J. of Nuclear Sci. and Tech.
No. 59, pp. 15-21, 2012

مجله علوم و فنون هسته‌ای
شماره ۵۹، صفحات ۲۱-۱۵، ۱۳۹۱

بررسی اثر توزیع محوری غنای میله‌های سوخت بر پارامترهای نوترونی قلب رآکتورهای هسته‌ای قدرت

علی پذیرنده*، سیده هستی نصیری
گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۴۹۸-۳۱۴۸۵، تهران- ایران

چکیده: بهینه‌سازی میزان مصرف سوخت مسئله مهمی در مدیریت و فناوری سوخت هسته‌ای قلب رآکتور است. توزیع غنای میله‌های سوخت در راستای شعاعی قلب یک روش شناخته شده است ولی در راستای محوری مقدار غنا ثابت است. در این مقاله اثرات تغییر غنای سوخت در راستای محوری را بر پارامترهای نوترونی قلب بررسی می‌کنیم. در این بررسی، قلب راکتور را در راستای محوری به ۱۰ قسمت تقسیم می‌کنیم که هر یک دارای غنای متفاوت است. در حالی که غنای سوخت در راستای شعاعی بدون تغییر باقی می‌ماند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که ضرایب قدرت در راستای شعاعی و محوری نسبت به حالت معمولی کاهش میابد. بجزاین، طول عمر قلب ۳۰ روز افزایش میابد. علاوه براین، چگالی اسید بوریک در ابتدای سیکل قلب g/kg ۰٫۲ می‌گردد (که کم‌تر از رآکتور معمولی است). توزیع شار نوترون در راستای شعاعی با توزیع غنای محوری در ابتدای سیکل قلب نسبتاً یکنواخت است.

کلید واژه‌ها: غنای سوخت هسته‌ای، مدیریت سوخت، نسبت قدرت بیشینه به قدرت میانگین، غنای محوری

Study of Fuel Rods Axial Enrichment Distribution Effect on the Neutronic Parameters of the Reactor Core

A. Pazirandeh*, S.H. Nasiri
Nuclear Engineering Department, Science and Research, Islamic Azad University, P.O.Box: 31485-498, Tehran - Iran

Abstract: Optimization of the fuel burn up is an important issue in nuclear reactor fuel management and technology. Radial enrichment distribution in the reactor core is a conventional method and axial enrichment is constant along the fuel rod. In this article, the effects of axial enrichment distribution variation on neutronic parameters of PWR core are studied. The axial length of the core is divided into ten sections, considering axial enrichment variation and leaving the existing radial enrichment distribution intact. This study shows that the radial and axial power peaking factors are decreased as compared with the typical conventional core. In addition, the first core lifetime lasts 30 days longer than normal PWR core. Moreover, at the same time boric acid density is 0.2 g/kg at the beginning of the cycle. The flux shape is also flat at the beginning of the cycle for the proposed configuration of the axially enrichment distribution.

Keywords: ***Nuclear Fuel Enrichment, Fuel Management, Power Peaking Factor, Axial Enrichment***

*email: Ali Pazirandeh:apz2500@hotmail.com
تاریخ دریافت مقاله: ۸۹/۴/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۰/۷/۱۳

۱. مقدمه

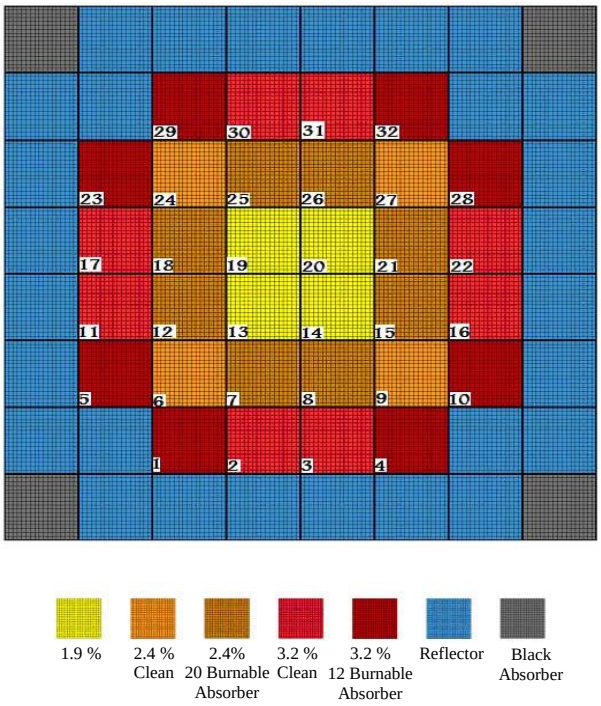
امروزه با توجه به اهمیت انرژی هسته‌ای در دنیا، مدیریت سوخت از جای‌گاه ویژه‌ای در طراحی رآکتورها برخوردار است و فن‌آوری نیروگاه‌های هسته‌ای به سمت بهینه‌سازی مصرف سوخت پیش می‌رود. لذا پارامترهای نوترونی قلب رآکتور به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا مصرف سوخت به حداقل میزان ممکن برسد.

