محاسبه ضریب پیک قدرت و توزیع طیف نوترون نیروگاه اتمی بوشهر در سیکل اول

رعنا سلیمی*، جمشید خورسندی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتورها و شتابدهنده‌ها

چکیده

سوخت‌گذاری در راکتورهای هسته‌ای می‌تواند بصورت حلقه‌ای، بسته‌ای و یا شطرنجی باشد. سوخت‌گذاری شطرنجی به دلیل مزایای آن بیشتر متداول است. در نیروگاه بوشهر نیز از این روش استفاده می‌شود. در این نوع سوخت‌گذاری، سوخت با درجه غنای بیشتر در اطراف قلب گذاشته می‌شود و سوختهای باقی مانده بصورت شطرنجی در داخل قلب چیده می‌شوند بطوریکه یک مجتمع سوخت با راکتیویته زیاد با چهار مجتمع سوخت با راکتیویته کم احاطه می‌شود. این عمل به منظور ایجاد توزیع دانسیته قدرت یکنواخت و جلوگیری از افزایش پیک قدرت موضعی صورت می‌گیرد. نظر به اهمیت ایمنی راکتور در حین کار، لازم است محاسبات نوترونیک جهت حصول اطمینان از چگونگی توزیع شار و میزان قدرت تولیدی در هر مجتمع سوخت انجام شود. بدین ترتیب با توجه به چیدمان سوخت در قلب راکتور بوشهر و با شبیه‌سازی هندسی قلب راکتور توسط کدهای محاسباتی WIMSD5b و CITATION ، ضریب پیک قدرت در هر مجتمع سوخت در ابتدای سیکل اول راکتور محاسبه می‌شود. همچنین توزیع شار نوترون در قلب راکتور نیز بررسی می‌شود. ضریب پیک قدرت در اطراف قلب که سوخت با غنای بیشتر قرار گرفته، بیشتر است که مقدار ماکزیمم آن با توجه به مدرک Final Safety Analysis Report NPP Bushehr ، ۱/۴۸ می‌باشد. با محاسبات انجام شده توسط کدهای WIMSD5b و CITATION این مقدار با حدود ٪۶ خطا ۱/۵۷ محاسبه می‌شود. همچنین شار نوترون در اطراف قلب بیشتر است و هر چه به سمت داخل قلب می‌رویم کاهش می‌یابد.

کلید واژه: ضریب پیک قدرت، مجتمع سوخت، کد محاسباتی WIMSD5b، کد محاسباتی CITATION، طیف نوترون

Archive of SID

مقدمه

یکی از فاکتورهای مهم در مدیریت سوخت هر راکتور اتمی، نحوه چیدمان سوخت است بطوریکه با هزینه حداقل و رعایت نکات ایمنی بتوان به مصرف بهینه دست یافت. نیروگاه اتمی بوشهر از نوع VVER-1000 است که مشابه راکتورهای PWR غربی است. مهم‌ترین تفاوت بین راکتورهای VVER-1000 و PWR در نحوه قرار گیری میله‌های سوخت نسبت به یکدیگر است. بدین صورت که در راکتورهایPWR میله‌های سوخت بصورت مربعی و با فاصله معینی در کنار هم قرار می‌گیرند و تشکیل یک مجتمع سوخت را می‌دهند در حالیکه در راکتورهای VVER-1000 میله‌های سوخت بصورت مثلثی تشکیل یک مجتمع سوخت را می‌دهند. [1]

