طراحی بانک میله های کنترل و بررسی اثر سایه اندازی در یک راکتور ماژولار کوچک فاقد بور محلول نمونه

INC29-1273

محمدرضا عباسی، مهرداد فلاح *

دانشگاه شهیدبهشتی، گروه مهندسی راکتور، تهران ، ایران

چکیده:

امروزه، راکتورهای ماژولار کوچک در بسیاری از کشورها، به دلیل مزایایی نظیر پتانسیل استقرار کوتاه مدت و قابلیت حمل و نقل، صرفه‌ی اقتصادی راه اندازی، طول سیکل سوخت بالاتر،گردش طبیعی جریان خنک کننده، ویژگی‌های ایمنی بالاتر نسبت به راکتورهای قدرت بزرگ مقیاس و بسیاری از مزایای دیگر مورد توجه قرار گرفته‌اند. به‌دلیل حذف اسید بوریک در این نوع راکتورها، طراحی و نحوه چینش میله‌های کنترل از چالش‌های مهم طراحی قلب آنها می‌باشد. میله‌های کنترل، شامل صفحات یا میله‌هایی حاوی ماده‌ی جاذب نوترون (با سطح مقطع جذب نوترون بالا) می‌باشند که به منظور اهداف متنوعی همچون کنترل راکتیویته، تغییر سطح توان یا خاموشی سریع راکتور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، قلب یک راکتور ماژولار کوچک نمونه را در نظر گرفته و پس از مدلسازی نوترونیکی آن با کدهای مرسوم نظیر WIMSD5 و PARCS، محل قرارگیری و نوع بانک میله های کنترل باتوجه به اثر سایه‌اندازی در قلب مشخص می‌گردد.

کلیدواژه ها : راکتور ماژولار کوچک، میله‌های کنترل، اثر سایه‌اندازی

Design of control rod banks and study of shadowing effect in a typical soluble boron free small modular reactor

M.R. Abbasi, M. Fallah*

Shahid Beheshti university, Tehran, Iran

Abstract:

Nowadays, small modular reactors (SMRs) are getting attention by many countries especially those based on LWRs technology for the potential of their near-term deployment, transportability, economical start-up, higher fuel cycle length, natural cooling flow circulation, higher safety features than large power reactors. Due to the elimination of boric acid in this type of reactors, the design and arrangement of control rods is one of the important challenges of their core design. Control rods are used for a variety of purposes to control reactivity for power maneuvering, or reactor scram. A control rod is inserted into or out of the core to increase or decrease reactivity (increase or decrease neutron flux) and thus effects on thermal and electrical power. In this research, a small modular reactor core is considered and after its neutronic modeling with conventional codes such as WIMSD5 and PARCS, the location and type of control rods are determined according to the shadowing effect in the core.

Keywords: Control rods, SMR, Neutronic, Shadowing Effect

۱. مقدمه

راکتورها همیشه بحرانی نیستند. برای مثال لازم است که راکتور برای راه‌اندازی یا افزایش سطح توان، فوق بحرانی باشد؛ درحالی که برای خاموشی یا کاهش توان، باید زیربحرانی باشد. از آن‌جایی که ضریب تکثیر قلب طی بهره‌برداری، در نتیجه‌ی فرآیندهای نظیر تولید فرآورده‌ی شکافت و مصرف سوخت تغییر می‌کند، راکتورهای هسته‌ای باید ابتدا با مقدار بیشتری سوخت (از مقدار مورد نیاز) بارگذاری شود. این راکتیویته‌ی مثبت اضافی همچنین برای جبران راکتیویته‌ی منفی ناشی از تغییرات دمایی و قدرت لازم است. سوخت گذاری یا غنی سازی براساس ایجاد راکتیویته‌ی بیش از حد کافی تعیین می‌شوند، تا امکان بهره‌برداری در قدرت کامل در فرآیند زمانی مشخص وجود داشته باشد. برای مقابله با این راکتیویته‌ی مثبت بیش از حد ناشی از سوخت و غنی سازی، ورود یک مقدار راکتیویته‌ی منفی در قلب لازم و ضروری است تا بتوان بطور دلخواه راکتیویته را تنظیم و کنترل کرد.

از راکتیویته‌ی کنترلی برای مقابله با راکتیویته‌ی بیش از حد قلب در زمان بهره‌برداری طولانی مدت، تنظیم سطح قدرت راکتور برای رساندن قدرت به سطح قدرت نامی، رفتار قلب مطابق با بار شبکه و برای خاموش کردن قلب استفاده می‌شود. درجه‌ی بحرانیت راکتور معمولا با استفاده از میله‌های کنترل[۱] یا ترازدهنده‌ی شیمیایی[۲] و جاذب‌های سوختنی تنظیم می‌شود. میله‌های کنترل قطعات یا مجتمع‌هایی از مواد جاذب نوترون هستند که حرکت آن‌ها بر ضریب تکثیر سیستم تاثیر می‌گذارد.

