



بست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

ارزیابی پارامترهای سینتیکی و دینامیکی قلب راکتور تهران در طول دوره کارکرد با سوخت غنا پایین (LEU)

باقری، سمیه^۱؛ خلفی، حسین^۲؛ میروکیلی، سید محمد^۳
^۱دانشگاه اصفهان، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده راکتور

چکیده:

هدف از این مقاله بررسی تغییرات پارامترهای سینتیکی و دینامیکی قلب راکتور تحقیقاتی تهران نسبت به برنامه سوخت در محدوده ی (0-65%) و تغییر در چیدمان و اندازه قلب، از قلب اولیه تا قلب مرجع در طول دوره کارکرد با سوخت LEU می باشد. نتایج محاسبات تئوری اختلال مرتبه اول نشان می دهد با افزایش برنامه و تولید اکتیویته ها عمر نوترون های آبی با ضریب (3E-07 Sec/%Burnup) افزایش و کسر نوترون های تأخیری با ضریب (9E-06/%Burnup) کاهش یافته و ضریب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده، بترتیب با ضریب 0.011 (pcm/oC/%Burnup) افزایش و با ضریب 0.14 کاهش می یابد. همچنین با افزایش اندازه قلب عمر نوترون های آبی افزایش و کسر نوترون های تأخیری کاهش یافته و ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش و ضریب راکتیویته دمایی کندکننده کاهش می یابد.

مقدمه

با توجه به اهمیت پارامترهای دینامیکی و سینتیکی در تحلیل حوادث پایه طراحی و یا حوادث فرضی اولیه و آنالیز حساسیت پارامترهای ایمنی نظیر ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و DNBR¹ نسبت به تغییرات شرایط قلب راکتور نظیر برنامه سوخت، تغییر در چیدمان و نوع سوخت، محاسبه این پارامترها لازم و ضروری به نظر می رسد. لذا در این مطالعه ابتدا پارامترهای سینتیکی (عمر نوترون های آبی و کسر نوترون های تأخیری) و دینامیکی (ضریب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده) نسبت به تغییرات برنامه سوخت و تغییرات اکتیویته ها برای قلبی از راکتور تحقیقاتی تهران که در [1] SAR و نیز راکتور به قلب مرجع موسوم است، محاسبه شده است. سپس در مرحله دوم محاسبات به منظور بررسی تأثیرات اندازه قلب بر پارامترهای سینتیکی و دینامیکی، برای قلب های با آرایش متفاوت از قلب اولیه راکتور تحقیقاتی تهران [1] (دارای ۱۹ مجتمع سوخت) تا آرایش قلب با ۳۲ مجتمع سوخت انجام گرفته است. مدلسازی راکتور با استناد به اطلاعات جمع آوری شده از [1] SAR راکتور توسط کدهای

1- Departure from nucleat boiling (DNBR)



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

WIMSD5 [۲]، CITVAPv3.2 [۳] و BORGES v3.0 [۴] از مجموعه ی [۵] MTR-PC صورت می گیرد.

9	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
8	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
7	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
6	H ₂ O	SI E	SI E	SI E	SI E	SI E
5	SFF	SFF	SFF	CFE	SFF	SFF
4	SFE	SFE	CFE	SFE	CFE	SFE
3	SI E	SI E	SI E	CI E	SI E	SI E
2	H ₂ O	SFE	SFE	SFE	SFE	SFE
1	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
	A	B	C	D	E	F

شکل ۱. آرایش قلب تعادلی مرجع

روش کار

در این مطالعه از کد WIMSD5 جهت محاسبات سلولی برای تولید مجموعه سطح مقطع‌ها (ماکروسکوپیک یا میکروسکوپیک) استفاده می شود و برای محاسبات قلب راکتور نیز از کد CITVAP v3.2 (نسخه جدید کد CITATION-II) که معادله چند گروهی پخش نوترون را با روش اختلاف محدود (FDM) حل می نماید استفاده می شود. کد BORGESv3.0 نیز رابطی بین محاسبات سلولی و محاسبات قلب راکتور است و توسط آن می توان به سطوح مقاطع میکروسکوپی دست یافت. محاسبه پارامترهای سینتیکی توسط CITVAP با روش مبتنی بر تئوری اختلال مرتبه اول انجام می شود. این روش که نیازمند شار الحاقی برای انجام محاسبات می باشد، دقیق و دارای خطای بسیار کمی می باشد. استفاده از تئوری اختلال برای محاسبه (۱) عمر متوسط نوترونهای آنی، منجر به معادله (۱) می شود [۶]:

$$\ell = \frac{\sum_i \frac{V_i}{V(n)} \phi_{i,n}^* \phi_{i,n}}{\frac{1}{k} \sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n v \sum_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (1)$$