همان‌طور که می‌دانیم در قلب رآکتور غنای سوخت در راستای شعاعی تغییر می‌کند تا پارامترهایی مثل شار نوترون، میزان مصرف سوخت و . . . بهینه شوند. اما در طول میله‌های سوخت از غنای ثابت استفاده می‌شود. با توجه به این که میله‌های سوخت از قرص‌های سوختی که روی هم قرار می‌گیرند تشکیل شده است و با توجه به ابعاد رآکتور به نظر می‌رسد که تغییر غنا در راستای طولی میله‌های سوخت نیز امکان‌پذیر بوده و در بهینه‌سازی مصرف سوخت مؤثر می‌باشد.

۲. مدل‌سازی قلب یک رآکتور قدرت ۳۶۰ مگاواتی

در این پژوهش ابتدا قلب یک رآکتور آب تحت فشار (PWR) مدل‌سازی شد. رآکتور مورد نظر یک رآکتور ۳۶۰ مگاوات الکتریکی شامل ۳۲ مجتمع سوخت مربعی (طراحی وستینگهاوس) است [۱] که هر یک از مجتمع‌ها (۱۷×۱۷) شامل ۲۶۴ میله‌ی سوخت و ۲۴ عدد کانال هدایت و یک عدد کانال کاربردی است. با توجه به طراحی رآکتور، مجتمع‌های سوختی که نیاز به میله‌ی سم سوختنی دارند در کانال‌های هدایت قرار می‌گیرند. گام شبکه‌ی مجتمع سوخت ۲۱٫۴۱۷۳cm و قطر میله‌های سوخت ۰٫۷۸۴۴cm است. میله‌های سوخت ۱٫۲۵۹۸cm از یک‌دیگر فاصله دارند. سم سوختنی به کار رفته در مجتمع‌های سوخت به عنوان میله‌ی جاذب از نوع پیرکس (B_2O_3-SiO_2) انتخاب شده است. جزییات مربوط به ساختار قلب و ویژگی‌های فیزیکی آن در شکل ۱ مشاهده می‌شود. در این قلب سه غنای ۱٫۹، ۲٫۴ و ۳٫۲ در راستای شعاعی توزیع شده‌اند.

برای مدل‌سازی قلب، پس از هماهنگ کردن ورودی کد WIMSD4 با مواد مختلف موجود در قلب از جمله سوخت، بازتاباننده و . . . کد اجرا شد. سپس با استفاده از سطح مقطع‌های داده شده در فایل خروجی WIMS [۲] ورودی کد CITATION [۳] با مجتمع‌های سوخت موجود وفق داده شده و کد اجرا گردید.



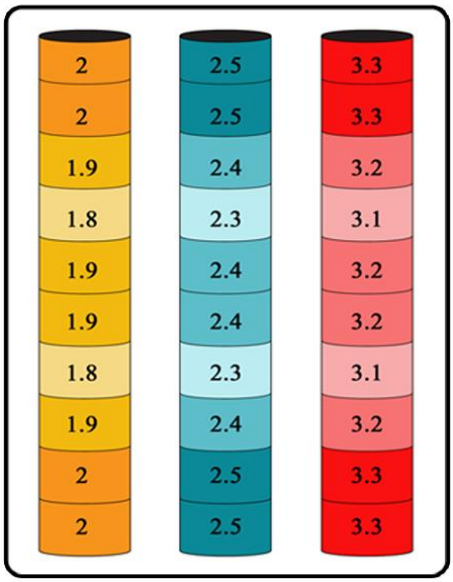
شکل ۱. مش‌بندی و نمای قلب رآکتور مورد مطالعه.

در این مرحله طول هر مجتمع به ده قسمت مساوی تقسیم و سطح مقطع‌های ارایه شده به وسیله‌ی کد CITATION برای این ده قسمت به دست آمد. سپس با میانگین‌گیری از این سطح مقطع‌ها برای یک مجتمع سوخت کد CITATION برای کل قلب اجرا شد. در نهایت قلب رآکتور مدل‌سازی گردید.