میله‌های کنترل به دو جهت مورد استفاده قرار می‌گیرند: الف) برای تغییر درجه‌ی بحرانیت راکتور به منظور افزایش یا کاهش سطح توان. ب) برای بحرانی نگه‌داشتن یک راکتور با جبران تغییرات در خواص سیستم که در طول عمر قلب اتفاق می‌افتد. ارزش میله‌ای که برای بحرانی نگه‌داشتن یک راکتور استفاده می‌شود، برحسب تغییر در ضریب تکثیر سیستمی که میله می‌تواند آن را جبران کند اندازه‌گیری می‌شود. سیستم کنترل راکتور باید قادر به خاموش کردن سریع راکتور تحت هر شرایط کاری باشد [۱-۲].

حذف بور محلول مزایای زیادی برای راکتور PWR به همراه دارد. مسائل مربوط به تعمیر و نگهداری ناشی از خوردگی از بین می‌رود وحجم زباله‌های رادیواکتیو مایع را به همراه دوز تابشی عملیاتی کاهش می‌دهد. ضریب بازخورد دمایی کندکننده‌ی منفی قوی ناشی از کندکننده‌ی بدون بور، باعث بهبود حالت گذرای راکتور و همچنین ایمنی عملیاتی می‌شود. می توانیم با حذف بور از نیاز به نظارت و تنظیم غلظت بور محلول در طول کارکرد معمول راکتور و حالت گذرا و یا خاموشی جلوگیری کنیم و باعث ساده‌سازی در تعدادی از سیستم‌های نیروگاه شویم. هزینه‌ی کل تولید برق نیز با استفاده از ساده سازی سیستم به دست آمده از طریق حذف بور محلول کاهش می یابد. از این منظر سیستم بدون بور محلول بطور گسترده‌ای برای راکتورهای ماژولارکوچک بویژه پیشران‌های دریایی که‌در آن‌ها ساده‌سازی سیستم‌ها و بهره‌ی اقتصادی ضروری است، استفاده شده‌است.[۳].

در سال 2018، علم[۱] و همکاران، پژوهشی را برروی طراحی قلب یک راکتور SMR [۲] بدون بور محلول که قابلیت قرارگیری به‌عنوان پیشران در کشتی‌ها را داشت، انجام دادند. آن‌ها از اورانیوم با درصد غنای پایین (کمتر از 20%) استفاده کردند. راکتور قادر است به‌مدت 15 سال در سطح توان نامی 333 مگاوات حرارتی بطور موثرکار کند. سوخت‌های مورد استفاده در این راکتور، سوخت غیرهمگن دوبلکس[۳] THO_2-UO_2 با 18 درصد غنا در U^{235} و سوخت همگن UO_2 با غنای 15 درصد می باشند. آرایش میله‌های سوخت 13×13 را برای هر مجتمع سوخت اختیارکردند که در حقیقت با 67% کاهش در مساحت قلب راکتور PWR شرکت وستینگ هاوس حاوی 4 لوپ به آن رسیدند. یعنی از مقدارمساحت

[1] Alam
[2] Small Modular Reactor
[3] Duplex

$8.9\ m^2$ قلب محتوی سوخت و 193 مجتمع‌سوخت و 24 میله‌ی کنترل و 264 میله‌ی سوخت با آرایش 17×17 به مقدار مساحت $3.36\ m^2$ و 112 مجتمع‌سوخت و 16 میله‌ی‌کنترل و 153 میله‌ی سوخت با آرایش 13×13 رسیدند[۴-۵].

بطور کلی مواد مورد استفاده در میله‌های کنترل، باید سطح مقطع جذب بالایی داشته باشند و در دماها وفشارهای کاری با دیگر مواد موجود در قلب سازگاری داشته باشند و همینطور نسبت به آسیب‌های ناشی از تشعشعات هسته‌ای مقاوم باشند. در مورد میله‌های کنترل مورد استفاده در راکتور طراحی شده توسط علم، آن‌ها کاربیدبور، هافنیوم و ترکیب نقره، ایندیم و کادمیم را مورد بررسی قرار دادند.

در سال 2019 پیکمن[۴] و همکاران، طراحی قلب یک راکتور SMR بدون بور محلول با عمر طولانی را بمنظورقرارگیری بعنوان پیشران در کشتی‌های تجاری انجام دادند. با توجه به عمر طولانی قلب و فقدان بور محلول در طول کارکرد عادی، تعداد زیادی جاذب سوختنی مورد نیاز بود تا به طورموثری راکتیویته را در طول عمر قلب کنترل کند. میله های کنترل به کار رفته در این پژوهش می بایست قادر به کار برای مدت زمان طولانی، در اعماق قلب باشند، زیرا آنها همراه با جاذب‌های سوختنی، ابزار غالب برای کنترل راکتیویته خواهند بود. دراین راکتور از یک طرح ترکیبی استفاده شد که به موجب آن بخش پایینی که به طور مداوم در ناحیه فعال قلب قرار دارد از هافنیوم ساخته شده است و قسمت دیگر از کاربید بور ساخته شده است تا ارزش کلی میله در زمانی که میله‌های کنترل به طور کامل وارد می شوند، افزایش یابد [۶].

