مقدار کاهش بیشتر است. میتوان گفت که افزایش تعداد میله‌های جاذب لزوماً باعث بهبود شرایط

نوترونیک نمی‌شود. در گام بعد با حذف تعدادی از میله‌های جاذب، پارامترهای نوترونیک مجدداً بررسی شد. تعداد ۱۵ میله جاذب سوختنی و با ۳ چیدمان متفاوت انتخاب و مجدداً بررسی شد. شکل ۶ تغییرات  $K_{\text{inf}}$  نسبت به فرسایش سوخت در حالت‌های جدید و شکل ۷ حالت‌های مختلف کاهش میله‌های جاذب گادولونیوم را نشان می‌دهد. با کاهش تعداد میله‌های جاذب، مقدار  $K_{\text{inf}}$  در ابتدای سیکل نسبت به حالت مرجع افزایش پیدا می‌کند. همچنین مقدار نوسان و تغییرات راکتیویته با کاهش میله‌های جاذب، افزایش می‌یابد. این تغییرات با کاهش تعداد میله‌های جاذب از ۱۵ به ۱۲ و با ۲ چیدمان متفاوت بارزتر می‌شود. قابل توجه است که این حالات از بین حالات فراوان و مختلفی که بررسی شده‌است مناسب‌تر ارزیابی شده و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. با کاهش تعداد میله‌های جاذب، منحنی‌ها به سمت منحنی حالت بدون جاذب متمایل می‌شود. علاوه بر این تغییر آرایش میله‌های جاذب کاهش یافته تأثیر محسوسی روی پارامترهای نوترونیک ندارد (با فرض ثابت بودن تعداد میله‌های جاذب (۱۵ یا ۱۲)). سرانجام منحنی‌های مربوط به هر دو حالت با چیدمان‌های متفاوت در انتهای کار هم‌پوشانی می‌کنند. همچنین قابل ذکر است که حالت‌های انتخابی اثر مثبتی بر روی طول سیکل ندارند.

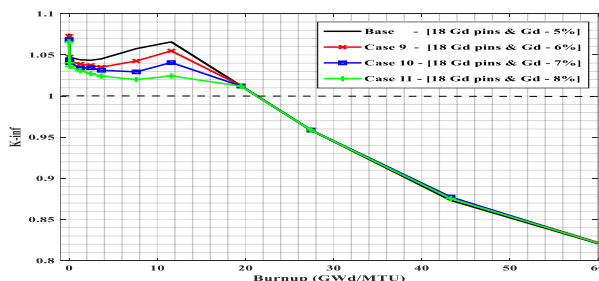


شکل ۶. تغییرات  $K_{\text{inf}}$  نسبت به برناب با کاهش میله‌های جاذب گادولونیوم

شکل ۷. حالت‌های مختلف کاهش میله‌های جاذب گادولونیوم

### ۲.۲.۳. اثر افزایش غلظت میله‌های جاذب سوختنی

در مرحله نهایی تغییر در غلظت میله‌های جاذب سوختنی مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۸، تغییرات  $K_{\text{inf}}$  نسبت به برناب در غلظت‌های مختلف را نشان می‌دهد. کاهش مقدار  $K_{\text{inf}}$  اولیه، کاهش نوسان راکتیویته و مقدار جزئی راکتیویته در انتهای سیکل از نتایج افزایش غلظت جاذب است. جدول ۴ به مقایسه تمام حالات مورد بررسی پرداخته‌است. شایان ذکر است که جبران برناب باقیمانده به صورت تفاوت بین مقدار برناب در نمودار حالت بدون جاذب FA-36 و نمودار با حالت جاذب تعریف می‌شود (در نقطه  $K_{\text{inf}}=1$ ) که نشان‌دهنده افزایش یا کاهش طول سیکل می‌باشد. با توجه به جدول ۴ میتوان نتیجه گرفت که حالت ۹ با مقدار غلظت جاذب ۶٪ و تعداد ۱۸ میله جاذب طول سیکل را به میزان ۰/۰۱ GWd/MTU افزایش می‌دهد و شرایط نوترونیک بهینه‌تری فراهم می‌کند.