تهیه‌ی فایل‌های ورودی کدهای WIMS و CITATION و استخراج اطلاعات لازم از فایل‌های خروجی و ارتباط میان آن‌ها در محیط فرترن ۹۰ انجام شد و با کمک گرفتن از توانایی‌های برنامه‌نویسی آن، روند اجرای کد CITATION به گونه‌ای تغییر داده شد که در راستای محوری هر یک از ده قسمت طولی یک مجتمع سوخت، غناهای متفاوتی قرار گرفت. روند انجام این کار بدین‌گونه بود که ابتدا کد WIMS برای غناهای جدید اجرا شد، سپس با استفاده از آن کد CITATION برای هر مجتمع سوخت با غناهای جدید اجرا گردید. در نهایت با استفاده از سطح مقطع‌های حاصل از آن، قلب رآکتور مجدداً مدل‌سازی گردید، با این تفاوت که این بار در هر کدام از ده قسمت محوری، غناهای جدید به گونه‌ای توزیع گردید که در راستای شعاعی توزیع غنای اولیه حفظ شد.

۲.۱ روش تغییر غنای سوخت در راستای محوری میله‌های سوخت

در قلب یک رآکتور متعارف، معمولاً سه نوع غنا به کار می‌رود [۴]. در این پژوهش به منظور تغییر محوری غنا چند غنای دیگر در حد غناهای به کار رفته در قلب معمولی تعریف گردید. به این ترتیب که سه غنای به کار رفته در قلب به صورت سه دسته غنا تعریف شد. در هر دسته غنای اول یک دهم درصد کم‌تر از غنای معمولی، غنای دوم غنای اصلی به کار رفته در قلب و غنای سوم یک دهم درصد بیش‌تر از غنای معمولی به کار رفته می‌باشد. به این ترتیب که چنان‌چه یکی از غناهای به کار رفته در قلب ٪۳٫۲ باشد، در دسته‌بندی غناها برای ٪۳٫۲، غنای اول ٪۳٫۱ غنای دوم ٪۳٫۲ و غنای سوم ٪۳٫۳ است. به این ترتیب در این دسته عدد ۱ نشان‌دهنده‌ی غنای ٪۳٫۱ و عدد ۲ نشان‌دهنده‌ی غنای ٪۳٫۲ و عدد ۳ نشان‌دهنده‌ی غنای ٪۳٫۳ می‌باشد (شکل ۲). به همین ترتیب برای هر یک از دو غنای اصلی دیگر به کار رفته در یک قلب معمولی نیز یک دسته غنای سه تایی تعریف شد. هدف از این کار حفظ توزیع غنا در راستای شعاعی در هر مقطع بود. در واقع هر مجتمع سوخت در راستای محوری به ۱۰ قسمت تقسیم و با توجه به غنای آن برای تغییر غنا در راستای محوری از دسته غنای شامل غنای اصلی آن مجتمع استفاده شد. به عنوان مثال برای تغییر غنا در راستای محوری مجتمع سوختی با غنای ٪۳٫۲ از دسته غنای مربوطه استفاده شد، به این ترتیب که در یک مش اگر عدد یک قرار داده شد سطح مقطع‌های مربوط به غنای ٪۳٫۱، هر جا که عدد ۲ قرار داده شد سطح مقطع‌های مربوط به غنای ٪۳٫۲ و هر جا که عدد ۳ قرار گرفت، سطح مقطع‌های مربوط به غنای ٪۳٫۳ در محاسبات وارد شد. برای مجتمع‌های با غناهای دیگر هم به همین صورت عمل شد. به این ترتیب، در هر مجتمع با هر غنا برای تغییر غنا از دسته‌ی مربوط به همان غنا استفاده شد. باید توجه داشت که برای هر قسمت از تقسیمات عمودی میله‌ی سوخت سه غنای مختلف (سه گزینه‌ی مختلف) وجود دارد. طول یک میله‌ی سوخت به ده قسمت تقسیم شده و با فرض متقارن بودن توزیع شار در طول میله‌ی سوخت، تغییرات غنا برای نصف میله‌ی سوخت، به عبارت دیگر پنج قسمت بالایی یا پایینی، اعمال شد و این برای نیمه‌ی دیگر تکرار گردید. به این ترتیب پنج قسمت و برای هر قسمت سه انتخاب وجود دارد. (تعداد کل حالت‌ها ۲۴۳=۳×۳×۳×۳×۳).



شکل ۲. نحوه‌ی قرارگیری غناهای مختلف در راستای محوری در بهترین حالت.

