



افزایش طول چرخه کاری و هموارسازی توزیع قدرت در راکتور کوچک ماژولار عاری از محلول اسید بوریک

امیر کریمی جعفری^۱، فرخ خوش احوال^{۲*} و مرتضی اکبری^۱

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران
۲. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران

پست الکترونیکی: f_khoshahval@sbu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۹/۲۲)

چکیده

رشد جمعیت، توسعه صنعتی و همچنین محدودیت منابع سوخت فسیلی، انگیزه‌ای در مطالعه سایر انرژی‌ها به ویژه انرژی هسته‌ای ایجاد کرده است. راکتورهای کوچک ماژولار به دلیل ایمنی بیشتر، حمل و نقل آسان، تولید الکتریسیته و شیرین‌سازی آب حتی برای مناطق دور از دسترس، به عنوان منبع انرژی کارآمد معرفی شده‌اند. بهینه‌سازی در مدیریت سوخت هسته‌ای برای بهبود عملکرد و صرفه‌جویی در مصرف انرژی به طراحی مقرون به صرفه با راندمان بالاتر و ایمنی مناسب‌تر منجر می‌شود. در این تحقیق بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت راکتور کوچک ماژولار اسمارت (SMART) با استفاده از الگوریتم جدید سنجاکک مورد توجه قرار گرفته است. کارایی بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت علاوه بر الگوریتم انتخابی به تعریف تابع هدف نیز بستگی دارد. تابع دوهدفه شامل مسطح کردن توزیع قدرت و بیشینه‌سازی ضریب تکثیر مؤثر برای این تحقیق در نظر گرفته شده است. محاسبات و شبیه‌سازی مجتمع‌های سوخت و قلب راکتور به ترتیب توسط کد محاسبات سلولی دراگون و کد محاسبات قلب پارکس انجام شد. با توجه به نتایج نهایی، افزایش طول چرخه و ضریب تکثیر مؤثر به ترتیب به مقدار ۱۸۵ روز و ۵۸۲ pcm و همچنین کاهش تابع برازندگی از مقدار ۰/۹۰۵۹۳۱ به ۰/۱۹۴۵۲۷، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، الگوریتم سنجاکک، راکتور کوچک ماژولار، مدیریت سوخت

۱. مقدمه

الکتریسیته بسیار مؤثر گزارش شده است و به همین دلیل طراحی نیروگاه با رعایت استانداردهای ایمنی توسط بسیاری از محققان مورد مطالعه قرار گرفته است. راکتورهای کوچک ماژولار که تمام عناصر اصلی یک راکتور بزرگ مانند مولد بخار، فشارنده، مدار خنک کننده اولیه

گسترش صنعت و افزایش تقاضا برای تأمین انرژی و همچنین منابع محدود سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های زیست محیطی، محققان را به کشف منبع انرژی جایگزین ترغیب کرده است. انرژی هسته‌ای در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی و تولید

سوخت توسعه داده شده است.

برای محک زدن کارایی الگوریتم سنجاچک، مقایسه آن با الگوریتم توده ذرات (برتر بین الگوریتم‌های ازدحام ذرات) و الگوریتم ژنتیک (برتر بین الگوریتم‌های انقلابی) انجام شده است. در این قیاس توسط میرجلیلی از سه گروه توابع آزمون استفاده شده که به منظور جمع‌آوری نتایج کمی، هر الگوریتم با توابع آزمون ۳۰ بار اجرا و آزمایش شده است و نتایج حاصل از آزمون ثابت می‌کند که الگوریتم سنجاچک پیشنهادی به دلیل داشتن دو رفتار گروهی پویا و پایا در بررسی فضای جستجو، دو فاز ضروری شناسایی و بهره‌برداری در بهینه‌سازی را بهتر اعمال و مدل‌سازی می‌کند [۱۰].

کارایی بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت به تعریف تابع هدف نیز بستگی دارد. یک تابع دو هدفه شامل مسطح کردن توزیع قدرت در آغاز چرخه و به حداکثر رساندن ضریب تکثیر مؤثر در پایان چرخه، در این تحقیق برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت در نظر گرفته شده است.

با توجه به ساختار و آرایش سوخت، مدل‌سازی انواع سلول‌های محاسباتی درکد دراگون^۴ انجام شده و پس از استخراج ضرایب گروهی (ثابت پخش و سطوح مقطع جذب، شکافت و پراکندگی) مربوط به هر سلول و اجرای کد محاسبات پارکس^۵، مقادیر نوترونیکی (توزیع قدرت، ضریب تکثیر مؤثر و ضریب قله توان) قلب راکتور محاسبه شده است.

۲. مبانی نظری

۲.۱. راکتور کوچک ماژولار اسمارت^۶

راکتورهای کوچک ماژولار نمونه‌ای از راکتورهای هسته‌ای هستند که به منظور تولید الکتریسیته، شیرین‌سازی آب و استفاده‌های صنعتی دیگر ساخته می‌شوند، قابلیت پیکربندی و انتقال آسان به محل مورد نظر و در نتیجه قابلیت استفاده در مناطق دورافتاده، این راکتورها را برای کاربرد مورد نیاز، مناسب

و سایر اجزای موجود را در محفظه راکتور جای داده‌اند، مشخصاتی از جمله قابلیت پیکربندی و حمل‌ونقل آسان دارند. بنابراین این راکتورها می‌توانند به عنوان نامزدهای بالقوه برای استفاده در مناطق دور افتاده و پروژه‌هایی با محدودیت‌های مالی استفاده شوند. به این منظور اخیراً، این راکتورها توسط تعداد محدودی از کشورها توسعه داده شده و کاربرد آنها بررسی شده است [۱].

بهینه‌سازی، قسمت اصلی طراحی نیروگاه هسته‌ای برای بهبود عملکرد و صرفه‌جویی در انرژی است که منجر به طراحی مقرون به صرفه با کارایی بالا و ایمنی مناسب می‌شود. آرایش مجتمع‌های سوخت، جاذب‌های سوختنی و میله‌های کنترل از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی مدیریت سوخت به شمار می‌روند. اخیراً، محققان به طور گسترده بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت را به عنوان یک چالش بزرگ در بهینه‌سازی راکتور بررسی کرده‌اند [۲].

در دهه‌های گذشته روش‌های مختلفی برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت قلب راکتور با استفاده از برنامه نویسی پویا [۳]، برنامه‌نویسی خطی [۴]، بازپخت شبیه‌سازی شده^۱ [۵]، شبکه عصبی همراه با بازپخت شبیه‌سازی شده [۶]، بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک [۷]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات مداوم [۸]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات با رفتار کوانتومی با عملگر جهش دیفرانسیلی [۹] و غیره، توسط محققان ارائه داده است.

فضای گسترده جستجو و تعریف تابع هدف پیچیده، محققان را با نگرانی‌های مهم برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت روبه‌رو کرده است. از این رو استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی مختلف مانند الگوریتم‌های ابتکاری^۲ و فراابتکاری^۳ که از رفتار سیستم‌های بیولوژیکی نشأت می‌گیرند، برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت پیشنهاد شده است. در این تحقیق، از الگوریتم جدیدی به نام سنجاچک استفاده شده است. با توجه به رفتار گروهی سنجاچک‌ها به عنوان روش جستجوی تصادفی، برای اولین بار در بهینه‌سازی مدیریت

۴. DRAGON

۵. PARCS

۶. SMART (System-integrated modular advanced reactor)

۱. Simulated annealing (SA)

۲. Heuristic

۳. Meta-heuristic

هستند. قلب اسمارت از ۵۷ مجتمع سوخت بر پایه آرایش ۱۷×۱۷ مربعی و عاری از محلول اسید بوریک طراحی شده است. میله‌های سوخت این راکتور از جنس UO_2 با ۴/۹۵ درصد غناء اورانیوم ساخته شده است. به عنوان میله جاذب سوختنی نیز از $Gd_2O_3-UO_2$ با ۴ درصد وزنی Gd_2O_3 و ۱/۸ درصد غنای اورانیوم و برای رفع نیاز به یکسان‌سازی شار و کنترل بهتر، از میله‌های $Al_2O_3-B_2C$ با مقادیرهای متفاوت B^{10} در مجتمع‌های سوخت استفاده شده است [۱۴]. این راکتور از لحاظ اقتصادی به دلیل ساخت و ساز مازولار آن پیشرفت کرده و در کنار تولید الکتریسیته، شیرین‌سازی آب نیز مورد بررسی قرار گرفته است. این راکتور می‌تواند ۴۰۰۰۰ متر مکعب آب را در روز شیرین سازد [۱۵]. مشخصات اصلی راکتور و آرایش مجتمع‌های سوخت قلب راکتور به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین قلب راکتور از ۳ نوع مجتمع سوخت تشکیل شده که در نوع، آرایش و تعداد میله‌ها متفاوت است. تعداد مجتمع‌ها و میله‌های موجود در هر یک را می‌توان در جدول ۲ مشاهده کرد.