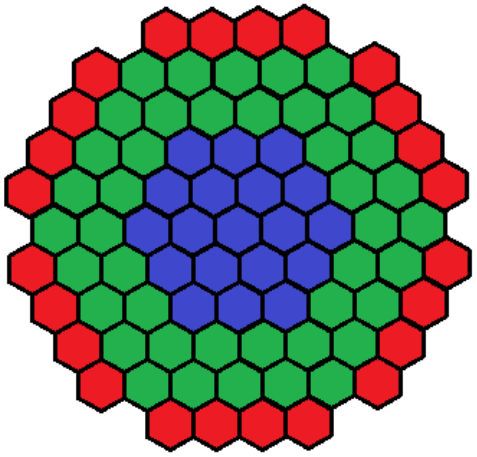
فعالیت‌های مشابهی برروی این نوع از راکتورهای ماژولار بدون بور محلول، صورت گرفته‌است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به طراحی ژوآن در سال ۲۰۱۸، طراحی آلزابن در سال ۲۰۱۹ و طراحی آقای رابیر در سال ۲۰۱۵ و ... اشاره کرد.

۲. روش کار

برای طراحی قلب مورد نظر، قلب راکتور VVER-1000 با مساحت $7.84\ m^2$ و 163 مجتمع سوخت به قلبی با مساحت $1.96\ m^2$ و 85 مجتمع سوخت تبدیل می‌شود و به این ترتیب 75% کاهش در مساحت را به دنبال دارد. حدود 6% از میله‌ها را در راکتور بوشهرکانال‌های راهنما وکانال مرکزی تشکیل می‌دهند که این درصد برای راکتور SMR نیز رعایت شده‌است و 12 کانال راهنما برای قرارگیری میله‌های کنترل و یک کانال مرکزی در آن تعبیه شده‌است. از خصوصیات این قلب می‌توان به توان حرارتی 371.74 مگاوات و استفاده از سوخت UO_2 با غنای 6.6% و جاذب سوختنی گادولینیومی با غلظت 4% اشاره کرد. از کمیت‌های کلیدی این قلب، حفظ نسبت ارتفاع به قطر قلب راکتورVVER-1000برای قلب راکتور SMR طراحی شده می‌باشد. داشتن نسبت ارتفاع به قطر مناسب، سبب بهینه شدن جرم بحرانی و ثابت ماندن پارامترهای ترموهیدرولیکی قلب می‌شود.

برای کاهش ضرایب اوج توان در مرکز قلب و همچنین افزایش توزیع توان درکناره‌های قلب، از میله‌های جاذب سوختنی با تعداد بالا در مرکز قلب، از میله های جاذب سوختنی با تعداد متوسط در خارج از مرکز و از میله‌های جاذب سوختنی با تعداد کمتر در کناره‌های قلب استفاده شده است. شکل ۱ ترکیب قلب راکتور SMR مورد بررسی را نشان می‌دهد[۸].

[4] Peakman



شکل ۱. چیدمان قلب راکتور SMR مورد بررسی (ناحیه‌ی آبی رنگ شامل 30 میله‌ی جاذب سوختنی، ناحیه‌ی سبز رنگ شامل 24 میله‌ی جاذب سوختنی و ناحیه‌ی قرمز رنگ شامل 18 میله‌ی جاذب سوختنی از جنس گادولینیا (Gd_2O_3) می‌باشد).

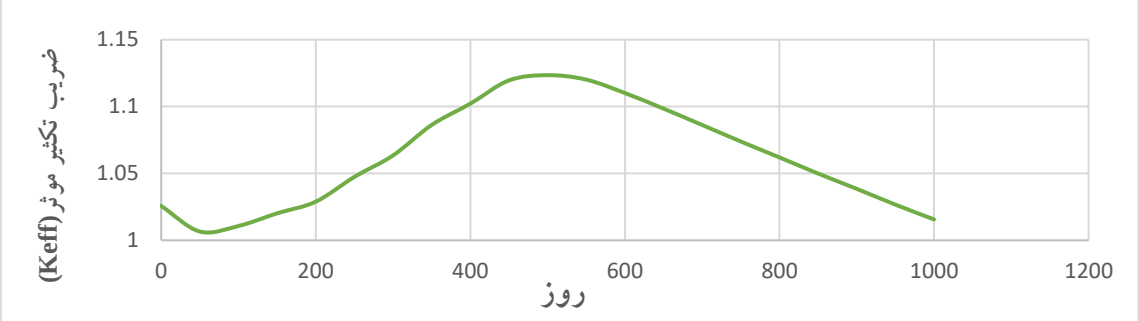
۲. ۱. طراحی میله‌های کنترل

راکتور هسته‌ای از چندین بانک میله کنترلی استفاده می‌کند. هر بانک از تعدادی گروه میله کنترلی تشکیل شده است که در قلب توزیع شده‌اند. میله‌های کنترل، یکی از سیستم‌های ایمنی مهم راکتورهای هسته ای می‌باشند. ارزش آن‌ها بوسیله‌ی مکان قرارگیری بانک‌های میله‌های کنترل، میزان غنای سوخت اورانیومی که بانک‌های کنترلی در آن‌ها قرار می‌گیرند و غلظت گادولینیوم درون مجتمع سوخت، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین، اندرکنش بین میله‌های کنترل پدیده‌ای است که بعنوان