با اعمال محدودیت‌هایی بر پارامترهای نوترونی، مناسب‌ترین حالت‌ها از میان ۲۴۳ حالت موجود، انتخاب شد. این انتخاب مبتنی بر نتایج محاسبات به دست آمده است.

در هر مقطع از قلب حتی با غناهای جدید، توزیع غنای شعاعی حفظ شد. در قلب رآکتور مورد نظر توزیع غنای شعاعی از الگوی متعارف (۱٫۶، ۲٫۴ و ٪۳٫۲) تبعیت می‌کند. در محاسبات، غناها به صورتی تغییر داده شد که مثلاً اگر در اولین مش در راستای محوری در هر مجتمع غنای شماره ۳ قرار گیرد، این الگوی متعارف در راستای شعاعی حفظ شود. لازم به ذکر است که با فرض تقارن شار در راستای محوری، در محاسبات نیز غنا متقارن در نظر گرفته شد. یادآور می‌شویم که در عمل چنین فرضی ممکن است به علت توزیع نامتقارن دما تا حدی خطا ایجاد نماید. با تغییر دادن غنا در طول میله‌ی سوخت، تعداد ۵ مش (نصف بالایی یا نصف پایینی میله‌ی سوخت) در نظر گرفته شد و برای نیمه‌ی دیگر همین الگو تکرار گردید. نتایج حاصل از این تغییرات با قرار دادن شرط‌هایی در برنامه گلچین شد و محاسبه‌ی تمام پارامترها فقط برای حالت‌هایی که شرایط را برآورده می‌کردند انجام پذیرفت. این شرایط عبارت‌اند از: نسبت قدرت شعاعی و محوری میانگین به قدرت شعاعی و محوری کل. محاسبات کامل (محاسبه‌ی طول عمر رآکتور در دوره اول) برای تمام حالت‌هایی که برای آن‌ها این دو پارامتر کم‌تر از حد مجاز داده شده در برنامه بود انجام گرفت [۵ و ۶].

۲.۲ ساختار الگوریتم برنامه برای انجام محاسبات

همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش اثرات تغییر محوری غنا بر پارامترهای نوترونی قلب رآکتور مورد بررسی قرار گرفته است. محاسبات پارامترهای نوترونی برای قلب رآکتور با آب تحت فشار ۳۶۰ وستینگهاوس به صورت تابعی از توزیع غنا انجام شده است. این محاسبات در محیط فرترن ۹۰ انجام شده است. در این محاسبات در قدم اول قلب رآکتور مدل‌سازی شده و برخی از پارامترهای نوترونی آن محاسبه گردید. روند این کار به این صورت بود که ابتدا با اجرای کدهای wims و citation کتابخانه‌ای از سطح مقطع‌های میانگین برای مجتمع‌های مختلف با غلظت‌های مختلف بوریک اسید به منظور محاسبه‌ی طول عمر رآکتور در دوره‌ی اول تهیه گردید. روند نمای این قسمت از برنامه در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

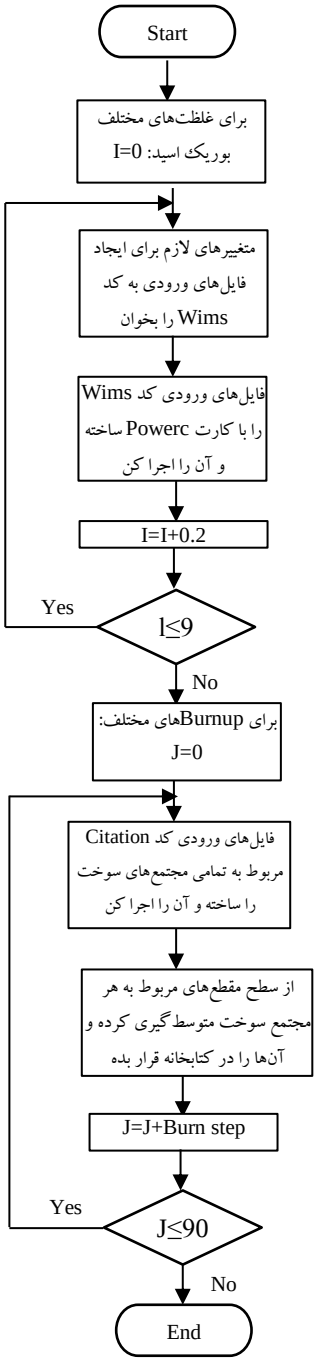
در ادامه و در قسمت دوم، کد citation با استفاده از کتابخانه‌ی به دست آمده در قسمت قبل برای کل قلب در طول دوره‌ی نخست، اجرا و پارامترهای نوترونی آن استخراج گردید.