به منظور کنترل سرعت واکنش زنجیره‌ای هسته‌ای و در نتیجه، کنترل توان حرارتی خروجی راکتور، نرخ تولید بخار و توان الکتریکی خروجی نیروگاه از میله‌های کنترل استفاده می‌شود. در قلب راکتور و هر مجتمع سوخت، جایگاهی برای قرارگیری میله‌های کنترل طراحی شده و مجموعه‌هایی تحت عنوان دسته میله‌های کنترل تعریف و طراحی می‌شوند تا در مواقع لزوم و زمان‌های برنامه‌ریزی شده، کل میله‌های کنترل هر دسته با ارتفاع معینی از آنها برای کنترل واکنش هسته‌ای به محل تعبیه شده در هر مجتمع و در نتیجه قلب راکتور وارد شوند. بنابراین میله‌های کنترل عموماً به عنوان دسته میله‌های کنترلی (معمولاً ۲۰ عدد میله برای مجتمع‌های سوخت کنونی راکتورهای آب تحت فشار) استفاده و به صورت کامل یا قسمتی از آن وارد محل لوله‌های راهنما می‌شوند. در راکتورهای آب تحت فشار، میله‌های کنترل به وسیله دستگاه نیروی محرکه میله کنترل که بالای محفظه فشار قرار گرفته به داخل قلب فرود می‌آیند، ولی در راکتورهای آب جوشان به دلیل لزوم حضور

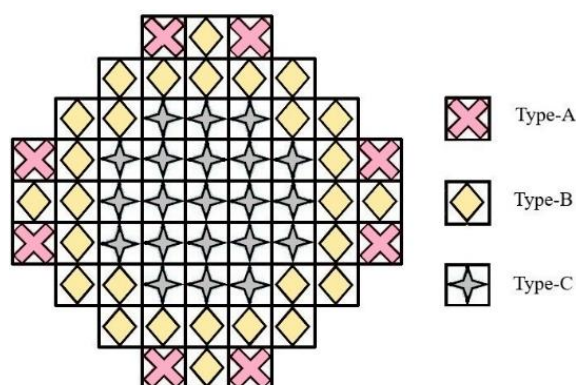
ساخته است. با این حال مطابق با نظر آژانس بین المللی انرژی اتمی، راکتور کوچک توانایی تأمین حداکثر ۳۰۰ مگاوات الکتریکی و راکتور متوسط بین ۳۰۰ تا ۷۰۰ مگاوات الکتریکی و راکتورهای بزرگ بیشتر از ۷۰۰ مگاوات الکتریکی برق را دارند [۱۱].

کلمه مازولار در نام راکتور کوچک مازولار، به یک راکتور منفرد که تمام متعلقات راکتور بزرگ مانند مولد بخار، فشارنده، محفظه فشار، مدار خنک کننده اولیه و تمامی اجزای آن همگی در محفظه راکتور قرار دارد، اشاره می‌کند و می‌توان تعدادی از آن را در شکل یک نیروگاه هسته‌ای بزرگ جمع کرد. راکتورهای بزرگ امروزی به کار میدانی برای جمع‌آوری اجزای ساخته شده کارخانه در محل نیروگاه هسته‌ای نیاز دارند، در حالی که راکتور کوچک مازولار محدودیت‌های آماده‌سازی در محل را پیش‌بینی می‌کند. بنابراین به محض رسیدن از کارخانه می‌تواند راه‌اندازی شود. با افزایش محفظه فشار راکتور نسبت به راکتورهای بزرگ کنونی، اندازه بتن مهار کننده و وسعت کلی نیروگاه هسته‌ای با تأثیر مثبتی بر ایمنی و اقتصاد کاهش می‌یابد. بنابراین راکتور کوچک مازولار می‌تواند با قطار، کشتی و کامیون انتقال پیدا کند و حتی نزدیک افراد، مناطق مسکونی، بیمارستان‌ها و مجتمع‌های دولتی بزرگ نصب شود [۱۲]. مزایای بیشتری نیز در ارتباط با این نوع راکتورها وجود دارد، از جمله کاهش چگالی قدرت، کاهش احتمال حادثه بزرگ از دست رفتن خنک‌کننده، افزایش طول چرخه مصرف سوخت و همچنین حذف بور محلول که وجود آن در راکتورهای آب سبک منجر به مشکلاتی از جمله خوردگی می‌شد [۱۳]. البته لازم به ذکر است که در برخی از طراحی‌های راکتور مازولار، همچنان از بور محلول به عنوان جاذب کنترلی استفاده می‌شود.

راکتور پیشرفته مازولار سیستم یکپارچه اسمارت، حدود ۱۰۰ مگاوات الکتریکی قدرت تولید می‌کند که طراحی آن به وسیله مؤسسه تحقیقات انرژی اتمی کره انجام شده است. به واسطه طراحی یکپارچه، جنبه‌های ایمنی هم ذاتی و هم غیرفعال^۱

جدول ۱. مشخصات اصلی راکتور.

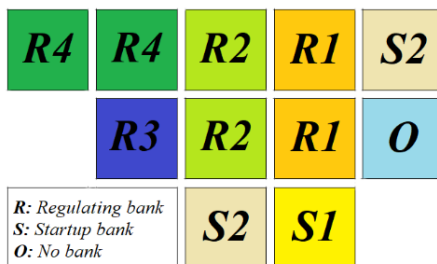
مقدار	واحد	متغیر
۳۳۰	مگاوات	قدرت حرارتی راکتور
۱۰۰	مگاوات	قدرت الکتریکی راکتور
۶۰	سال	عمر کاربردی راکتور
۳۶	ماه	طول چرخه سوخت
۲۰۰	سانتی متر	ارتفاع فعال قلب
۱۸۳/۲	سانتی متر	قطر میانگین قلب
۱۵	مگاپاسکال	فشار عملیاتی راکتور
۲۷۰	درجه سانتی گراد	دمای خنک کننده در ورودی قلب
۳۱۰	درجه سانتی گراد	دمای خنک کننده در خروجی قلب
۱۴۷۵	کیلوگرم بر ثانیه	دبی خنک کننده مدار اولیه
۲۱/۵۰۴	سانتی متر	گام مجتمع سوخت
۱/۲۶	سانتی متر	گام میله سوخت
۰/۴۰۲۵	سانتی متر	شعاع میله سوخت



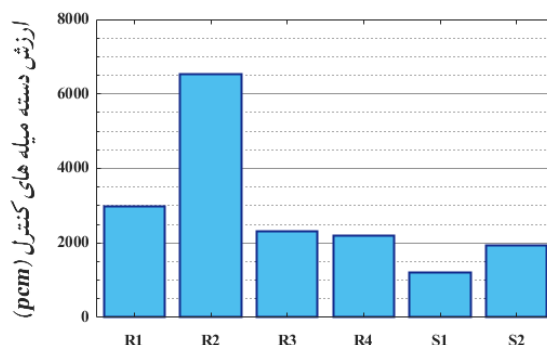
شکل ۱. آرایش مجتمع های سوخت در قلب راکتور.

جدول ۲. مشخصات مجتمع های سوخت.

محتوی ^{10}B (g/cm)	تعداد میله $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{C}$	تعداد میله $\text{Gd}_2\text{O}_3 - \text{UO}_2$	تعداد میله UO_2	تعداد مجتمع	نوع
۰/۰۱۱۱۰	۲۸	۱۲	۲۲۴	۸	A
۰/۰۱۵۸۸	۲۰	۴	۲۴۰	۲۸	B
۰/۰۱۵۸۸	۸	۴	۲۳۶	۲۱	C
۰/۰۲۹۰۰	۱۸				



شکل ۲. آرایش دسته میله‌های کنترل برای تقارن $\frac{1}{8}$ قلب اسمارت.



شکل ۳. ارزش هر یک از دسته میله‌های کنترل بر حسب pcm.