شکل ۸. تغییرات K-inf نسبت به فرسایش سوخت در غلظت‌های مختلف جاذب گادولونیوم

#### جدول ۴. مقایسه پارامترهای نوترونیک تمام حالات مورد بررسی

| انواع حالتها | K-inf ابتدای سیکل    | K-inf انتهای سیکل     | نوسان راکتیویته ( $\Delta K$ ) | جبران راکتیویته باقیمانده (pcm) | جبران برناپ باقیمانده (GWd/MTU) | طول سیکل (GWd/MTU) |
|--------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| حالت مرجع    | $1/0.76 \pm 0/0.116$ | $0/0.798 \pm 0/0.101$ | $0/0.277$                      | 0/00                            | +                               | 21/33              |
| حالت ۱       | $1/0.29 \pm 0/0.082$ | $0/0.798 \pm 0/0.087$ | $0/0.287$                      | 30                              | +                               | 21/20              |
| حالت ۲       | $1/0.02 \pm 0/0.077$ | $0/0.795 \pm 0/0.089$ | $0/0.304$                      | 600                             | +                               | 20/52              |
| حالت ۳       | $0/957 \pm 0/0.102$  | $0/0.792 \pm 0/0.105$ | $0/0.304$                      | 1043                            | +                               | 19/58              |
| حالت ۴       | $1/0.96 \pm 0/0.093$ | $0/0.778 \pm 0/0.077$ | $0/0.318$                      | 3341                            | +                               | 20/97              |
| حالت ۵       | $1/0.91 \pm 0/0.087$ | $0/0.777 \pm 0/0.085$ | $0/0.314$                      | 3475                            | +                               | 20/85              |
| حالت ۶       | $1/0.90 \pm 0/0.092$ | $0/0.778 \pm 0/0.087$ | $0/0.311$                      | 3298                            | +                               | 20/97              |
| حالت ۷       | $1/113 \pm 0/0.082$  | $0/0.779 \pm 0/0.097$ | $0/0.334$                      | 3115                            | +                               | 20/84              |
| حالت ۸       | $1/118 \pm 0/0.094$  | $0/0.779 \pm 0/0.092$ | $0/0.339$                      | 3179                            | +                               | 21/02              |
| حالت ۹       | $1/0.72 \pm 0/0.094$ | $0/0.799 \pm 0/0.084$ | $0/0.273$                      | -90                             | قابل اغماض                      | 21/34              |
| حالت ۱۰      | $1/0.68 \pm 0/0.095$ | $0/0.797 \pm 0/0.090$ | $0/0.271$                      | 201                             | قابل اغماض                      | 21/33              |
| حالت ۱۱      | $1/0.66 \pm 0/0.094$ | $0/0.798 \pm 0/0.085$ | $0/0.268$                      | 10                              | قابل اغماض                      | 21/29              |

#### ۴. نتیجه‌گیری

- تحلیل و ارزیابی به کارگیری انواع جاذب‌های سوختنی در بین مدل‌ها و حالت‌های مختلف ارائه شده نتایج زیر را به دنبال داشت.
- جاذب سوختنی یکپارچه گادولونیوم، بیشترین تاثیر را روی کاهش اولیه مقدار ضریب تکثیر بینهایت ( $1/0.76$ ) و نوسان راکتیویته ( $0/0.277 \Delta K$ ) دارد. این دو پارامتر کنترل راکتیویته از طریق جاذبها را بهبود میبخشد.
  - تغییرات غلظت اثر جزئی و نامحسوس روی مقادیر نوسان راکتیویته دارد ( $0/0.36 \Delta K$ ) و نوع ماده جاذب سوختنی تاثیر بارزتری روی تغییرات راکتیویته دارد.
  - در غلظت‌های بررسی شده با تعداد یکسان از میله‌های جاذب، گادولونیوم مقدار طول سیکل (تقریباً  $1 \text{ GWd/MT}$ ) .
  - در ابتدای کار راکتور (BOC)، ارببیوم دارای توزیع یکنواخت‌تر توان و در انتهای کار (EOC)، گادولونیوم دارای توزیع یکنواخت‌تری است (نسبت به جاذب فعلی راکتور بوشهر)
  - پارامترهای نوترونیک با افزایش غلظت جاذب سوختنی (در محدوده مجاز راکتورهای فعال) بهبود می یابد.
  - در نهایت میتوان نتیجه گرفت که حالت ۹ با مقدار غلظت جاذب ۶٪ و تعداد ۱۸ میله جاذب سوختنی گادولونیوم شرایط نوترونیک بهینه‌تری فراهم میکند و طول سیکل را به میزان  $0/0.1 \text{ GWd/MTU}$  افزایش میدهد.





## ۵. مراجع

- [<sup>۱</sup>] Lamarsh, John R., "Introduction to nuclear reactor theory", 1965.
- [<sup>۲</sup>] CHARACTERISTICS AND USE OF URANIA-GADOLINIA FUELS, IAEA, VIENNA, 1995
- [<sup>۳</sup>] A. Abdelghafar Galahom, " Investigation of different burnable absorbers effects on the neutronic characteristics of PWR assembly". Annals of Nuclear Energy Volume 94, August 2016, Pages 22-31.
- [<sup>۴</sup>] F. Khoshahval, S.S. Foroutan, A. Zolfaghari, H. Minuchehr, 2016. "Evaluation of burnable absorber rods effect on neutronic performance in fuel assembly of WWER-1000 reactor", Ann. Nucl. Energy 87, 648–658.
- [<sup>۵</sup>] K. Hadad, F. Faghihi, MH. Porhemmat, K. Hosseinipor, H.Sadeghpour, "Simulation of Bushehr reactor steady state by PARCS code and PMAXS library", Journal of Radiation and Nuclear Technology, Vol. 1, No. 1, 2014.
- [<sup>۶</sup>] L. Frybortova, "Impact of Burnable Absorbers on Fuel Cycle of VVER Reactors". Czech Technical university in Prague, Brehova 7, 11519 Praha 1, Czech Republic