در قدم دوم غناهای بیش‌تری برای محاسبات به کتابخانه اضافه گردید و در قسمت دوم، برنامه برای قرار گرفتن غناهای جدید به صورت ترکیبی از چند غنا در راستای محوری تغییر داده شد، آن‌گاه، پارامترهای نوترونی قلب محاسبه گردید.

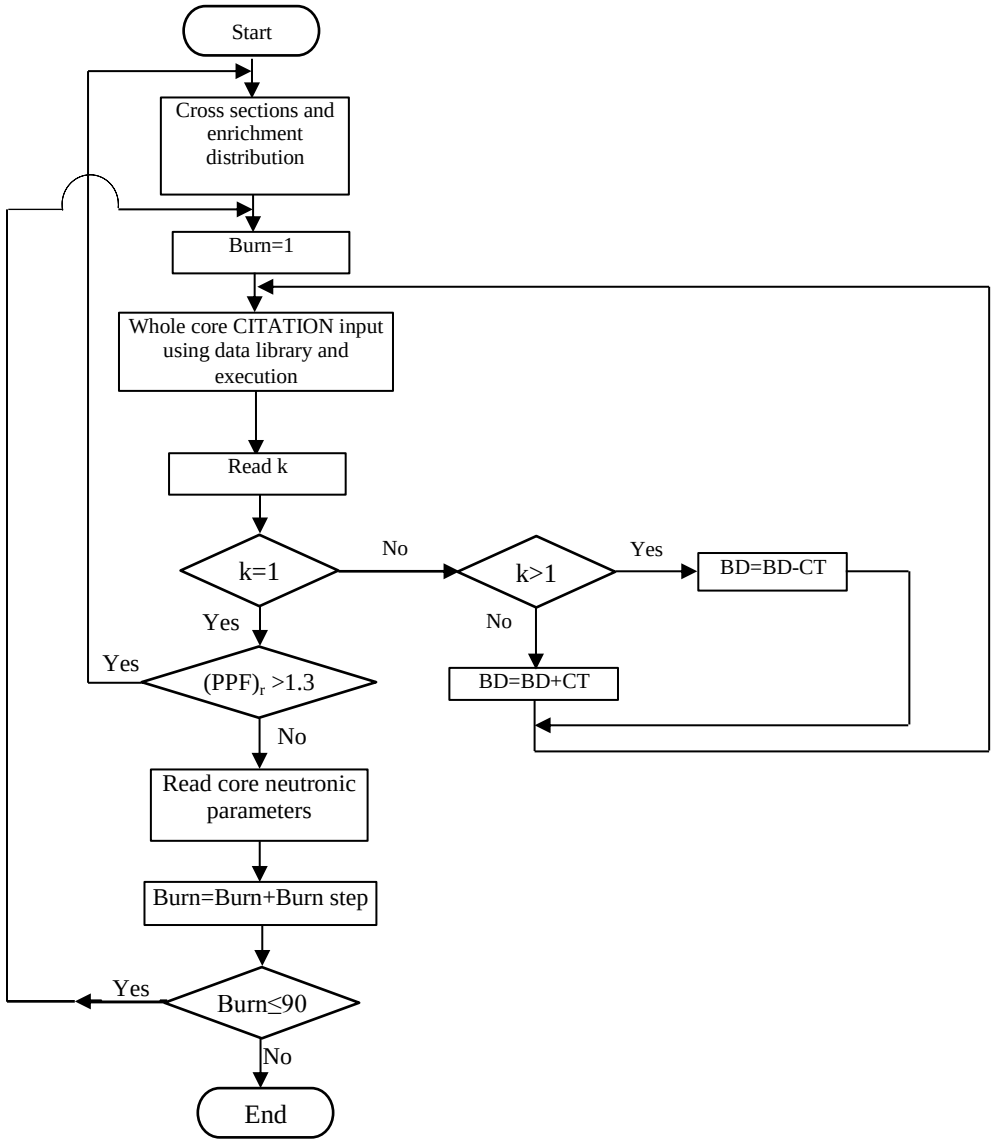
لازم به توضیح است که با توجه به تعداد زیاد حالت‌های قرارگیری غناهای مختلف در راستای محوری، محاسبات کامل طول عمر رآکتور فقط برای حالت‌هایی که پارامترهای نوترونی آن‌ها در روز اول در محدوده‌ی مشخص شده در برنامه بود انجام پذیرفت. در نهایت پارامترهای حالت‌هایی که محاسبات آن‌ها تا آخر عمر رآکتور در دروه‌ی اول انجام شده بود با قلب معمولی مقایسه و بهترین حالت قرارگیری غناهای مختلف در راستای محوری استخراج گردید. روند نمای این قسمت از برنامه در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