www.SID.ir

یکی از فاکتورهای مؤثر در بهره‌برداری بهینه از سوخت در راکتورهای قدرت، استفاده از مجتمع‌های سوخت با غناهای متفاوت است. این امر موجب کاهش حداکثر شار نوترون‌ها در اطراف مجتمع‌های سوخت می‌شود. در نیروگاه اتمی بوشهر از مجتمع‌های سوخت با غناهای متفاوت استفاده می‌شود در سیکل اول مجتمع‌های سوخت با غنای ۳/۶۲٪ ، در اطراف قلب قرار می‌گیرند و مجتمع‌های سوخت با غنای ۱/۶٪ و ۲/۴٪ در قسمت مرکزی چیده می‌شود. همچنین جهت نگهداری راکتور به حالت بحرانی، از میله‌های کنترل و مواد جاذب استفاده می‌شود. بدین ترتیب هفت نوع مجتمع سوخت در سیکل اول وجود دارد. هر مجتمع سوخت راکتور بوشهر شامل ۳۱۱ میله سوخت، ۱۸ لوله هادی میله‌های کنترل و جاذب سوختی، یک لوله جهت ابزار اندازه‌گیری درجه حرارت و فلاکس نوترون‌ها و یک لوله در وسط آن که سیال خنک کننده از آن عبور می‌کند، می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات مجتمع‌های سوخت، در جدول ۲ مشخصات قلب و مجتمع‌های سوخت راکتور بوشهر مشاهده می‌شود. قلب راکتور بوشهر شامل ۱۶۳ مجتمع سوخت است که به شکل شش گوش چیده می‌شود و چیدمان سوخت دارای تقارن یک ششم است. در شکل ۱ نوع سوخت واقع در هر مجتمع سوخت، برای یک ششم قلب راکتور مشاهده می‌شود.[2]

جدول۱. مشخصات انواع سوختهای راکتور بوشهر در سیکل اول

نوع مجتمع سوخت	متوسط غنای سوخت(٪)	تعداد میله‌های سوخت نوع اول (غنای سوخت)	تعداد میله‌های سوخت نوع دوم (غنای سوخت)	جاذب سوختی	تعداد جاذب سوختی در مجتمع سوخت	غلظت بورون در جاذب سوختی (gr/cm^3)
16	1.6	311(1.6)	–	–	–	–
24	2.4	311(2.4)	–	–	–	–
36	3.62	245(3.7)	66(3.3)	–	–	–
24B20	2.4	311(2.4)	–	+	18	0.020
24B36	2.4	311(2.4)	–	+	18	0.036
36B36	3.62	245(3.7)	66(3.3)	+	18	0.036

جنس لوله‌های هادی، کانال تجهیزات اندازه‌گیری درجه حرارت و فلاکس، کانال مرکزی و شبکه نگهدارنده میله‌های سوخت Zr+1%Nb است. مواد جاذب میله‌های کنترل راکتور بوشهر ترکیب Dy_2O_3-TiO_2 و B_4C می‌باشد و میله‌های جاذب سوختی ترکیب کربید بور و آلومینیم است