فاقد میله کنترل و قلب حاوی هر یک از دسته میله‌های کنترل محاسبه شده است، که شکل ۳ ارزش هر یک از آنها را بر حسب pcm نشان می‌دهد [۱۴].

در عملکرد راکتورهای آب تحت فشار معمولی، میله‌های کنترل فعال درون قلب، راکتیویته منفی بالایی دارد و بنابراین باعث تغییر بسیار زیادی در الگوی شار می‌شود. ورود جزئی میله‌های کنترل در داخل قلب، همراه با میزان جاذب‌های سوختنی و طرح بارگیری سوخت باید بر انحراف‌ها غلبه کند. علاوه بر این هر تغییر در راکتیویته اضافی بر اثر از بین رفتن و تغییر مواد، بر جابه‌جایی میله‌های کنترل تأثیر بیشتری خواهد گذاشت. این حالت دینامیکی به طور مداوم الگوی شار را تحت تأثیر قرار داده و یک موضوع چالش برانگیز در نگهداری الگوی مناسب ایجاد می‌کند. روش‌های محدودی برای غلبه بر این اختلال قوی در الگوی شار می‌توانند به کار گرفته شوند. یکی از این روش‌ها برای غلبه بر اختلال در الگوی شار داخل راکتورهای عاری از محلول اسید بوریک، بارگیری قسمت پایینی قلب با جاذب‌های سوختنی قوی مانند بور است، تا بتوان

خشک‌کن بخار در بالای محفظه و طرح آن، لازم است که میله‌های کنترل از پایین محفظه وارد قلب شوند.

عناصر شیمیایی با سطح مقطع جذب نوترون بالا مانند نقره، ایندیم، کادمیوم، بور، کبالت، ساماریوم، گادولینیوم، اربیوم، هافنیوم و غیره در میله‌های کنترل قابل استفاده است که معمولاً به صورت آلیاژهایی مانند آلیاژ نقره، ایندیم و کادمیوم، بورون کاربید، زیرکونیوم دی‌بوراید، تیتانیوم دی‌بوراید، گادولینیوم نیترات و غیره ساخته می‌شوند.

قلب اسمارت از ۶ نوع دسته میله‌های کنترل، ۲ دسته تحت عنوان دسته راه‌اندازی^۱ و ۴ دسته به عنوان دسته کنترلی^۲ برگرفته از آلیاژ نقره (۸۰٪)، ایندیم (۱۵٪) و کادمیوم (۵٪) بهره می‌برد. شکل ۲ الگوی دسته میله‌های کنترل را برای تقارن $\frac{1}{8}$ قلب راکتور نمایش می‌دهد، که با توجه به آن مجتمع سوخت گوشه‌ای (نوع A) که بیشترین مقدار گادولینیوم را دارد، فاقد طرحی برای ورود میله کنترل است. ارزش هر یک از دسته میله‌های کنترل به ترتیب با محاسبه اختلاف بین راکتیویته قلب

۱. Startup bank

۲. Regulating bank

۲.۲. مدیریت سوخت هسته‌ای

مدیریت سوخت هسته‌ای بر چگونگی توزیع شار در قلب راکتور و در نتیجه چگونگی توزیع فضایی قدرت، راکتیویته و مصرف سوخت نظارت می‌کند. هدف از مدیریت سوخت هسته‌ای به حداقل رساندن هزینه تولید برق هسته‌ای است؛ در حالی که تمام محدودیت‌های اعمال شده را برآورده کند. راکتورهای آب سبک با نیاز به خاموش شدن در هنگام سوخت‌گیری طراحی شده‌اند و از طرفی در هنگام سوخت‌گیری نیز ممکن است تنها بخشی از موجودی قلب راکتور جابه‌جا شود. بنابراین به مدیریت طرح سلولی مجتمع‌های سوخت، تعداد مجتمع‌های سوخت تازه و مجتمع‌های سوخت مصرف شده، آرایش مجتمع‌های سوخت در قلب و راکتیویته با استفاده از میله‌های کنترل، نیاز است. همه این تصمیمات با یکدیگر در تعامل هستند و مدیریت سوخت را به یک مسئله بهینه‌سازی بسیار پیچیده تبدیل می‌کنند.

در طراحی سلولی مجتمع سوخت، علاوه بر مدیریت پیکربندی مجتمع که شامل شبکه‌های مختلف با اندازه و ارتفاع مشخص است به مدیریت غناء سوخت و محل قرارگیری جاذب‌های سوختنی نیز احتیاج است. مدیریت آرایش مجتمع‌های سوخت، محل و جهت‌گیری مجتمع‌های سوخت تازه و مصرف شده را مشخص می‌کند. مدیریت راکتیویته نیز به مدیریت جاذب‌های سوختنی و تعریف محل میله‌های کنترل به عنوان تابعی از مصرف سوخت و توزیع قدرت نیاز دارد. همه این تصمیمات با یکدیگر در تعامل هستند و مدیریت سوخت را به یک مسئله بهینه‌سازی بسیار پیچیده تبدیل می‌کنند. بهبود مدیریت سوخت هسته‌ای، به تصمیمات بهینه برای خارج قلب و داخل قلب تقسیم می‌شود. تصمیمات خارج از قلب، خواص سوخت تازه‌ای که می‌خواهد ساخته شود و یا تا حدی سوخته شده است را برای جایگیری دوباره در قلب، جهت تولید انرژی اضافی بررسی می‌کند. تصمیمات داخل قلب، به محل قرارگیری سوخت تازه و یا سوخته شده به همراه جاذب‌های سوختنی می‌پردازد. آرایش مجتمع‌های سوخت، جاذب‌های سوختنی و میله‌های کنترل از عوامل کلیدی در بهینه‌سازی مدیریت سوخت

در اثر ورود جزئی میله‌های کنترل تعادل شار در داخل قلب را حفظ کرد [۱۶]. به همین دلیل در راستای محوری قلب اسمارت، مقدار بور در میله‌های $Al_2O_3-B_4C$ متفاوت است. در مجتمع نوع B، ۵۰ سانتی متر بالای ۴ عدد از میله‌های B_4C - Al_2O_3 که حاوی 0.1588 گرم بر سانتی متر اتم ^{10}B هستند، تنها از Al_2O_3 تشکیل شده است. برای انجام محاسبات این دسته، یک سلول دیگر (نوع B1) با مشخصاتی که گفته شد در نظر گرفته تا از خروجی آن در محاسبات راستای محوری قلب استفاده شود. همچنین برای مجتمع نوع C، ۶۰ سانتی متر بالای ۸ عدد از میله‌های $Al_2O_3-B_4C$ که حاوی 0.29 گرم بر سانتی متر اتم ^{10}B هستند، بدون بور است و تنها از Al_2O_3 تشکیل شده است. برای محاسبات این گروه، یک سلول دیگر (نوع C1) با مشخصاتی که گفته شد، در نظر گرفته می‌شود [۱۴].

با این حال از بین رفتن لحظه‌ای مواد که به طور پیوسته مقدار زیادی از راکتیویته اضافی را کاهش می‌دهد، چالشی برای جبران راکتیویته سموم و میله‌های کنترل در طول عمر قلب ایجاد می‌کند. برای پاسخگویی به این چالش، میزان جذب سموم می‌تواند متناسب با میزان تقلیل سوخت در قلب، مهندسی شود. برای مثال، مقدار بیش از حد راکتیویته اضافی باید به وسیله میله‌های کنترل، که اندازه ثابتی دارند، جبران شود. در این روش جابه‌جایی میله‌های کنترل تا زمانی که جاذب‌های سوختنی مصرف و تمام شوند، باید حداقل باشد. هر افزایشی در مقدار بارگیری شده جاذب‌های سوختنی بر مقدار راکتیویته که توسط میله کنترل جبران می‌شود، تأثیر می‌گذارد و همچنین به عمق ورود تمام میله‌های کنترل هم وابسته است. بنابراین غلبه بر اخلاص قوی در الگوی شار به یک تعادل‌سازی دقیق برای جبران راکتیویته، بین میله‌های کنترل و میزان جاذب‌های سوختنی، نیاز دارد. علاوه بر این، معیارهای دیگری در عمق ورود میله کنترل، نقش دارد. سمیت محصولات شکافت، سموم تولیدی از واکنش نوترون با مواد تشکیل دهنده و تمام معیارهای زودگذر راکتور، مسایل چالش برانگیز در طراحی بهینه ایجاد می‌کنند [۱۷].

داخل قلب به شمار می‌روند [۱۸].