۳. یافته‌ها

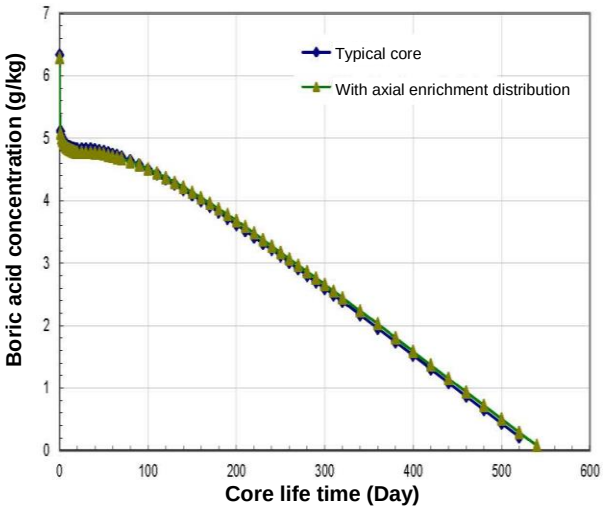
از میان حالت‌هایی که محاسبات کامل برای آن‌ها انجام شده است، بهترین چیدمان مربوط به حالتی است که در آن غنای سوخت در راستای محوری به صورت مشخص شده در شکل ۲ است. نتایج حاصل از این الگو و قلب معمولی در شکل‌های ۵ تا ۱۱ آورده شده است. در شکل ۵ غلظت بوریک اسید در طول دوره‌ی اول کار رآکتور برای دو حالت مقایسه شده است. در شکل ۶ تغییرات نسبت قدرت کل بیشینه به قدرت کل میانگین در طول دوره‌ی اول کار رآکتور برای دو حالت داده شده است. در شکل ۷ تغییرات نسبت قدرت شعاعی بیشینه به قدرت شعاعی میانگین در طول دوره اول کار رآکتور برای دو حالت مقایسه شده‌اند. در شکل ۸ تغییرات نسبت قدرت محوری بیشینه به قدرت محوری میانگین در طول دوره‌ی اول کار رآکتور برای دو حالت نشان داده شده است. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ تغییرات محوری شار نوترون برای دو حالت را به ترتیب، در ابتدا، در اواسط و در انتهای کار رآکتور نشان می‌دهند.



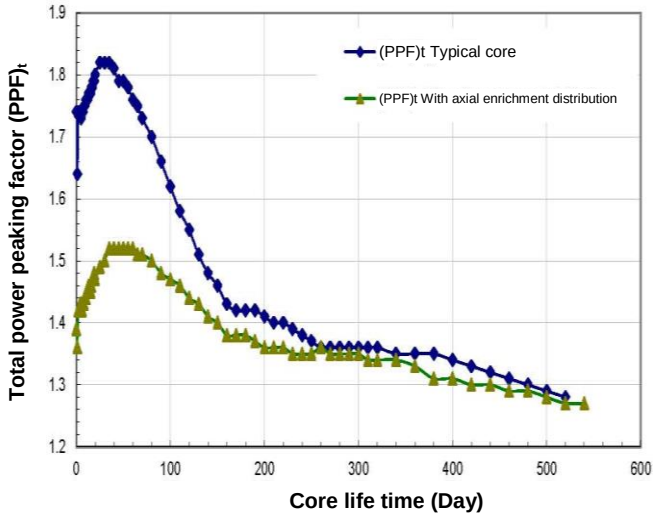
شکل ۳. روند نمای ایجاد کتابخانه‌ی سطح مقطع‌ها.



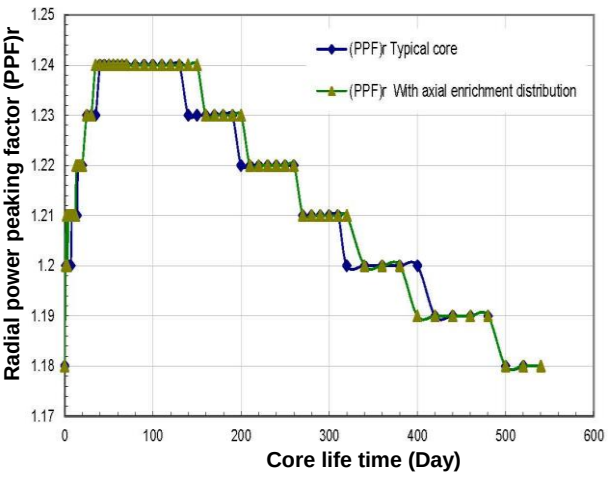
شکل ۴. روند نمای محاسبات طول دوره و انتخاب بهترین الگوی قرارگیری غناهای مختلف در راستای محوری (BD چگالی بوریک اسید و CT عنصر افزایش یا کاهش بوریک اسید برای رسیدن به حالت بحرانی).