اثر سایه‌اندازی شناخته می‌شود و به نوبه‌ی خود در ارزش میله‌های کنترل تاثیرگذار است. وجود میله های کنترلی متعدد بر شکل و مقدار شار تأثیر می گذارد. محل قرارگیری بانک‌های کنترلی در قسمت‌هایی است که درآن حداکثر شار نوترونی قرار دارد. با ورود بانک‌های کنترلی درون قلب راکتور PPF[5] کاهش یافته و توزیع توان در مرکز قلب کاهش می‌یابد.

برای تعیین ارزش میله کنترل لازم، ابتدا باید راکتیویته‌ی قلب را در شرایط مختلف دما و توان ارزیابی کرد. سپس باید تعیین نمود که چه تعداد میله کنترل و چه مواد کنترلی برای برآوردن نیاز حاشیه‌ی خاموشی، لازم است. در زمان دمای پایین‌تر سوخت یا کند کننده، قلب، راکتیویته‌ی بالاتری نسبت به حالت عملکرد استاندارد خود خواهد داشت. هنگام تعیین ارزش میله کنترل بهینه، ضروری است که راکتیویته‌ی کافی برای خاموش شدن سریع حتی در این شرایط سرد یا توان کم وجود داشته باشد. برای ارزیابی این سناریوهای مختلف، راکتیویته‌ی قلب در سه شرایط دما/توان اندازه‌گیری می‌شود : عملکرداستاندارد HFP [6]، HZP [7] و CZP [8] [۴]. در شکل۲، تغییرات ضریب تکثیر سیستم برحسب روزهای سپری‌شده نشان داده شده‌است.

[5] Power Peaking Factor
[6] Hot Full Power
[7] Hot Zero Power
[8] Cold Zero Power



شکل۲. نمودار تغییرات ضریب تکثیر سیستم برحسب روزهای سپری‌شده.

۲-۱-۱ . محاسبه‌ی حاشیه‌ی خاموشی

در مرحله‌ی بعد، حاشیه خاموشی (SDM)[9] مجتمع‌های میله کنترل تجزیه و تحلیل می‌شود تا نشان دهد که قلب دارای راکتیویته‌ی کنترلی به اندازه کافی بزرگ است که، منجر به خاموش شدن ایمن می‌شود. به طور معمول، SDM باید بیش از 1300 pcm در طول عمر یک قلب PWR باشد. مقدار SDM برای قلب، با در نظرگرفتن SDM = ARW – (RIA+PD) تعیین شد [۴].

مقادیر راکتیویته‌ی کاستی توان[10] (PD)، حدمجاز ورود میله‌ی کنترل[11](RIA)، راکتیویته‌ی اضافی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول۱. مقادیر راکتیویته‌ی موردنیاز برای محاسبه‌ی حاشیه خاموشی.

	کاستی توان(PD)	حدمجاز ورود میله(RIA)	راکتیویته‌ی اضافی
راکتیویته (pcm)	2132.6	10523.6	9515.3

مقدار حاشیه‌ی خاموشی برابر با 3000 pcm فرض می‌شود و به ادامه ی محاسبات پرداخته می‌شود.

$$\rho_{SDM} \equiv 3000\ pcm$$

ARW[12]ارزش راکتیویته‌ی قابل دسترس است که در این راکتور توسط میله‌های کنترل تامین می‌شود.

SDM = ARW− (RIA+PD) = ARW – (10991.1 + 2113) = ARW – 13104.1 = 3000 pcm

ARW = 16104.1 pcm

با معلوم شدن مقدار راکتیویته‌ی در دسترس، ارزش راکتیویته‌ی کل میله‌های کنترل یعنیTRW[13] محاسبه می‌شود و با توجه به آن و همینطور مقدار با ارزش‌ترین بانک میله‌های کنترل HRW[14]، ارزش میانگین هر بانک میله های کنترل را می‌توان محاسبه نمود.