در دهه‌های اخیر، محققان به طور گسترده بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت را به عنوان یک چالش مهم در بهینه‌سازی راکتور بررسی کرده‌اند. در یافتن الگوی بهینه مجتمع‌های سوخت، میله‌های کنترل خارج از قلب در نظر گرفته می‌شود [۱۹]، سپس در مراحل بعدی حضور میله کنترل و عوامل دیگر بررسی خواهند شد. به همین دلیل، در این تحقیق محاسبات قلب بهینه برای حالت گرم کامل قدرت^۱ همراه با مقدار متعادل زنون و ساماریوم و بدون حضور میله‌های کنترل در طول چرخه و مصرف سوخت انجام شده است.

فضای جستجوی گسترده برای پیدا کردن جواب بهینه و معرفی تابع هدف مناسب از نگرانی‌های بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت به شمار می‌رود. از این رو روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری برای بهینه‌سازی مجتمع‌های سوخت توصیه می‌شود. در ادامه روش محاسبات نوترونیکی قلب راکتور، الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری سنجاچک، تابع هدف پیشنهادی و نحوه ارتباط الگوریتم با محاسبات قلب برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت توضیح داده شده است.

۲.۳. محاسبات نوترونیکی

در این تحقیق از روش دو مرحله‌ای به شرح ذیل، برای انجام محاسبات در قلب اسمارت استفاده شد:

- محاسبات سلولی راکتور (شامل تمامی اجزای تشکیل دهنده مجتمع‌های سوخت)
- محاسبات قلب راکتور (شامل تمامی اجزای تشکیل دهنده قلب)

بنابراین با توجه به ساختار و آرایش سوخت، مدل سازی انواع سلول‌های محاسباتی در کد دراگون انجام شده و پس از استخراج ضرایب گروهی (ثابت پخش و سطوح مقطع جذب، شکافت و پراکندگی) مربوط به هر سلول و اجرای کد محاسبات پارکس، مقادیر نوترونیکی (شار، ضریب تکثیر و ضریب قله توان) کل قلب راکتور محاسبه شده است.

کد دراگون یک کد سلولی است که حول روش‌های حل معادله ترابرد نوترون در دانشگاه پلی تکنیک مونترئال طراحی شده است. کد کامپیوتری دراگون شامل مجموعه‌ای از ماژول هاست که رفتار نوترونیکی سلول واحد و یا یک مجتمع سوخت داخل راکتور را شبیه‌سازی می‌کند. این کد تمام توابع مشخص یک کد سلولی مانند موارد زیر را شامل می‌شود: درونیایی سطوح مقطع میکروسکوپیکی از کتابخانه‌های استاندارد، محاسبات خودحفاظی ناحیه تشدید در هندسه‌های چندبعدی، محاسبه از بین رفتن ایزوتوپ‌ها در طول چرخه و محاسبه شار چندگروهی در هندسه چندبعدی که می‌تواند برای محاسبات نشت نوترون استفاده شود [۲۰].

کد محاسباتی پارکس شبیه ساز قلب راکتور در سه بعد است که معادله پخش چندگروهی نوترون و معادله ترابرد نوترون در درجه پایین را در حالت پایدار و حالت متغیر وابسته به زمان حل می‌کند. از زمانی که اولین نسخه کد پارکس در نوامبر ۱۹۹۸ ارائه شد تا به حال تغییرات زیادی از جمله بهبود توابع و توسعه ویژگی‌های کد در آن انجام شده است که مهم‌ترین تغییر در کد، تبدیل زبان کد به فرترن ۹۰ است. مهم‌ترین ویژگی‌های محاسباتی در پارکس که شامل قابلیت انجام محاسبات مقدار ویژه، محاسبات حالت گذرا یا دینامیکی، محاسبات تغییرات زنون، محاسبات گرمای باقیمانده، محاسبات توان میله و محاسبات مصرف سوخت است نه تنها شامل راکتورهای آب سبک می‌شود بلکه برای راکتورهای تحت فشار آب سنگین و راکتورهای گازی دما بالا هم قابل تعمیم است. برای محاسبه مصرف سوخت در کل قلب راکتور نیاز به سطوح مقطع ماکروسکوپیکی مجتمع‌ها است که از فایل پیمکس^۲ ایجاد شده با استفاده از خروجی کد محاسبات سلولی خوانده می‌شود [۲۱].

۲.۴. الگوریتم بهینه‌سازی سنجاچک

حقیقت مورد علاقه درباره سنجاچک‌ها رفتار گروهی نادر و بی‌نظیر آنهاست. این رفتارهای گروهی سه اصل اولیه زیر را

۲. PMAXS

۱. Hot full power (HFP)

دنبال می‌کنند:

- تفکیک: رفتاری است که هر شخص ترجیح می‌دهد از برخورد با شخص دیگر در همسایگی خود اجتناب کند.
- هم‌ترازی: رفتاری است که نشان می‌دهد هر شخص با اشخاص دیگر در همسایگی خود سرعت یکسانی دارد.
- هم‌بستگی: این ویژگی تمایل هر شخص به متمرکز شدن در مرکز همسایگان خود را نشان می‌دهد.

زنده ماندن هدف اصلی هر موجود زنده است و به این دلیل تمام سنجاک‌ها باید به منابع غذایی جذب و از دشمنان منحرف شوند. این دو رفتار معرفی شده و سه اصل رفتارهای گروهی، پنج عامل اصلی برای به‌روز رسانی موقعیت سنجاک‌ها و بهینه‌سازی تابع هدف را ایجاد می‌کند [۱۰].

از طرفی سنجاک‌ها فقط برای دو هدف شکار و مهاجرت به حالت گروهی در می‌آیند که هدف اول معروف به ازدحام پایا و هدف دوم معروف به ازدحام پویا است. در ازدحام پایا، سنجاک‌ها گروه‌های کوچکی را درست کرده و به جلو یا عقب برای جستجوی طعمه‌هایی مانند پروانه یا پشه پرواز می‌کنند. در ازدحام پویا، تعداد منظمی از سنجاک‌ها در جهتی مستقیم برای رسیدن به هدف گروه، مهاجرت می‌کنند، حال این هدف می‌تواند رسیدن به غذا و یا دوری از دشمن باشد. این دو رفتار گروهی خیلی شبیه به دو رفتار اصلی شناسایی و بهره‌برداری بهینه‌سازی است. رفتار پایا شناسایی سراسری فضای جستجو یعنی جستجوی سراسری و رفتار پویا یافتن پاسخ‌های بهتر حول یک پاسخ یعنی جستجوی محلی را تضمین می‌کند [۱۰].

رفتارهای گروهی تفکیک، هم‌ترازی، هم‌بستگی و جذب به منبع غذا و دوری از دشمن سنجاک‌ها که رفتارهای شناسایی و بهره‌برداری مربوط به بهینه‌سازی را به دست می‌آورند با روابط ریاضی زیر مدل‌سازی شده است [۲۲]:

تفکیک:

$$S_i = - \sum_{j=1}^N X_j - X_i, \quad (1)$$

که در آن S_i تفکیک برای نامین سنجاک، X_i موقعیت شخص موجود، X_j موقعیت نامین شخص همسایه و N تعداد اشخاص

همسایه است.

هم‌ترازی:

$$A_i = \sum_{j=1}^N \Delta X_j / N, \quad (2)$$

که در آن A_i هم‌ترازی برای نامین سنجاک و ΔX_j گام نامین شخص همسایه را نشان می‌دهد و N نیز همان مقدار در رابطه (۱) است.

هم‌بستگی:

$$C_i = \left(\sum_{j=1}^N X_j / N \right) - X_i, \quad (3)$$

که در آن C_i هم‌بستگی برای نامین سنجاک و X_i و N همان مقادیر در رابطه (۱) هستند.

جذب به منبع غذا:

$$F_i = X^+ - X_i, \quad (4)$$

که در آن F_i جذب به منبع غذا برای نامین سنجاک و X^+ موقعیت منبع غذا و X_i نیز همان مقدار در رابطه (۱) است. دوری از دشمن:

$$E_i = X^- + X_i, \quad (5)$$

که در آن E_i دوری از دشمن برای نامین سنجاک و X^- موقعیت دشمن و X_i نیز همان مقدار در رابطه (۱) است.