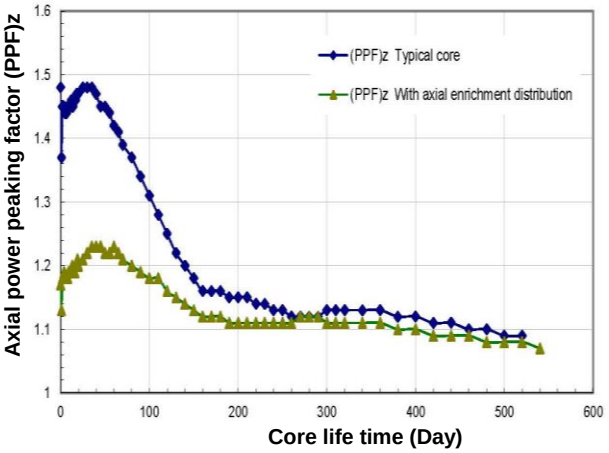
شکل ۵. تغییرات غلظت بوریک اسید در طول دوره‌ی اول کار رآکتور.



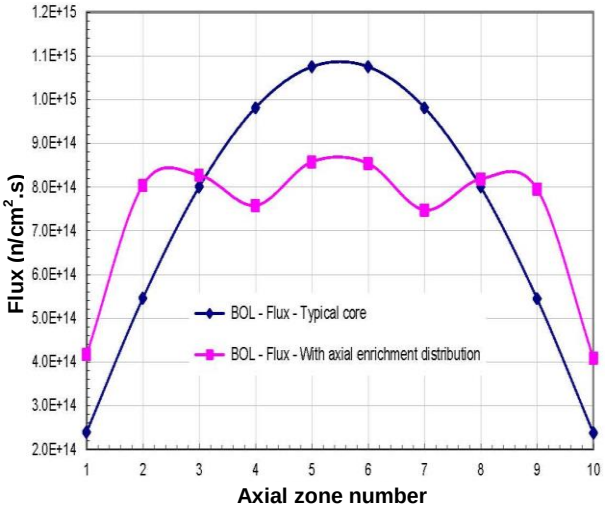
شکل ۶. تغییرات نسبت قدرت کل بیشینه به قدرت کل میانگین در طول دوره‌ی اول کار رآکتور.



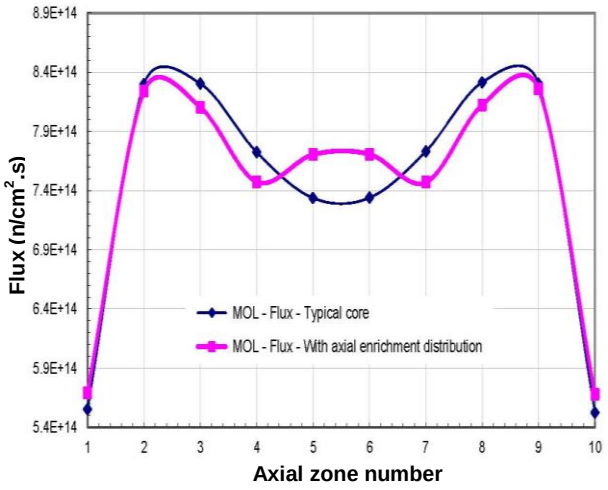
شکل ۷. تغییرات نسبت قدرت شعاعی بیشینه به قدرت شعاعی میانگین در طول دوره‌ی اول کار رآکتور.



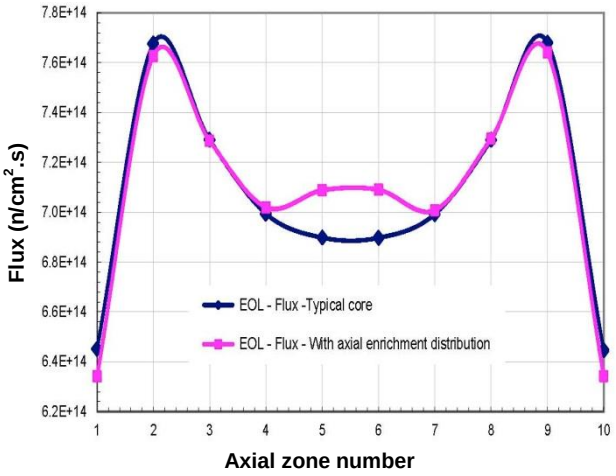
شکل ۸. تغییرات نسبت قدرت محوری بیشینه به قدرت محوری میانگین در طول دوره‌ی اول کار رآکتور.