با دانستن عمر نوترونهای آنی، زمان تولید نوترون‌ها از معادله (۲) بدست می آید:



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

$$\Lambda = \frac{\ell}{k} \quad (2)$$

استفاده از تئوری اختلال برای بدست آوردن کسر موثر نوترونهای تاخیری برای خانواده J ام، منجر به معادله (۳) می شود [۶]:

$$\beta_{effJ} = \frac{\sum_i V_i \sum_g \chi'(j, g) \phi_{i,g}^* \sum_b \beta_{b,j} N_{b,i} \sum_n v \sigma_{f,n,b,i} \phi_{i,n}}{\sum_i V_i \sum_g \chi(g) \phi_{i,g}^* \sum_n v \sum_{f,n} \phi_{i,n}} \quad (3)$$

که در آن i به مکان، V به حجم، g و n به گروه‌های انرژی، ϕ به شار و ϕ^* به شار الحاقی اشاره دارد. همچنین، $\beta_{b,j}$ کسر نوترونهای تاخیری گروه j در مکان i و برای هسته b می باشد. $N_{b,i}$ چگالی هسته b در مکان i و $\chi'(j, g)$ تابع توزیع نوترونهای تاخیری را نشان می دهد. برای محاسبه کسر موثر نوترونهای تاخیری و زمان تولید نوترونها توسط بسته MTR_PC، بایستی ابتدا محاسبات سلولی را انجام داد تا مجموعه سطح مقطع های میکروسکوپی برای هر یک از ایزوتوپهای موجود در محاسبات به دست آورده شود. سپس این مجموعه سطح مقطع های میکروسکوپی توسط کد BORGES مورد استفاده قرار گرفته و فایل های مورد نیاز کد CITVAP برای انجام محاسبات سینتیکی را تهیه می کند.

نتایج

۱- پارامترهای سینتیکی و دینامیکی بر حسب برناپ سوخت

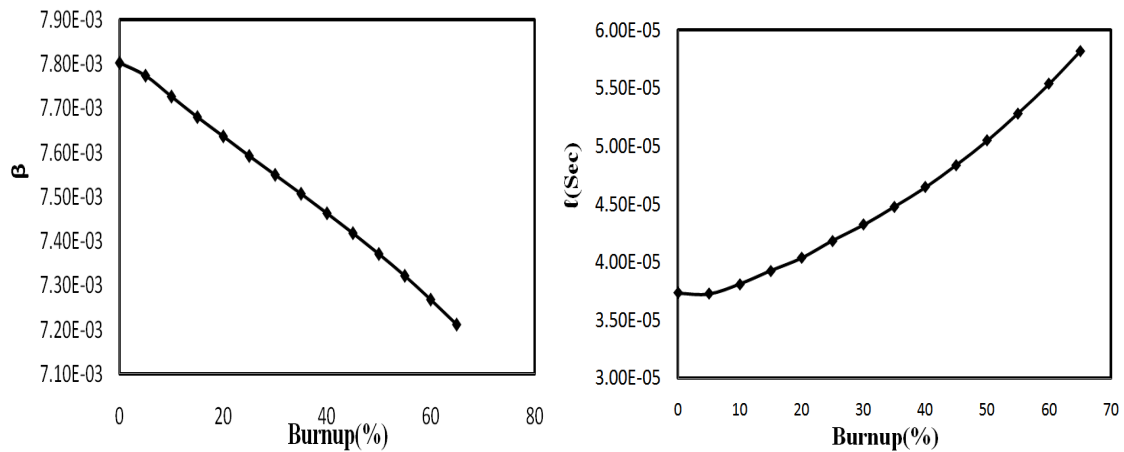
در این قسمت با ثابت فرض کردن شرایط قلب مرجع، آنالیز تغییرات پارامترهای سینتیکی و دینامیکی نسبت به برناپ سوخت انجام می گیرد. برای محاسبه پارامترهای سینتیکی همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود با افزایش درصد برناپ از 0 تا 65 درصد محدوده تغییرات عمر نوترون های آنی (3.73E-05 - 5.82E-05 Sec) و کسر نوترون های تاخیری (7.80E-03 - 7.21E-03) می باشد. نتایج بیانگر این است که عمر نوترون های آنی افزایش و کسر نوترون های تاخیری کاهش یافته است. با توجه به تئوری محاسبه پارامترهای سینتیکی مبتنی بر تئوری تخلخل که در بالا به آن اشاره شده است، کسر نوترون های تاخیری باید به صورت میانگین بندی های با وزن مناسب در ترکیب سوخت محاسبه شوند. در واقع این کسر نوترون های تاخیری میانگین بندی شده با توجه به معادله (۳)، با افزایش عمر قلب، کاهش پیدا خواهند کرد چرا که رایج ترین مواد شکافت پذیر تولید شده نظیر Pu^{239} و Pu^{241} و U^{238} (توزیع کسر نوترون های تاخیری برای هر یک از ایزوتوپ ها در جدول ۲ آورده شده است). نسبت به U^{235} درصد تولید نوترون های تاخیری تاحدی پایین تر دارند. از طرفی با توجه به شکل (۲) به