برای به‌روز رسانی موقعیت‌های سنجاک‌ها در فضای جستجو و شبیه‌سازی جابه‌جایی آنها، دو بردار گام (ΔX) و موقعیت (X) در نظر گرفته شده است. بردار گام جهت جابه‌جایی سنجاک‌ها را نشان می‌دهد و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$\Delta X_i^{t+1} = (sS_i^t + aA_i^t + cC_i^t + fF_i^t + eE_i^t) + w \Delta X_i^t, \quad (6)$$

که در آن s شدت تفکیک، S_i همان مقدار در رابطه (۱)، a شدت هم‌ترازی، A_i همان مقدار در رابطه (۲)، c شدت هم‌بستگی، C_i همان مقدار در رابطه (۳)، f ضریب مربوط به غذا، F_i همان مقدار در رابطه (۴)، e ضریب مربوط به دشمن، E_i همان مقدار در رابطه (۵)، w شدت سختی و t میزان شمارنده است. بعد از محاسبه بردار گام، بردار موقعیت به روش زیر

به روز رسانی خواهد شد:

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \Delta X_i^{t+1}, \quad (7)$$

ممکن است این سؤال به وجود آید که همگرایی سنجاقک‌ها در هنگام بهینه‌سازی چگونه ضمانت خواهد شد. برای پاسخ به این سؤال اینگونه فرض شده که سنجاقک‌ها به پیدا کردن سنجاقک‌های بیشتر برای تنظیم مسیر پرواز و پیشرفت فرایند بهینه‌سازی تمایل دارند. در واقع در تکرارهای بیشتر فرایند، پیشرفت بهینه‌سازی در عبور از فاز شناسایی به بهره‌برداری حاصل می‌شود که در این الگوریتم از طریق تغییر تناسب شدت‌های s, a, c, f, e سعی شده است تا این پیشرفت به دست آید [۱۰].

۵.۲. تابع هدف پیشنهادی

برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت از تابع دو هدفه ذیل استفاده شده است:

$$OF = (W_{FF} \times FF^{BOC}) + (W_{K_{eff}} \times K_{eff}^{EOC}), \quad (8)$$

که در آن W_{FF} و $W_{K_{eff}}$ ضریب وزنی هر یک از متغیرها است و به ترتیب با انجام چندین آزمایش و با استفاده از آزمون و خطا برابر با ۰/۹۹ و ۰/۰۱- در نظر گرفته شده است، FF^{BOC} تابع برازندگی برای ابتدای چرخه بوده که در ادامه توضیح داده می‌شود و K_{eff}^{EOC} ضریب تکثیر مؤثر قلب برای انتهای چرخه است.

به عنوان هدف اول در ابتدای چرخه از تابع برازندگی معرفی شده توسط خوش‌احوال و همکاران با هدف هموارسازی توزیع قدرت شعاعی در ابتدای چرخه استفاده شده است. این تابع با استفاده از نرمال‌سازی قدرت شعاعی در هر یک از مجتمع‌ها (رابطه (۹-۱۱)) و کمینه‌سازی رابطه (۱۳) باعث نزدیک شدن توزیع قدرت شعاعی در هر یک از مجتمع‌ها به عدد ۱ (کاهش قله توان و افزایش قعر توان هر یک از مجتمع‌های سوخت) یا به زبان دیگر هموارسازی توزیع قدرت شعاعی می‌شود [۲۳].

$$P_t = \sum_{i=1}^N P_i, \quad (9)$$

$$P_{avg} = \frac{P_t}{N}, \quad (10)$$

$$PPF_i = \frac{P_i}{P_{avg}}, \quad (11)$$

$$F_p = \begin{cases} \frac{PPF}{PPF_{max}} (\sum_{i=1}^N (PPF_i - 1)^2) & \text{if } PPF > PPF_{max} \\ 0 & \text{if } PPF < PPF_{max} \end{cases} \quad (12)$$

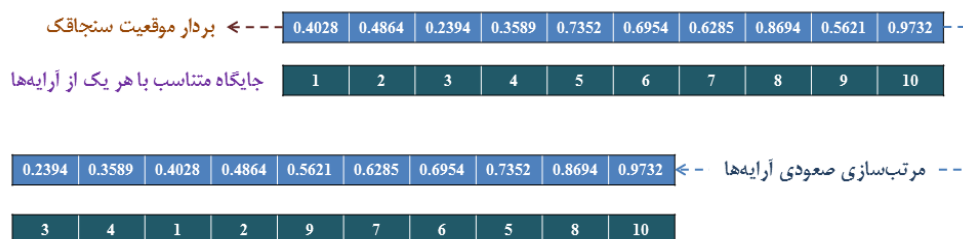
$$FF^{BOC} = (\sum_{i=1}^N (PPF_i - 1)^2) + F_p, \quad (13)$$

N تعداد مجتمع‌ها، P_i قدرت تولیدی هر یک از مجتمع‌ها، P_t قدرت تولیدی کل مجتمع‌ها، P_{avg} قدرت میانگین کل مجتمع‌ها و PPF_i ضریب قله توان هر یک از مجتمع‌ها است. PPF بیشینه ضریب قله توان در هر الگوی پیشنهادی برای قلب و PPF_{max} بیشینه مقدار مجاز ضریب قله توان است [۲۳]. با توجه به گزارش‌های محاسبات و شبیه‌سازی‌های قلب اسمارت، بیشینه مقدار مجاز ضریب قله توان برابر با ۱/۵۵ در نظر گرفته شده است [۲۴]. F_p مقدار معرفی شده به عنوان خطا بوده که اگر بیشینه ضریب قله توان در یک چیدمان از PPF_{max} بیشتر شد، مقدار F_p به تابع برازندگی اضافه شود تا تابع برازندگی بزرگ‌تر شده و انتخاب نشود. هدف دوم نیز برای انتهای چرخه در نظر گرفته شده که به افزایش ضریب تکثیر مؤثر در انتهای چرخه (K_{eff}^{EOC}) و در واقع افزایش طول چرخه راکتور منجر خواهد شد.

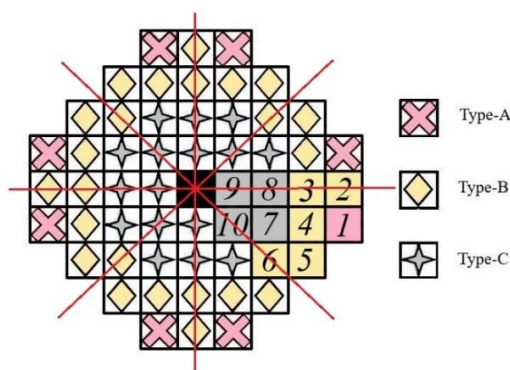
۶.۲. نحوه رمزگذاری در بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت

برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت، هر سنجاقک نماینده یک آرایش مجتمع‌های سوخت است که در هر تکرار به روزرسانی شده و الگوی جدیدی ایجاد می‌کند. بنابراین بهینه‌سازی با در نظر گرفتن ۴۰ عدد سنجاقک در ۶۰ بار تکرار باعث بررسی تابع هدف برای ۲۴۰۰ الگو از مجتمع‌های سوخت می‌شود که ممکن است تکراری نیز باشند.

متناظر با هر یک از آرایه‌های بردار موقعیت سنجاقک، جایگاهی متناسب با محل قرارگیری آن آرایه در بردار به عنوان آرایه اول، دوم، سوم و غیره در نظر گرفته می‌شود. هر یک از آرایه‌ها ارزش عددی منحصر به فرد خود را دارند و در هر تکرار پس از به روز رسانی و



شکل ۴. نحوه رمزگذاری بردار موقعیت سنجاقک به طول ۱۰ آرایه.



شکل ۵. مجتمع‌های سوخت متناظر با محل آرایه‌های بردار موقعیت سنجاقک.

و همینطور تا آخر مقدار آرایه دهم معرف نوع مجتمع دهم است.

با توجه به شکل ۵، اعداد ۱ تا ۱۰ به ده مجتمع سوخت در حالت اولیه به شکل بردار [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰] نسبت داده شده است (که این بردار در واقع معرف جایگاه آرایه‌های بردار موقعیت سنجاقک اولیه است). بنابراین مقدار اولین آرایه بردار به‌روزشده معرفی می‌کند که اولین مجتمع با چه نوع از مجتمع‌ها باید جایگزین شود. یعنی اگر برابر ۱ بود معرف مجتمع نوع A، اگر یکی از اعداد ۲ تا ۶ بود معرف مجتمع نوع B و اگر یکی از اعداد ۷ تا ۱۰ بود معرف مجتمع نوع C است.