ARW = (TRW− HRW) = TRW – 2300 = 16104.1 pcm

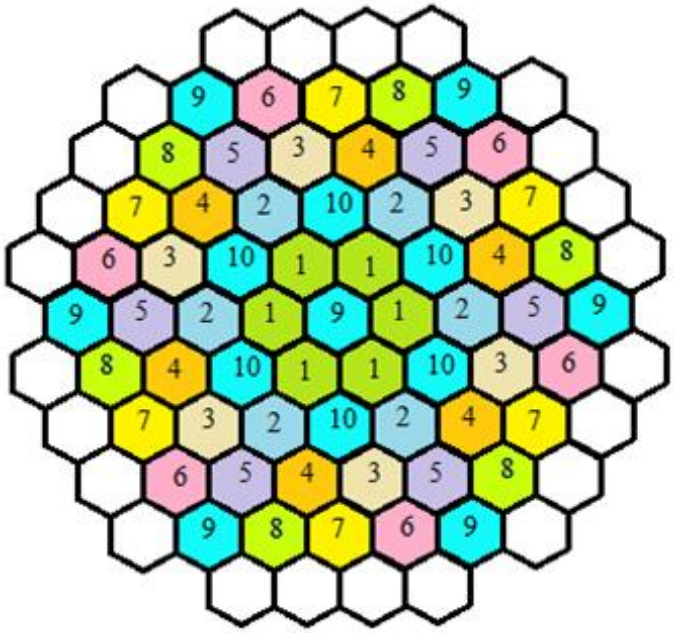
TRW = 18404.1 pcm

ارزش میانگین هر بانک میله های کنترل : $\frac{TRW}{10}$ = 1840.41 pcm

[9] Shutdown Margine
[10] Power Defect
[11] Rod Insertion Allowance
[12] Available Rod Worth
[13] Total Rod Worth
[14] Highest Rod Worth

باتوجه به محاسبات انجام شده ارزش میانگین هر بانک میله‌های کنترل در این قلب 1840.41 pcm و کمتر از حاشیه-خاموشی است و مقدار ماکزیمم ارزش آن‌ها نیز حدود 2300 pcm است تا بتواند راکتور را در حین کارکرد کنترل کند و در هنگام خاموشی اضطراری نیز ایمن عمل کند.

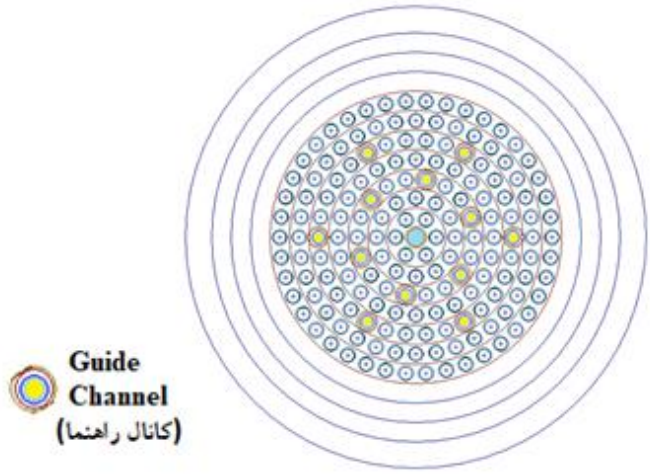
الگوی چینش میله های کنترل را به صورت شکل زیر ترتیب دادیم. ۱۰ بانک میله‌های کنترل در این طرح قرار دارد که ۶ بانک (۱ و ۲ و ۳ و ۵ و ۷ و ۹) مربوط به مانور توان و ۵ بانک (۴ و ۶ و ۸ و ۱۰) مربوط به خاموشی است. در شکل ۳ چیدمان میله‌های کنترل درون قلب راکتور نشان داده شده‌است.



شکل۳. چیدمان میله‌های کنترل درون قلب راکتور.

۲-۱-۲. تعیین ارزش بانک‌های کنترلی

برای تعیین ارزش راکتیویته‌ی بانک‌های کنترلی، در حالت بعد از تعادل زینان اقدام شد. مقدار K_{eff} قلب پس از گذشت 48 ساعت و پس از انباشت زینان که سبب تزریق راکتیویته‌ی منفی در قلب می‌شود، برابر با 1.004833 است. سپس هرکدام از گروه‌های میله‌کنترل به صورت منفرد بطور کامل در درون قلب قرار می‌گیرند تا مقدار ارزش انتگرالی آن را بیابیم. از بین چند ماده از جمله نقره-ایندیم-کادمیم و هافنیم و دیسپروسیم تیتانات و کاربیدبور، در نهایت کاربید بور یا B_4C به دلیل ارزش بالاتر بعنوان ماده‌ی جاذب در این بانکها استفاده شده و در هر مجتمع کنترلی خوشه‌ای 12 عدد از این میله ها قرار می‌گیرند و چیدمان آنها در یک مجتمع سوخت در شکل۴ نشان داده شده است.



شکل۴. چیدمان میله های کنترل درون یک مجتمع سوخت

K_{eff} (core) : 1.004833

$\Rightarrow$ ارزش گروه ۱ : $\frac{|0.988619-1.004833|}{0.988619} \times 10^5 =$ 1640.066 pcm

K_{eff} (1) : 0.988619

به طریق مشابه، نسبت به محاسبه‌ی ارزش دیگر بانک‌ها اقدام می‌شود. در جدول۲ مقادیر ارزش بانک‌های کنترلی و خاموشی از جنس کاربید بور نشان داده شده است.

جدول۲. مقادیر ارزش بانک‌های کنترلی و خاموشی.