شکل ۹. تغییرات محوری شار نوترون در ابتدای دوره‌ی اول کار رآکتور.



شکل ۱۰. تغییرات محوری شار نوترون در اواسط دوره‌ی اول کار رآکتور.



شکل ۱۱. تغییرات محوری شار نوترون در اواخر دوره‌ی اول کار رآکتور.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

نسبت قدرت میانگین به قدرت کل از جمله پارامترهای مهم در طراحی رآکتور است که به نوعی معیار مصرف سوخت و ایمنی رآکتور به حساب می‌آید. هر چه این پارامتر در راستاهای محوری و شعاعی و در کل به یک نزدیک‌تر شود، به همان اندازه آرمانی‌تر خواهد بود. زیرا مصرف سوخت یکنواخت‌تر و تغییرات در سطح رآکتور یکدست‌تر شده و در نتیجه کنترل سیستم بهتر انجام می‌شود. در رآکتوری که این تغییرات بر روی آن انجام شد در ابتدای دوره‌ی اول کار رآکتور ۳ غنا در راستای شعاعی، محوری و کل قلب رآکتور به ترتیب برابر با ۱٫۱۸٪، ۱٫۴۸٪ و ۱٫۷۴٪ بود. این در حالی است که این غناها برای

چیدمانی که در راستای محوری آن غنا تغییر داده شد و پارامترهای آرمانی به دست آمد، عبارت‌اند از ٪۱٫۱۸، ٪۱٫۱۷ و ٪۱٫۳۹.

همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر غنا در راستای محوری این نسبت‌ها به یک نزدیکتر شده‌اند. از جمله عوامل دیگری که در طراحی‌ها به آن دقت می‌شود طول کار رآکتور در دوره اول است. در رآکتور مورد نظر طول کار رآکتور در دوره‌ی اول ۵۳۰ روز محاسبه شده است در حالی که با تغییر غنا در راستای محوری در چیدمان‌های آرمانی این به ۵۵۰ روز می‌رسد که از نظر طول زمان بهره‌برداری از رآکتور مسلماً بهتر است. پارامتر دیگری که قابل بحث و بررسی است، توزیع شار محوری است. توزیع شار محوری در آغاز عمر رآکتور کسینوسی است و با گذشت زمان از حالت کسینوسی خارج شده و نسبت بیشینه‌ی مقدار آن به مقدار میانگین آن به یک نزدیک می‌شود. با تغییر غنا در راستای محوری، این حالت از همان ابتدای کار رآکتور قابل مشاهده است و شار از همان ابتدای شروع کار رآکتور نسبت به حالتی که غنا در راستای محوری ثابت است یکنواخت‌تر می‌باشد. این نکته برای تغییرات میزان مصرف سوخت در راستای محوری هم مشاهده می‌شود. این تغییرات نیز یکنواخت‌تر می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده به نظر می‌رسد که تغییر غنا در راستای محوری علاوه بر این که کمک قابل‌توجهی به بهینه‌سازی مصرف سوخت می‌کند، حتی از نظر مسائل کنترلی و اقتصاد نوترونی هم تأثیرگذار است.

References:

1. Christopher M. Regan, "US Nuclear Regulatory Commission, Certificate of compliance for radio-active material package No. 9297 and 2nd Revision," Issued to Westinghouse Electric Company, Dec.27 (2006).
2. C.J. Taubman, "The WIMS 69-group library tape 166259," AEEW-M1324 (1975).
3. T.B. Fowler, D.R. Vondy, G.W. Cunningham, "Nuclear Reactor Core Analysis Code: Citation-Ldi2 ORNL," Rev. 2 (July 1971).
4. S.M. Bowman, I.C. Gauld, J.C. Wagner, "Recommendations on fuel parameters for standard technical specifications for spent fuel storage casks," NUREG/C-6716 ORNL/Tm-2000/385 (Mar 2000).
5. J.C. Wagner, C.V. Parks, "Impact of burnable poison rods on PWR burnup credit criticality safety analyses," Trans. Am. Nucl. Soc. 83, 130-134, (Nov 2000).
6. J.C. Wagner, "Criticality analysis of assembly misload in a PWR burnup Credit Cask," NUREG/CR-6955, ORNL Tan (2008).