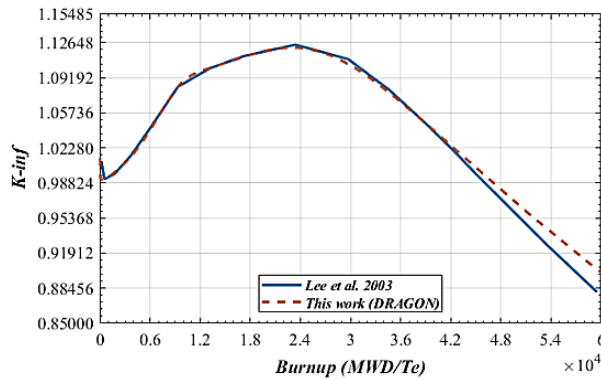
۳. نتایج اجرای محاسبات

۳.۱. نتایج محاسبات سلولی

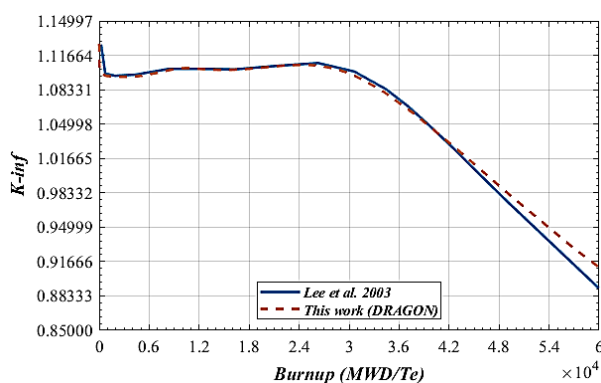
مقدار ضریب تکثیر بی‌نهایت برحسب مصرف سوخت در حالت گرم کامل قدرت با مقدار گزارش شده در مرجع [۲۴]، برای مجتمع‌های نوع A، B و C در شکل‌های ۶ تا ۸ مقایسه شده است. با توجه به شکل ۶، به دلیل وجود گادولینیوم

منظم شدن صعودی مقدار آنها، بردار جایگاه متناسب با هر یک از آرایه‌ها به عنوان مثال از [۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰] به [۳، ۴، ۱، ۲، ۹، ۷، ۶، ۵، ۸، ۱۰] تغییر می‌کند (شکل ۴). در تکرارهای بعدی مقدار آرایه‌های بردار موقعیت سنجاقک بر اساس رویه بهینه‌سازی الگوریتم سنجاقک تغییر کرده و به طور متناسب باعث تغییر بردار جایگاه هر یک از آرایه‌ها خواهد شد و تکرار متوالی این روند منجر به بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت می‌شود.

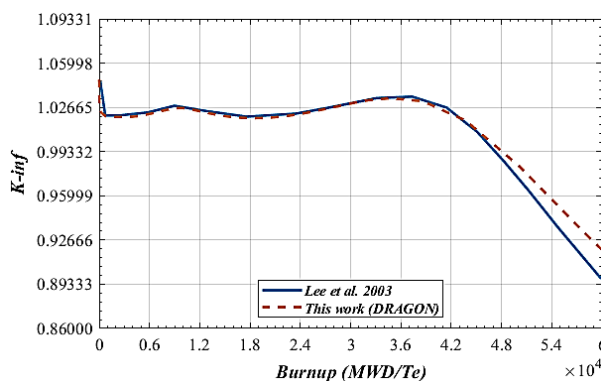
برای اسمارت در تقارن یک هشتم، تعداد ۱۱ مجتمع وجود دارد که برای یکسان نگه داشتن توزیع چگالی قدرت در قلب راکتور، مجتمع مرکزی قلب ثابت در نظر گرفته شده است. برای برقراری ارتباط میان الگوریتم سنجاقک و محاسبات قلب پارکس، محل آرایه‌های بردار موقعیت سنجاقک، یعنی برداری به شکل [۱، ۲، ۳، ۴، ۱، ۲، ۹، ۷، ۶، ۵، ۸، ۱۰] که هر بار با به‌روز رسانی سنجاقک جای آرایه‌های آن تغییر می‌کند با ورودی کد محاسباتی پارکس رمزگذاری شده است. یعنی مقدار آرایه اول معرف نوع مجتمع اول، مقدار آرایه دوم معرف نوع مجتمع دوم



شکل ۶. تغییرات ضریب تکثیر بی‌نهایت بر حسب مصرف سوخت برای مجتمع نوع A.



شکل ۷. تغییرات ضریب تکثیر بی‌نهایت بر حسب مصرف سوخت برای مجتمع نوع B.



شکل ۸. تغییرات ضریب تکثیر بی‌نهایت بر حسب مصرف سوخت برای مجتمع نوع C.

کد دراگون و مرجع بعد از گذشت ۴۳۰۰۰ MWD/Te، ناشی از تفاوت بین کتابخانه داده‌های هسته‌ای (مجموعه سطوح مقطع محاسبه شده در شرایط مختلف) و تفاوت بین روش‌های محاسبات (محاسبه معادله ترابرد، تهی‌سازی و از بین رفتن مواد، خودحفاظی، حل دو گروهی و چندگروهی نوترون و غیره) در کدهای شبیه‌سازی است [۲۵]. از آنجایی که محاسبه نوترونیک

بیشتر در مجتمع نوع A نسبت به مجتمع‌های دیگر، مقدار ضریب تکثیر بی‌نهایت با افزایش مصرف سوخت و مصرف شدن جاذب سوختنی گادولینیوم با شیب زیاد افزایش می‌یابد و در ادامه با سوختن اورانیوم و کم شدن مقدار آن پس از گذشت MWD/Te ۲۴۰۰۰ از مصرف سوخت، ضریب تکثیر بی‌نهایت، کم می‌شود. عدم قطعیت محاسبات ضریب تکثیر بی‌نهایت و اختلاف آن بین

1.661	1.584	1.368	1.043	0.539
1.789	1.692	1.423	1.058	0.489
1.865	1.749	1.444	1.055	0.465
	1.511	1.300	0.949	0.380
	1.598	1.330	0.936	0.325
	1.639	1.342	0.924	0.305
DRAGON/PARCS (This work)		1.120	0.706	
CASMO3/MASTER (Chang Hyo Kim et al.)		1.113	0.625	
MCNAP (Chang Hyo Kim et al.)		1.104	0.594	

شکل ۹. توزیع قدرت قلب برای حالت سرد صفر قدرت در ابتدای چرخه در تقارن $\frac{\infty}{8}$.

1.542	1.482	1.313	1.060	0.604
1.688	1.606	1.380	1.071	0.538
1.714	1.632	1.386	1.072	0.529
	1.424	1.258	0.977	0.443
	1.527	1.299	0.958	0.374
	1.544	1.300	0.955	0.366
DRAGON/PARCS (This work)		1.123	0.752	
CASMO3/MASTER (Chang Hyo Kim et al.)		1.155	0.664	
MCNAP (Chang Hyo Kim et al.)		1.114	0.651	

شکل ۱۰. توزیع قدرت قلب برای حالت گرم صفر قدرت در ابتدای چرخه در تقارن $\frac{\infty}{8}$.

1.456	1.410	1.280	1.078	0.644
1.487	1.444	1.316	1.117	0.613
1.515	1.468	1.327	1.121	0.602
	1.366	1.236	0.999	0.477
	1.400	1.262	1.012	0.429
	1.422	1.270	1.007	0.418
DRAGON/PARCS (This work)		1.129	0.779	
CASMO3/MASTER (Chang Hyo Kim et al.)		1.139	0.721	
MCNAP (Chang Hyo Kim et al.)		1.133	0.705	

شکل ۱۱. توزیع قدرت قلب برای حالت گرم کامل قدرت در ابتدای چرخه در تقارن $\frac{\infty}{8}$.

سرد صفر قدرت^۲، گرم صفر قدرت^۳ و گرم کامل قدرت داده شده است. خط اول مقادیر محاسبه شده با استفاده از کد پارکس، خط دوم و سوم به ترتیب مقادیر گزارش شده توسط کد MASTER و MCNAP را نشان می‌دهد [۲۶].

با توجه به شکل‌های ۹ تا ۱۱، برای حالت میله‌های کنترل

قلب اسمارت با استفاده از کد پارکس تا انتهای چرخه به مقدار بیشینه سوختن^۱ 45000 MWd/Te می‌رسد، به محاسبات سلولی و سطوح مقاطع تولیدی از این روش می‌توان استناد کرد.