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

دلیل کاهش $\nu \Sigma_f$ در نتیجه جذب نوترون در ایزوتوپ های شکافت پذیر، با توجه به معادله (۱) عمر نوترون های آبی در نتیجه افزایش برناپ سوخت افزایش می یابد.



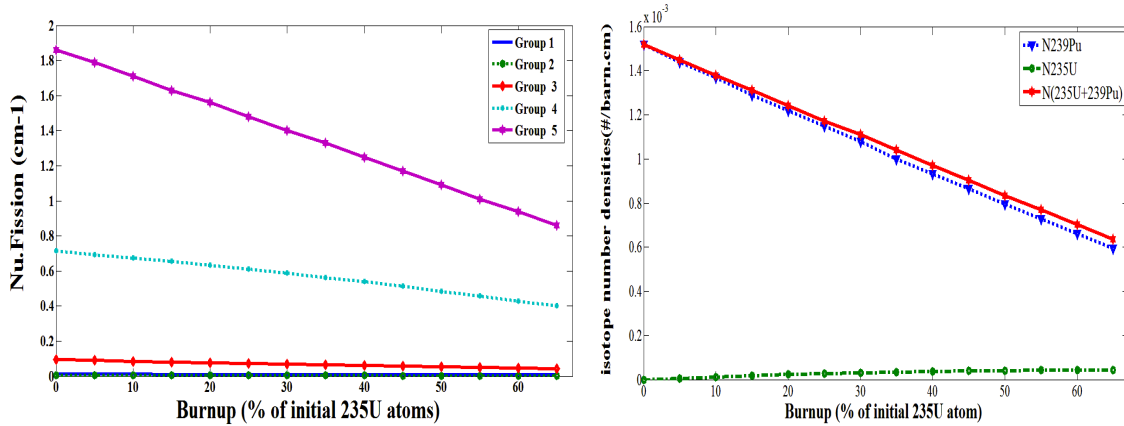
شکل ۱. تغییرات عمر نوترون های آبی و کسر نوترون های تأخیری بر حسب برناپ سوخت

در این قسمت با ثابت فرض کردن شرایط قلب راکتور، آنالیز تغییرات پارامترهای دینامیکی قلب راکتور نسبت به برناپ سوخت با در نظر گرفتن قلب مرجع راکتور تهران [1] انجام می گیرد. همانطور که در نمودارهای (۲) مشاهده می شود با افزایش در صد برناپ از 0 تا 65 درصد محدوده تغییرات ضرایب راکتیویته دمایی سوخت (-2.617 to -1.898 pcm/ $^{\circ}$ C) و کندکننده (-31.824 to -23.216) می باشد. ضریب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده هر دو افزایش یافته است. با توجه به تغییرات ایزوتوپی سوخت U^{238} در نتیجه جذب نوترون و U^{235} نیز در نتیجه شکافت در طی مصرف سوخت کاهش یافته اند، اما شیب کاهش U^{235} نسبت به U^{238} بیشتر است در نتیجه با افزایش برناپ به طور نسبی U^{238} افزایش می یابد که باعث تأثیر بیشتر اثر دوپلر شده و در نتیجه ی آن ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش یافته است. از طرفی با افزایش مصرف سوخت و کاهش U^{235} نسبت کندکننده به سوخت افزایش یافته در نتیجه ضریب راکتیویته دمایی کندکننده نیز افزایش یافته است. شکل (۳) تغییرات ضرایب راکتیویته دمایی را بر حسب برناپ سوخت نشان می دهد.