گروه	K_{eff}	K_{eff} (Core)	ارزش راکتیوته (pcm)
1	0.988619	1.004833	1640.066
2	0.983058	1.004833	2215.027
3	0.981904	1.004833	2335.157
4	0.981904	1.004833	2335.157
5	0.985002	1.004833	2013.295
6	0.99127	1.004833	1368.245
7	0.98915	1.004833	1585.503
8	0.99127	1.004833	1368.245
9	0.992919	1.004833	1199.896
10	0.983916	1.004833	2125.893

TRW = 18460.2 pcm

با توجه به این که اختلاف ارزش کل میله‌ها در این حالت با حالت های HFP و HZP کمتر از 200 pcm اندازه‌گیری شد، از حالت اول استفاده می‌شود. حالت CZP نیز ارزش کمتری از میله‌ها را نشان می‌دهد، بنابراین استفاده نمی‌شود.

۲-۱-۳. اثر سایه‌اندازی و ضدسایه‌اندازی

وجود میله‌های کنترلی متعدد بر شکل و مقدار شار تأثیر می گذارد. اثر سایه‌اندازی[15] کاهش در ارزش میله‌ی کنترل با حضور سایر بانک ها است، در حالی که اثر ضدسایه‌اندازی[16] افزایش در ارزش میله‌ی کنترل هنگام اندرکنش دو یا چند بانک است.

[15] Shadowing Effect
[16] Anti-Shadowing Effect

همانطور که گفتیم، اثر برهمکنش میله ها (یا بانک ها) δ توسط رابطه‌ی زیر مورد محاسبه قرار می‌گیرد. اثر سایه‌اندازی نشان‌دهنده‌ی اندرکنش میله‌های کنترل است و میزان اندرکنش بین میله‌های کنترل، ارزش سایه‌اندازی را تخمین می‌زند.

$$\delta \equiv \frac{\Delta\rho_{1.2.....N} - \sum_{i=1}^{N} \Delta\rho_i}{\Delta\rho_{1.2.....N}}$$

در این معادله δ بیانگر درجه‌ی اندرکنش است. اگر $\delta < 0$ باشد، نشان‌دهنده‌ی اثر سایه‌اندازی است و اگر $\delta > 0$ باشد، نشان‌دهنده‌ی اثر ضدسایه‌اندازی می‌باشد. $\Delta\rho_i$؛ ارزش راکتیویته‌ی میله‌ی کنترل یا بانک i ام است و N تعداد میله‌های کنترل می‌باشد. درجه‌ی اندرکنش، همانطور که در رابطه بالا نشان داده شده است، به تفاوت بین مجموع ارزش هر بانک بطور انفرادی و ارزش آنها که با هم اندازه گیری می‌شوند، بستگی دارد. تمام بانک‌های کنترلی که در قلب راکتور SMR فوق به‌کار برده شد، دارای ترکیب و ابعاد هندسی یکسانی هستند، تنها تفاوت آنها در محل قرارگیری آنها در قلب و نوع مجتمع سوختی است که در آن قرار می گیرند. درجه‌ی اندرکنش بانک‌های میله‌های کنترل در حالتی که باهم وارد شده‌اند محاسبه می‌شود. چند مورد از آن‌ها در جدول۳ قرار داده شده‌است [۹].

جدول ۳. درجه‌ی اندرکنش بانک‌های میله‌کنترلی.

نام بانک‌ها	درجه‌ی اندرکنش δ (%)	جمع ارزش‌ها (انفرادی) (PCM)	جمع ارزش‌ها (تجمعی) (PCM)	اختلاف ارزش (PCM)
1 , 2	-13.48	3855.093	3397.112	457.981
1 , 10	-21.55	3765.959	3098.216	667.743
2 , 10	-13.72	4340.92	3817.187	523.733
2 , 3	-0.48	4550.184	4528.464	21.72
3 , 4	0.21	4670.314	4680.372	10.058
1,2,3	-7.26	6190.25	5771.487	418.763
1,2,10	-33.08	5980.986	4494.388	1486.598
1,9,10	-7.56	4965.855	4617.059	348.796
1,2,3,4	6.27	8525.407	8022.158	503.249
1,2,3,5	12.414	8203.545	8191.131	0.152
1,2,3,10	-24.15	8316.143	6698.352	1617.791
4,7,9,10	15.23	7246.449	8548.7	1302.251
3,6,8,9	4.49	6271.543	6566.547	295.004

بانک‌هایی که در یک آرایه و نزدیک به قلب قرار دارند و یا بیشترین سطح تماس را در دو آرایه‌ی مجاور داشتند، بالاترین درجه‌ی اندرکنش را در اثر سایه‌اندازی به خود اختصاص دادند. در مورد اندرکنش ۲ بانک این درجه نهایتا به ۲۰- درصد و در مورد ۳ و ۴ بانک تا حدود ۳۰- درصد اثر سایه‌اندازی برقرار بود.