۲.۳. نتایج محاسبات قلب

در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مقادیر توزیع قدرت شعاعی برای حالات

۲. Cold zero power (CZP)

۳. Hot zero power (HZZP)

۱. Burnup

جدول ۳. مقدار ضریب تکثیر مؤثر برای ابتدای چرخه.

وضعیت میله کنترل	کد محاسبات سلولی	کد محاسبات قلب	ضریب تکثیر مؤثر (گرم کامل قدرت)	ضریب تکثیر مؤثر (گرم صفر قدرت)	ضریب تکثیر مؤثر (سرد صفر قدرت)
تمام میله‌ها خارج	DRAGON	PARCS	۱/۰۵۱۰۴۷	۱/۰۸۷۴۶۵	۱/۱۷۲۱۴۸
	CASMO\3 [۲۴]	MASTER [۲۴]	۱/۰۵۵۸۶۰	۱/۰۷۱۵۲۹	۱/۱۷۳۰۰۵
	MCNAP [۲۴]		۱/۰۶۰۵۷	۱/۰۶۹۶۵	۱/۱۷۰۱۹
تمام میله‌ها داخل	DRAGON	PARCS	۰/۷۸۹۷۹	۰/۸۱۰۵۹	۰/۹۰۰۵۸
	CASMO\3 [۲۴]	MASTER [۲۴]	۰/۷۸۶۴۴	۰/۷۹۳۰۹	۰/۹۰۵۷۲
	MCNAP [۲۴]		۰/۷۸۹۱۷	۰/۷۹۴۰۰	۰/۸۹۹۸۵

دارد.

با انجام محاسبات قلب راکتور با استفاده از کد پارکس مقدار ضریب تکثیر مؤثر در حالات سرد صفر قدرت، گرم صفر قدرت و گرم کامل قدرت برای صحت سنجی در ابتدای چرخه محاسبه شده و در جدول ۳ با مقادیر گزارش شده در مرجع [۲۴]، در دو وضعیت میله کنترل داخل و خارج مقایسه شده است. با توجه به جدول ۳، محاسبات با کد دراگون و پارکس اختلاف قابل قبولی با مرجع نشان می‌دهد. برای حالت سرد صفر قدرت، حالت گرم صفر قدرت و حالت گرم کامل قدرت، اختلاف نسبی بین DRAGON/PARCS و CASMO-3/MASTER بدون حضور میله کنترل به ترتیب برابر ۰/۰۷۳ و ۱/۴۸۷ و ۰/۴۵۵ درصد است.

۳.۳. نتایج مدیریت سوخت

بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت از نقطه نظر اقتصادی برای ساخت نیروگاه هسته‌ای بسیار مهم است. به همین دلیل آرایش بهینه مجتمع‌های سوخت باید به شکلی تعریف شود که حداکثر طول چرخه را برای موجودی سوخت داده شده داشته باشد، که به عنوان مثال می‌توان با تعریف محدودیت برای ضریب قله توان به این مهم دست یافت. تعداد زیاد ترکیبات احتمالی برای آرایش مجتمع‌های سوخت در قلب راکتور،

کاملاً خارج از قلب راکتور، بیشینه قدرت در مجتمع مرکزی و کمینه قدرت در مجتمع گوشه قلب که بیشترین مقدار گادولینیوم را دارد، حاصل شده است. در این تحقیق برای حالت گرم کامل قدرت، مقدار بیشینه ۱/۴۵۶ و مقدار کمینه ۰/۴۷۷ محاسبه شده است.

در راکتورهای کوچک ماژولار به دلیل کوچک بودن قلب، نشت نوترون بیشتر از راکتورهای معمولی است. بنابراین طراحی بازتابنده برای حفظ بحرانیت و بیشینه‌سازی طول چرخه در این نوع راکتورها بسیار مهم بوده و باید در محاسبات به صورت دقیق مدل شود. برای محاسبه تأثیر بازتابنده‌ها در محاسبات قلب به روش دو مرحله‌ای، به ضرایب گروهی مربوط به بازتابنده‌ها (ثابت پخش و سطوح مقطع جذب و پراکندگی) احتیاج است. این مقادیر با معادل‌سازی بازتابنده در کدهای سلولی استخراج می‌شود. در راکتورهای بزرگ که احتیاج به در نظر گرفتن دقیق نشت نوترون نیست، معادل‌سازی در کد DRAGON نتیجه قابل قبولی می‌دهد اما در راکتورهای کوچک به کدهای محاسباتی دقیق‌تر احتیاج است؛ مانند کد CASMO3 که با قابلیت تولید سطوح مقاطع برای بازتابنده‌های شعاعی و محوری معرفی شده است [۲۷ و ۲۸]. بنابراین همانطور که در شکل‌های ۹ تا ۱۱ مشاهده می‌شود، محاسبات قدرت برای مجتمع‌های کناری اختلاف بیشتری با مقادیر گزارش شده

جدول ۴. نتایج تحلیل حساسیت در تعداد سنجاکک‌ها.

K_{eff}^{EOC}	PPF^{BOC}	OF	تعداد تکرار	تعداد سنجاکک
۱/۰۰۴۱۹۹	۱/۳۱۱	۰/۲۴۸۰۳۵	۶۰	۱۰
۱/۰۰۳۹۵۶	۱/۲۳۵	۰/۱۸۲۵۴۲	۶۰	۲۰
۰/۹۹۸۶۹۴	۱/۲۶۴	۰/۲۳۹۸۳۹	۶۰	۳۰
۱/۰۰۳۹۵۶	۱/۲۳۵	۰/۱۸۲۵۴۲	۶۰	۴۰

جدول ۵. نتایج تحلیل حساسیت در تعداد تکرارها.

K_{eff}^{EOC}	PPF^{BOC}	OF	تعداد تکرار	تعداد سنجاکک
۰/۹۹۸۵۴۳	۱/۱۶۷	۰/۲۰۶۳۶۳	۱۵	۴۰
۱/۰۰۳۹۵۶	۱/۲۳۵	۰/۱۸۲۵۴۲	۳۰	۴۰
۱/۰۰۳۹۵۶	۱/۲۳۵	۰/۱۸۲۵۴۲	۴۵	۴۰
۱/۰۰۳۹۵۶	۱/۲۳۵	۰/۱۸۲۵۴۲	۶۰	۴۰

جدول ۶. مقایسه مقدار بهینه تابع هدف.

متغیرها	محاسبات قلب بهینه	محاسبات قلب اسمارت
FF^{BOC}	۰/۱۹۴۵۲۷	۰/۹۰۵۹۳۱
K_{eff}^{EOC}	۱/۰۰۳۹۵۶	۰/۹۹۸۱۳۵

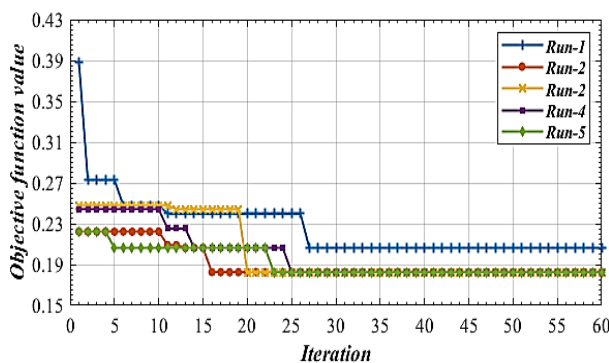
مجتمع‌های سوخت است، حاصل خواهد شد. از طرفی همان طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، مقدار بهینه تابع هدف برای ۳۰ سنجاکک با ۶۰ بار تکرار به دست نیامده است که دلیل آن می‌تواند تولید تصادفی جمعیت اولیه در الگوریتم‌های فراابتکاری باشد که با افزایش تعداد آزمایش سعی می‌شود اثر ناشی از تولید جمعیت اولیه تصادفی نیز کم شود. با این حال برای اطمینان بیشتر تعداد ۴۰ سنجاکک در ۶۰ بار تکرار بررسی شده تا تعداد الگوی بیشتری مورد ارزیابی قرار بگیرد.

جدول ۶ مقایسه مقادیر معرفی شده در تابع هدف را برای محاسبات قلب اسمارت و بهینه نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، الگوریتم سنجاکک به خوبی کمینه‌سازی تابع برازندگی معرفی شده در ابتدای چرخه را انجام داده و بیشینه‌سازی ضریب تکثیر مؤثر برای انتهای چرخه نیز منجر به افزایش حدود ۰/۰۰۵۸۲۱ در ضریب تکثیر مؤثر شده است؛ که این نتایج اجرای صحیح بهینه‌سازی را اثبات می‌کنند.