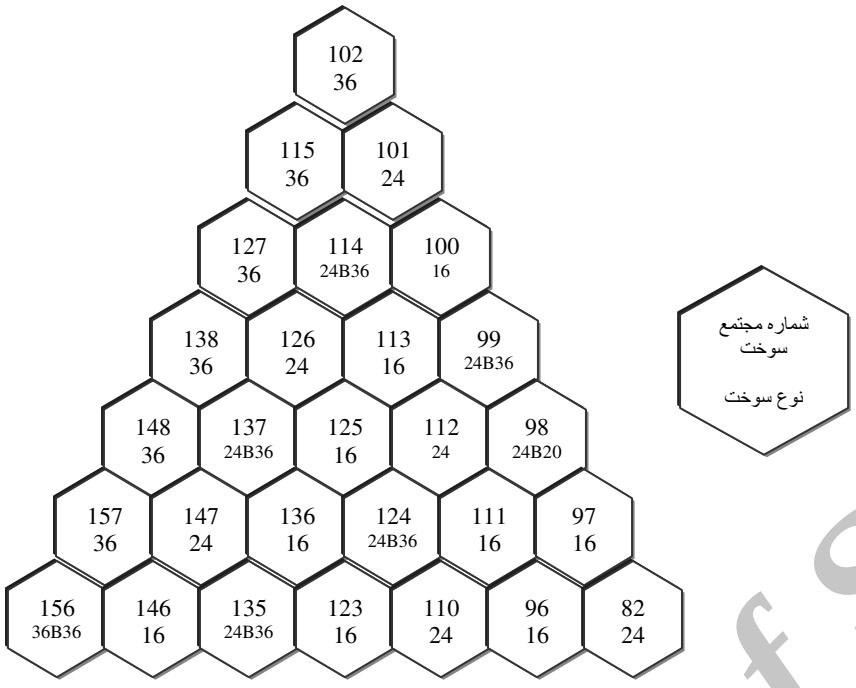
Archive of SID
www.SID.ir

جدول۲. مشخصات قلب و مجتمع‌های سوخت راکتور بوشهر

پارامتر		واحد
قلب		
تعداد مجتمع‌های سوخت در داخل قلب	۱۶۳	pcs
تعداد سوختهای شامل میله کنترل در اولین سوخت‌گذاری	۸۵	pcs
تعداد سوختهای شامل میله جاذب سوختی در اولین سوخت‌گذاری	۴۲	pcs
جرم سوخت (UO_2) در یک سیکل	۷۹۸۷۰	Kg
گام شبکه	۲۳/۶	Cm
ارتفاع قلب در حالت نرمال	۳۵۵	Cm
ارتفاع قلب در حالت سرد	۳۵۳	Cm
قطر معادل قلب	۳۱۶	Cm
مجتمع سوخت		
حداکثر قدرت تولیدی	۲۷	Mw
شکل مجتمع‌های سوخت	شش ضلعی	
نحوه قرارگیری میله‌های سوخت	مثلثی	
ارتفاع مجتمع سوخت	۴/۵۷	m
نوع سوخت	UO_2	
چگالی وزنی سوخت	۱۰/۴-۱۰/۷	g/m^3
ارتفاع سوخت در حالت سرد	۳۵۳	Cm
غنای سوخت	٪	۱/۶ ،۲/۴ ،۳/۳ ،۳/۷ ،۴/۱
گام شبکه	mm	۱۲/۷۵
تعداد میله‌های سوخت یک مجتمع سوخت	pcs	۳۱۱
جرم سوخت موجود در یک میله سوخت	Kg	۱.۵۷۵
جنس غلاف سوخت	Zr+1%Nb	
قطر خارجی غلاف	mm	۹/۱
قطر داخلی غلاف	mm	۷/۷۳
جنس قرص سوخت	UO_2	
قطر خارجی قرص سوخت	mm	۷/۵۷
قطر سوراخ موجود در قرص سوخت	mm	۱/۵
ارتفاع قرص سوخت	mm	۱۱

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱. نوع سوخت واقع در هر مجتمع سوخت برای یک ششم قلب راکتور.