۲-۱-۴. تعیین بانک‌های کنترلی بهینه

بانک‌هایی برای کنترل توان در طول سیکل انتخاب می‌شوند که کمترین درجه‌ی اندرکنش مرتبط با اثر سایه‌اندازی، در طول سیکل راکتور را داشته باشند. باتوجه به مقدار بالای نوسان راکتیویته در این قلب طراحی شده که ماکزیمم آن 10326 pcm می باشد، باید بتوانیم براین مقدار با استفاده از بانک‌های با ارزشِ بالا غلبه کنیم. 6 بانک 1 و 2 و 3 و 5 و 7 و 9 را جهت کنترل توان در طول سیکل انتخاب می‌کنیم چون فاقد اثر سایه‌اندازی است و حتی 16.66% هم اثر ضدسایه‌اندازی‌دارد. ابتدای سیکل این 5 بانک کنترلی کمتر از 50% درون قلب قرار دارند و پس از تعادل زینان این بانک‌ها برای غلبه بر راکتیویته‌ی منفی ناشی ازانباشت زینان، مقداری از قلب خارج می‌شوند تا راکتور در حالت بحرانی باقی بماند. ضمن اینکه در ابتدای سیکل هیچکدام از این بانک‌ها بیش از ۱ دلار وارد قلب نمی‌شوند تا در صورت وقوع

حوادثی همچون خروج ناگهانی میله‌ها[17]، راکتور از دست نرود. مقادیر توریع توان شعاعی و محوری و دمای سوخت و کندکننده بررسی شدند و در محدوده‌ی قابل قبول و ایمن قرار داشتند.

جدول۴. درجه‌ی اندرکنش بانک‌های کنترلی تعیین شده.

نام بانک‌ها	درجه‌ی اندرکنش δ (%)	جمع ارزش‌ها (انفرادی) (PCM)	جمع ارزش‌ها (تجمعی) (PCM)	اختلاف ارزش (PCM)
1 ,2 ,3 ,5 ,7 ,9	16.66	10988.94	13186.19	2197.25

اکنون، مقدار اندرکنش بانک‌ها و اثر سایه‌اندازی را در حالتی که تمام میله‌ها وارد قلب شده باشند، می‌سنجیم.

جدول۵. درجه‌ی اندرکنش تمام بانک‌ها باهم.

نام بانک‌ها	درجه‌ی اندرکنش δ (%)	جمع ارزش‌ها (انفرادی) (PCM)	جمع ارزش‌ها (تجمعی) (PCM)	اختلاف ارزش (PCM)
تمام بانک‌ها	23.09	18186.48	23991.0	5459.56

بنابراین، در این قلب اثر ضدسایه‌اندازی با درجه‌ی اندرکنش 23.05% غالب است و مشکلی از جهت کنترل توان راکتور در طول سیکل و همچنین خاموشی اضطراری یا خاموشی سریع راکتور وجود ندارد. در صورت خاموشی اضطراری نیز این بانک‌ها با بانک‌های خاموشی ترکیب می‌شوند و با در نظرگرفتن اثر ضدسایه‌اندازی(23.05%) ارزش بسیار بالاتری را جهت خاموشی ایمن و با اطمینان راکتور موجب می‌شوند. ضمن اینکه یک سیستم بور اضطراری، مانند آنچه در راکتورهای آب جوشان BWR اجرا می‌شود، در ذخیره نگه داشته می‌شود تا به عنوان یک وسیله اضافی و متنوع برای اطمینان از خاموش شدن راکتور، عمل کند.

۳. نتیجه‌گیری :

در این پژوهش، به طراحی میله‌های کنترل برای یک قلب راکتور ماژولار کوچک فاقد بور محلول پرداخته‌شد. حذف بور محلول در راکتورها مزایای فراوانی از نظر ساده‌سازی (حذف لوله‌ها، پمپ ها و سیستم‌های تصفیه)، صرفه جویی در فضا، از بین بردن اثرات خورنده‌ی بور محلول و بهبود اثرات ایمنی (بهبود ضریب دمای کندکننده و حذف حوادث مبنی بر رقیق سازی بور) دارد. میله‌های کنترل برای تغییر درجه‌ی بحرانیت راکتور، به منظور افزایش یا کاهش سطح توان و برای بحرانی نگه‌داشتن یک راکتور با جبران تغییرات در خواص سیستم که در طول عمر قلب اتفاق می‌افتد، به‌کار می‌روند. میله‌های کنترل، یکی از سیستم‌های ایمنی مهم در راکتورهای هسته‌ای می‌باشند. ارزش آن‌ها بوسیله‌ی مکان قرارگیری بانک‌های میله‌های کنترل، میزان غنای سوخت اورانیومی که بانک‌های کنترلی در آن‌ها قرار می‌گیرند و غلظت گادولینیوم درون مجتمع سوخت، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. همچنین، اندرکنش بین میله‌های کنترل پدیده‌ای است که بعنوان اثر سایه‌اندازی شناخته می‌شود و به نوبه‌ی خود در ارزش میله‌های کنترل تاثیرگذار است. وجود میله‌های کنترلی متعدد بر شکل و مقدار شار تأثیر می‌گذارد. محل قرارگیری بانک‌های کنترلی در قسمت‌هایی است که در آن، حداکثر شار نوترونی قرار دارد. با ورود بانک‌های کنترلی درون قلب راکتورPPF کاهش یافته و توزیع توان در مرکز قلب کاهش می‌یابد. به‌طور کلی مواد مورد استفاده در میله‌های کنترل، باید سطح مقطع جذب بالایی داشته باشند و در دماها و فشارهای کاری با دیگر مواد موجود در قلب سازگاری داشته باشند و همینطور نسبت به آسیب‌های ناشی از تشعشعات هسته‌ای مقاوم باشند. از خصوصیات قلب مورد بررسی در این پژوهش می‌توان به توان حرارتی 371.74 مگاوات و استفاده از سوخت UO_2 با غنای 6.6% و جاذب سوختنی گادولینیومی با غلظت 4% اشاره کرد. از کمیتهای کلیدی این قلب، حفظ نسبت ارتفاع به قطر قلب راکتور VVER-1000 برای قلب راکتور SMR طراحی شده می‌باشد. برای تعیین ارزش