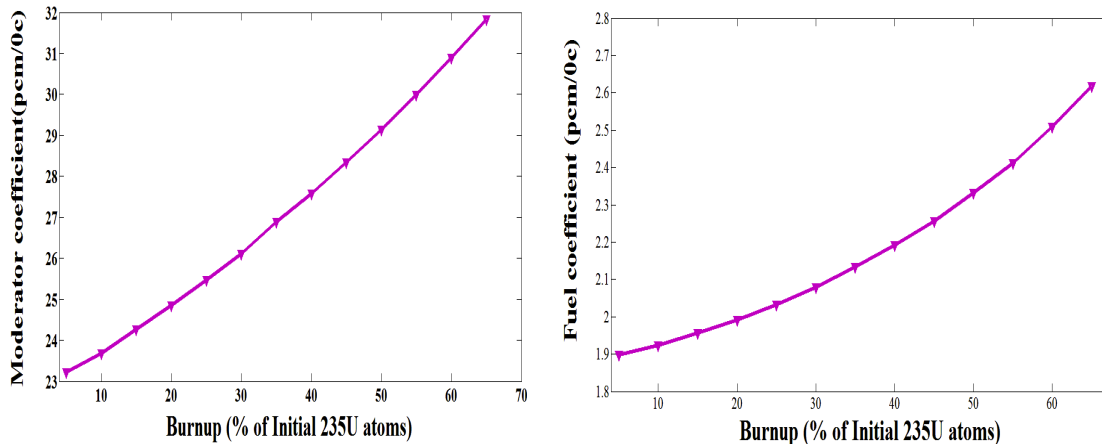


بیست و یکمین کنفرانس هفت‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل ۲. تغییرات $\nu \Sigma_f$ و دانسیته ایزوتوپی بر حسب برناب سوخت



شکل ۳. تغییرات ضریب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده بر حسب برناب سوخت

پارامترهای سینتیکی و دینامیکی بر حسب اندازه قلب

در این قسمت با ثابت فرض کردن شرایط قلب راکتور با افزایش تعداد مجتمع های سوخت استاندارد (SFE) آنالیز تغییرات پارامترهای سینتیکی و دینامیکی قلب راکتور نسبت به اندازه آن انجام می گیرد. همانطور که در جدول (۱) مشاهده می شود با افزایش تعداد مجتمع های سوخت، در نتیجه افزایش اندازه قلب، عمر نوترون های آنی افزایش و کسر نوترون های تأخیری کاهش یافته است. باتوجه به اینکه از بین رفتن نوترون ها از دو طریق جذب و نشت صورت می گیرد و با افزایش اندازه قلب راکتور و کاهش نسبت سطح به حجم راکتور نشت کاهش یافته، در نتیجه عمر نوترونهای آنی افزایش می یابد، از طرفی با افزایش اندازه قلب و باتوجه به اینکه طیف نوترون های آنی نسبت به طیف نوترون های تأخیری سخت تر است و نوترون های تأخیری تنها کمتر از ۱٪ از کل نوترونها می باشند، بنابراین میزان افزایش نشت نوترون های آنی نسبت به نوترون های تأخیری بیشتر بوده در نتیجه، کسر نوترونهای تأخیری با افزایش اندازه قلب و کاهش نشت، کاهش می یابد. همانطور که در



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول (۱) نیز مشاهده می شود با افزایش اندازه قلب ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش و ضریب راکتیویته دمایی کندکننده کاهش می یابد. با توجه به افزایش اندازه قلب با افزایش تعداد مجتمع سوخت که دارای اورانیوم با

جدول ۱. نتایج حاصل از محاسبات پارامترهای دینامیکی برای ۴ قلب ترکیبی و قلب اولیه

شماره قلب های ترکیبی				First core		پارامتر
4	3	2	1	Calculate d	SAR	
-1.57	-1.51	-1.53	-1.54	-1.67	-1.4 to -2.0	ضریب راکتیویته دمایی سوخت ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)
-21.56	-22.96	-23.12	-23.04	-26.17	-18.3 to -33.8	ضریب راکتیویته کندکننده ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)
29.13	32.14	32.60	33.04	0	0	متوسط برناپ (درصد)

غناي ۲۰٪ می باشند به طور نسبی U^{238} به میزان بیشتری در قلب بارگذاری می گردد، که باعث تأثیر بیشتر اثر دوپلر شده و ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش یافته است. از طرفی با افزایش اندازه قلب در نتیجه بارگذاری سوخت نسبت کندکننده به سوخت کاهش یافته در نتیجه ضریب راکتیویته دمایی کندکننده نیز کاهش یافته است.