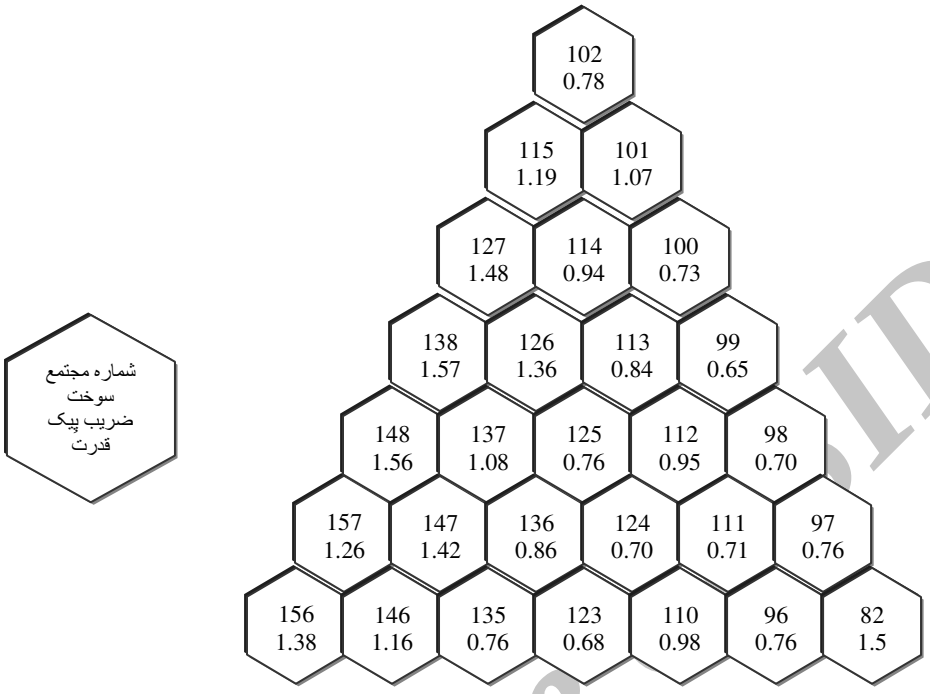
روش کار

جهت اندازه‌گیری توزیع شار نوترون و ضریب پیک قدرت در راکتور بوشهر باید معادلات ترابرد را حل کرد. حل این معادلات توسط روشهای یقینی در کل راکتور و منظور کردن جزئیات آن و نیز بدلیل وابستگی سطوح مقاطع به انرژی، در عمل ممکن نیست. بدین منظور از کدهای محاسباتی استفاده می‌شود و روش حل به دو مرحله محاسبات سلولی و محاسبات قلب تقسیم می‌شود. محاسبات سلولی با کد WIMSD5b [3] و محاسبات قلب با کد CITATION [4] انجام می‌شود. ثابتهای گروهی حاصل از محاسبات سلولی، برای محاسبه ضرایب معادلات مرحله دوم بکار می‌روند. محاسبات قلب راکتور بوشهر برای یک ششم آن با کد CITATION و با استفاده از سطح‌مقطع‌های حاصل از خروجی کد WIMSD5b در دو گروه سریع و حرارتی انجام شده است. بدین ترتیب ضریب تکثیر مؤثر راکتور و توان تولیدی درهر یک از مجتمعهای سوخت در حالت Hot Full Power راکتور، محاسبه شده است. با توجه به متوسط توان در هر مجتمع سوخت، می‌توان ضریب پیک قدرت را در هر مجتمع سوخت محاسبه کرد. شکل ۲ ضریب پیک قدرت را در هر مجتمع سوخت برای یک ششم قلب راکتور نشان می‌دهد و در شکلهای ۳ و ۴ شار نوترون حرارتی وسریع در هر مجتمع سوخت، در ابتدای سیکل اول و برای یک ششم قلب آمده است. شار نوترون در حالت Hot Full Power از مرتبه $۱۰^{۱۴}$ و در حالت Cold Zero Power از مرتبه $۱۰^{۱۰}$می‌باشد.

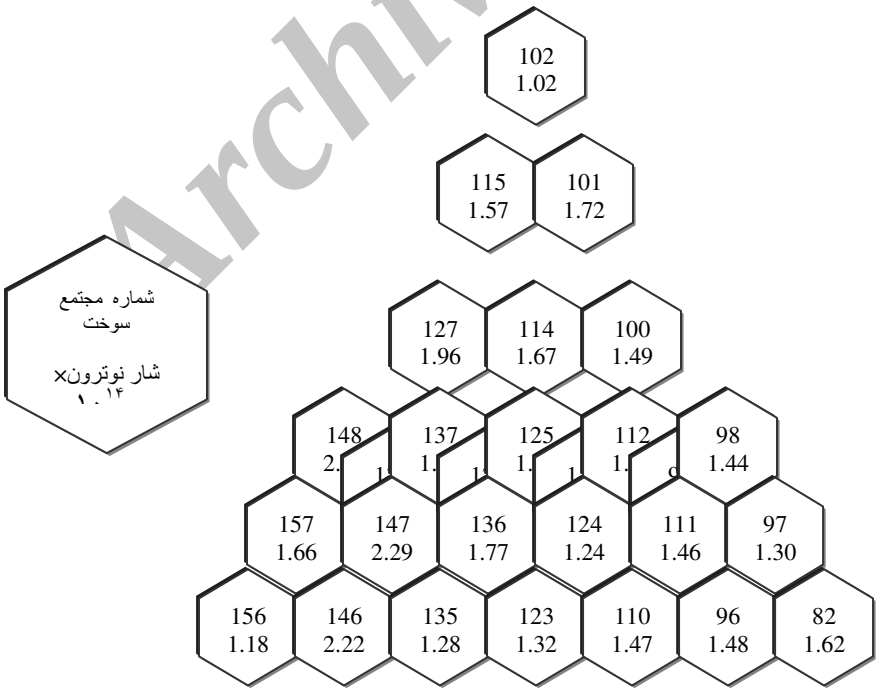
برای رسم طیف نوترون لازم است تمام قلب راکتور توسط کدCITATION شبیه‌سازی شود. لذا تمام قلب راکتور را شبیه‌سازی کرده و سپس با استفاده از داده‌های خروجی کد، نمودار توزیع شار نوترون در مرکز