[17] Rod Ejection Accident

میله کنترل لازم، ابتدا باید راکتیویته‌ی قلب را در شرایط مختلف دما و توان ارزیابی کرد. بانک‌هایی برای کنترل توان در طول سیکل انتخاب شدند که کمترین درجه‌ی اندرکنش مرتبط با اثر سایه‌اندازی را در طول سیکل راکتور داشته باشند. باتوجه به مقدار بالای نوسان راکتیویته در این قلب طراحی شده، باید بتوانیم براین مقدار با استفاده از بانک‌های باارزشِ بالا غلبه کنیم. 6 بانک 1 و 2 و 3 و 5 و 7 و 9 جهت کنترل توان در طول سیکل انتخاب شدند چون درجه‌ی اندرکنش این ترکیب بانک‌ها 16.66% است و حاوی اثر ضدسایه‌اندازی است. ضمن اینکه در این قلب اثر ضدسایه‌اندازی با درجه‌ی اندرکنش 23.09% غالب است و مشکلی از جهت کنترل توان راکتور در طول سیکل و همچنین خاموشی اضطراری راکتور وجود ندارد. در صورت خاموشی اضطراری نیز، این بانک‌ها با بانک‌های خاموشی ترکیب می‌شوند و با در نظرگرفتن اثر ضدسایه‌اندازی(23.09%) ارزش بسیار بالاتری را جهت خاموشی ایمن و با اطمینان راکتور موجب می‌شوند. ضمن اینکه یک سیستم بور اضطراری، مانند آنچه در راکتورهای آب جوشان BWR اجرا می‌شود، در ذخیره نگه داشته می‌شود تا به عنوان یک وسیله اضافی و متنوع برای اطمینان از خاموش شدن راکتور عمل کند. در انتخاب این بانک‌ها احتمال بروز حادثه‌ی خروج ناگهانی میله‌های کنترل نیز بررسی شده است و هر یک از بانک‌ها در ابتدای سیکل بیش از یک دلار، وارد قلب نمی‌شوند.

۴. مراجع :

[۱] Duderstadt, J.J. and Hamilton, L.J., 1976. *Nuclear reactor analysis*. Wiley.

[۲] Lamarsh, J.R. and Baratta, A.J., 2001. *Introduction to nuclear engineering* (Vol. 3, p. 783).Upper Saddle River, NJ:Prentice hall.

[۳] Ingremeau, J.J. and Cordiez, M., 2015. Flexblue® core design: optimisation of fuel poisoning for a soluble boron free core with full or half core refuelling. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, *1*, p.11.

[۴] Alam, S.B., Kumar, D., Almutairi, B., Bhowmik, P.K., Goodwin, C. and Parks, G.T., 2019. Small modular reactor core design for civil marine propulsion using micro-heterogeneous duplex fuel. Part I:

Assembly-level analysis. *Nuclear Engineering and Design*, *346*, pp.157-175.

[۵] Alam, S.B., Ridwan, T., Kumar, D., Almutairi, B., Goodwin, C. and Parks, G.T., 2019. Small modular reactor core design for civil marine propulsion using micro-heterogeneous duplex fuel. Part II:

Whole-core analysis. *Nuclear Engineering and Design*, *346*, pp.176-191.

[۶] Peakman, A., Owen, H. and Abram, T., 2019. The core design of a Small Modular Pressurised Water Reactor for commercial marine propulsion. *Progress in Nuclear Energy*, *113*, pp.175-185.

[۷] Peakman, A., Owen, H. and Abram, T., 2021. Core design and fuel behaviour of a small modular pressurised water reactor using (Th, U) O2 fuel for commercial marine propulsion. *Progress in Nuclear*

Energy, *141*, p.103966.

[۸] Hosseinllu, M., Abbasi, M. and Dehghani, F., 2023. Preliminary design of soluble boron free small modular reactor core based on hexagonal lattice. *Nuclear Engineering and Design*, *403*, p.112112.

[۹] Louis, H.K., Refeat, R.M. and Hassan, M.I., 2021. Control rod shadowing effect in PWR core utilizing Urania-Gadolinia fuel. *Progress in Nuclear Energy*, *142*, p.103993.

[۱۰] Alzaben, Y., Sanchez-Espinoza, V.H. and Stieglitz, R., 2019. Core neutronics and safety characteristics of a boron-free core for Small Modular Reactors. *Annals of Nuclear Energy*, *132*, pp.70-81.