نتیجه گیری

در این مقاله تغییرات پارامترهای سینتیکی و دینامیکی قلب راکتور تحقیقاتی تهران نسبت به برناپ سوخت و تغییر در چیدمان و اندازه قلب، از قلب اولیه تا قلب مرجع بررسی گردید. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش درصد برناپ سوخت عمر نوترون های آبی، ضرایب راکتیویته سوخت و کندکننده افزایش یافته اند که در جهت بهبود پارامترهای ایمنی می باشد، از طرفی کسر نوترون های تأخیری با افزایش برناپ کاهش می یابد که در جهت عکس ایمنی می باشد. همچنین با افزایش اندازه قلب راکتور، ضریب راکتیویته دمایی سوخت افزایش می یابد، در حالی که کسر نوترون های تأخیری، عمر نوترون های آبی و ضریب راکتیویته دمایی کندکننده دارای روند کاهشی می باشند.



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

مراجع

- [1]. *Invap, TRR Safety Analysis Report, (1989)*
 [2]. *UK., Wims D5 Code the Preparation of Input Data for Wims(1980).*
 [3]. *Invap, Nuclear engineering division, MTR_PC, "BORGES v3.0", (1993).*
 [4]. *Invap, Nuclear engineering division, MTR_PC, Reactor calculation code, "Citvap v3.1", (1999).*
 [5]. *Invap S.E., Nuclear engineering division, " Neutronic section of MTR_PC vers.3.0", (2001).*
 [6]. *Nuclear Reactor Analysis Code, "Citation Code", ORNL-4078, Rev. 2 ORNL-TM-2496, (1969).*

جدول ۲. توزیع کسر نوترون‌های تأخیری به ازای هر یک از ایزوتوپ‌ها و عمر نوترون‌های آنی

Burnup (%)	β_{eff}						Prompt Neutron Lifetime(sec)
	U^{235}	U^{238}	Pu^{239}	Pu^{240}	Pu^{241}	Total	
0	7.70E-03	1.10E-04	4.32E-22	1.14E-19	6.07E-17	7.80E-03	3.73E-05
5	7.63E-03	1.17E-04	2.62E-05	2.77E-09	6.17E-08	7.77E-03	3.73E-05
10	7.56E-03	1.18E-04	5.14E-05	1.06E-08	4.83E-07	7.73E-03	3.81E-05
15	7.48E-03	1.20E-04	7.65E-05	2.3E-08	1.60E-06	7.68E-03	3.92E-05
20	7.41E-03	1.22E-04	1.00E-04	3.93E-08	3.71E-06	7.64E-03	4.04E-05
25	7.34E-03	1.24E-04	1.25E-04	5.90E-08	7.12E-06	7.59E-03	4.19E-05
30	7.26E-03	1.26E-04	1.48E-04	8.18E-08	1.20E-05	7.55E-03	4.33E-05
35	7.19E-03	1.28E-04	1.71E-04	1.08E-07	1.87E-05	7.51E-03	4.48E-05
40	7.11E-03	1.31E-04	1.95E-04	1.36E-07	2.74E-05	7.46E-03	4.65E-05
45	7.03E-03	1.34E-04	2.19E-04	1.67E-07	3.84E-05	7.42E-03	4.84E-05
50	6.94E-03	1.37E-04	2.43E-04	2.00E-07	5.19E-05	7.37E-03	5.05E-05
55	6.84E-03	1.40E-04	2.68E-04	2.36E-07	6.83E-05	7.32E-03	5.28E-05
60	6.74E-03	1.44E-04	2.95E-04	2.75E-07	8.81E-05	7.27E-03	5.54E-05
65	6.63E-03	1.49E-04	3.22E-04	3.17E-07	1.12E-04	7.21E-03	5.82E-05