Archive of SID
www.SID.ir

فیزیکی قلب راکتورترسیم می‌شود. نمودار شار برای دو گروه سریع و حرارتی رسم شده‌است. شکل۴ نمایانگر طیف نوترون سریع و حرارتی در راکتور بوشهر است.

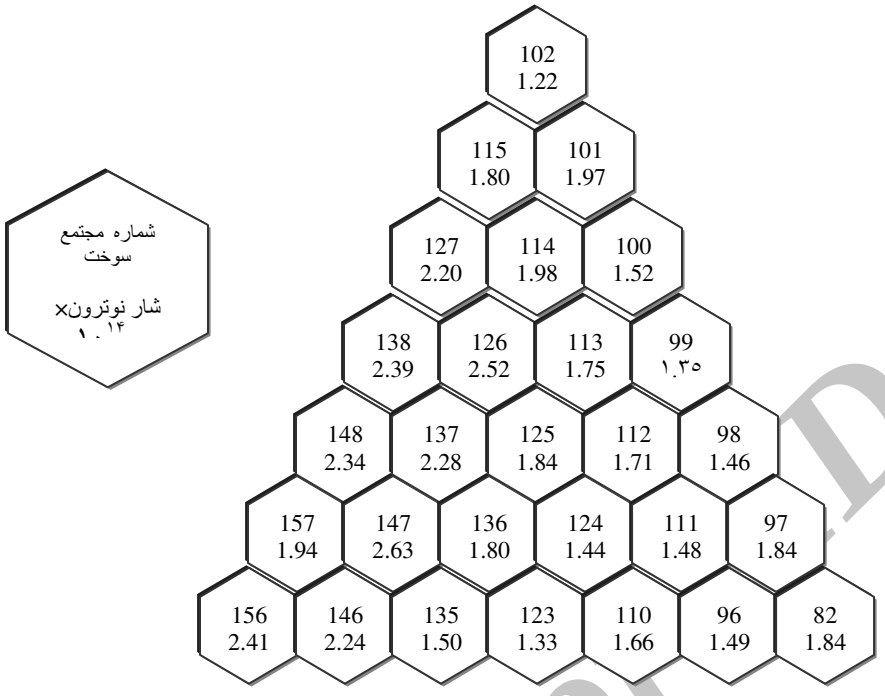


شکل ۲. ضریب پیک قدرت در حالت Hot Full Power در هر یک از مجتمع‌های سوخت



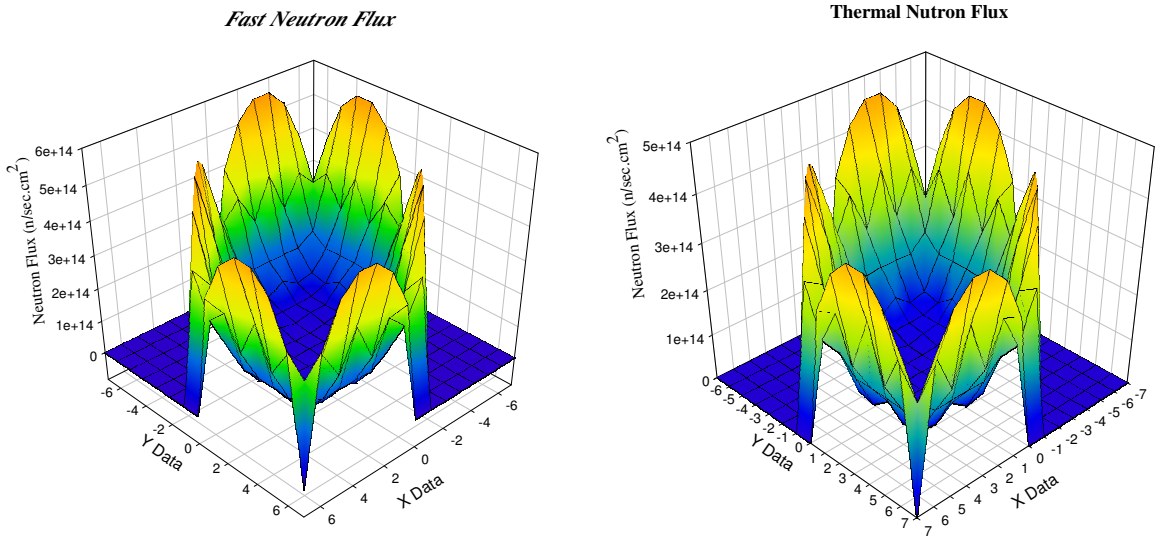
شکل۳. شار نوترون حرارتی در هر مجتمع سوخت در حالت Hot Full Power در ابتدای سیکل اول

Archive of SID
www.SID.ir



شکل۴. شار نوترون سریع در هر مجتمع سوخت در حالت Hot Full Power در ابتدای سیکل اول

Archive of SID



شکل۵. نمودار توزیع شار نوترون حرارتی و سریع در مرکز فیزیکی راکتور بوشهر در حالت Hot Full Power

www.SID.ir

بحث و نتیجه‌گیری

درراکتور بوشهر سوخت‌گذاری به نحوی است که سوخت با درجه غنای بیشتر در اطراف قلب گذاشته می‌شود و سوختهای باقی مانده بصورت شطرنجی در داخل قلب چیده می‌شوند بطوریکه یک مجتمع سوخت با راکتیویته زیاد با چهار مجتمع سوخت با راکتیویته کم احاطه می‌شود. این عمل در راستای ایمنی راکتور و به منظور ایجاد توزیع دانسیته قدرت یکنواخت و جلوگیری از افزایش پیک قدرت موضعی صورت می‌گیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که توزیع قدرت در قلب راکتور بوشهر نسبتا" یکنواخت است. همچنین ضریب پیک قدرت در اطراف قلب که سوخت با غنای بیشتر قرار گرفته، بیشتر است که مقدار ماکزیمم آن با توجه به مدرک Final Safety Analysis Report ، ارئه شده توسط روسها، ۱/۴۸ می‌باشد. با محاسبات انجام شده توسط کدهای WIMSD5b و CITATION این مقدار با حدود ٪۶ خطا ۱/۵۷ محاسبه می‌شود.

برای رسم نمودار توزیع شار نوترون لازم است کل قلب راکتور توسط کد CITATION شبیه‌سازی شود. در این صورت خروجی کد شامل توزیع توان و شار نوترونی درنقاط مختلف قلب و در ارتفاعات مختلف سوخت می‌باشد. شکل۵ طیف توزیع شار نوترون سریع و حرارتی قلب راکتور را در مرکز فیزیکی آن و در حالتHot Full Power نمایش می‌دهد. شارنوترون و توان در اطراف قلب که مجتمع‌های سوخت با غنای بیشتر واقع شده‌اند، بیشتر است و هر چه به سمت داخل برویم شار و توان کاهش می‌یابد. در ارتفاعات دیگرسوخت رفتار طیف مشابه است با این تفاوت که قله پیک کوتاهتر می‌شود.

مراجع

۱. خزانه، رضا، روشن ضمیر، منوچهر، سوخت هسته ای با تکیه بر استفاده آن در راکتورهای آب تحت فشار، ۱۳۷۶

2. Atomic Enrgey Organizatiom Of Iran, Nuclear Power Plant Division , NPP Bushehr, Final Safety Analysis Report, October 2003

3. Halsall M.J, A Summary Of WIMSD4 Input Options , 1967

4.Natinoal Enregy Software Center Note, CITATION, NESC no. 387, July, 1980

Archive of SID
www.SID.ir