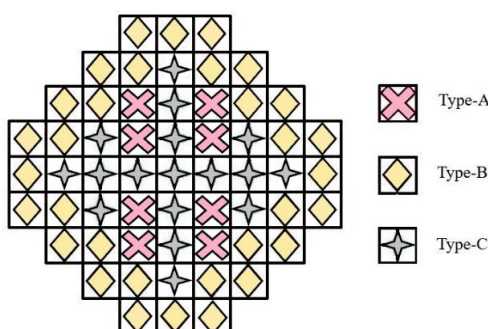
پیچیدگی دستیابی به آرایش بهینه را بیشتر می‌کند، یعنی هرچه تعداد مجتمع‌های سوخت در قلب راکتور بیشتر باشد، بهینه‌سازی پیچیده‌تر می‌شود، اما می‌توان با در نظر گرفتن تقارن در قلب راکتور، این پیچیدگی را کمتر کرد.

به منظور بررسی تأثیر تعداد سنجاکک و تکرار در بهینه‌سازی الگوی مجتمع‌های سوخت اسمارت، تحلیل حساسیت در دو مرحله اعمال شده است. در مرحله اول بهینه‌سازی توسط جمعیت تصادفی سنجاکک‌ها در ۶۰ بار تکرار و در مرحله دوم بهینه‌سازی توسط ۴۰ سنجاکک در مقدار تصادفی از تکرارها آزمایش شده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت در تعداد سنجاکک و تکرار به ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است.

با توجه به جداول ۴ و ۵ می‌توان دریافت که مقدار بهینه تابع هدف در بهینه‌سازی با ۲۰ سنجاکک و ۶۰ تکرار یا ۳۰ تکرار و ۴۰ سنجاکک که معادل با بررسی ۱۲۰۰ الگوی



شکل ۱۲. نمودار پاسخ بهینه ۴۰ سنجاقک بر حسب ۶۰ تکرار.



شکل ۱۳. آرایش بهینه مجتمع‌های سوخت قلب اسمارت.

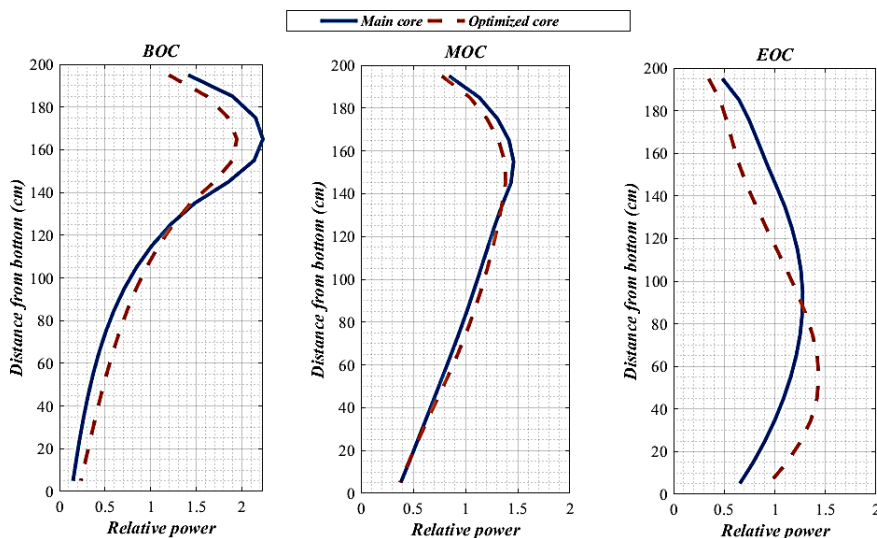
می‌دهد.

همان طور که از شکل ۱۴ مشخص است، قله توان محوری برای قلب بهینه در ابتدای چرخه به مقدار $0/3$ معادل با حدود 13% نسبت به قله توان محوری قلب اصلی کاهش یافته است. این رخداد می‌تواند به ایمنی بیشتر در ابتدای چرخه کمک کند. در وسط چرخه نیز به مقدار تقریباً ناچیزی قله توان محوری قلب بهینه کمتر از قلب اصلی است، اما در انتهای چرخه بر خلاف طول چرخه قله توان محوری قلب بهینه نسبت به قلب اصلی به مقدار حدوداً $0/1$ یا معادل $7/5\%$ افزایش داشته است و علاوه بر این، قله توان محوری برای قلب بهینه پایین‌تر از قلب اصلی و حدود ارتفاع 60 سانتی‌متر رخ داده است. اما از آنجایی که ارتفاع قلب با افزایش دما رابطه مستقیم دارد و پایین قلب خنک‌تر از بالای قلب بوده و همچنین جاذب بور بیشتری در پایین قلب موجود است، این افزایش قله توان محوری ممکن است اختلال و حادثه‌ای ایجاد نکند که باید بررسی و مهندسی شود.

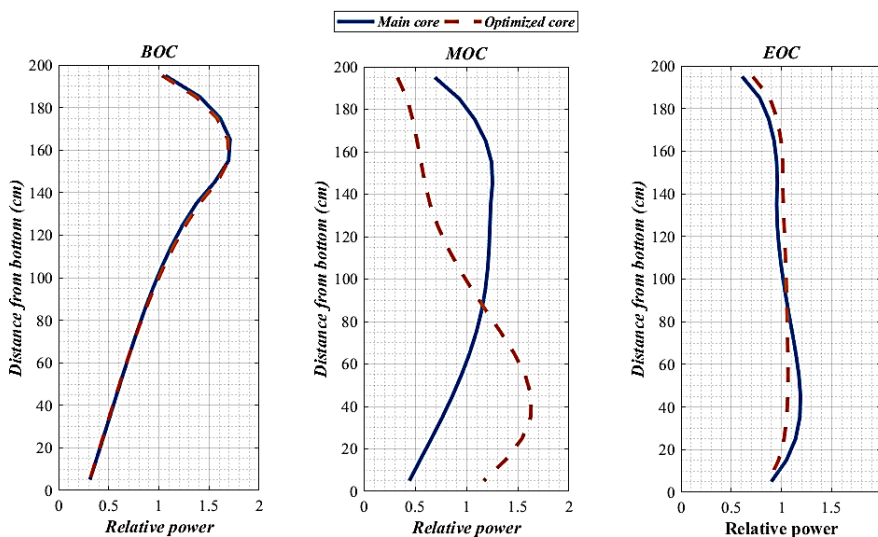
در شکل ۱۲ تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار رسم شده است. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، مقدار بهینه تابع هدف برای اجرای دوم در تعداد ۱۶ تکرار به وسیله ۴۰ سنجاقک و در اجرای چهارم مقدار بهینه در تعداد ۲۵ تکرار به دست آمده است. اما برای اجرای اول پس از مقدار ۶۰ تکرار جواب بهینه به دست نیامده است؛ که همانطور که گفته شد، ناشی از تولید تصادفی جمعیت اولیه در الگوریتم‌های فراابتکاری است.

شکل ۱۳ الگوی بهینه مجتمع‌های سوخت برای تابع هدف معرفی شده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۱۳، با این که تعداد هر نوع از مجتمع‌ها با تعداد آنها در قلب اصلی (قلب پیشنهادی توسط طراح) برابر است اما دیگر در آرایش مجتمع‌های تقارن $1/8$ وجود ندارد.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مقدار توان نسبی محوری قلب راکتور را در ابتدا، انتها و وسط چرخه به ترتیب برای حالتی که تمام میله‌های کنترل خارج و داخل قلب راکتور هستند، نشان



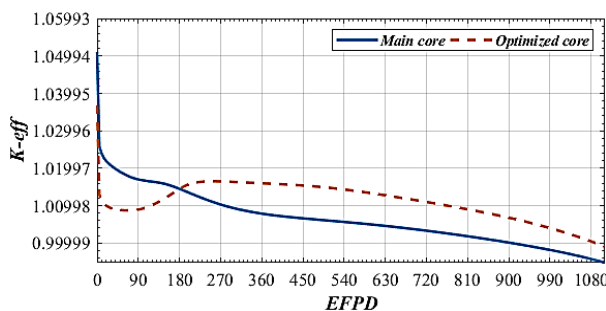
شکل ۱۴. توان نسبی محوری راکتور در حالت تمام میله‌های کنترل خارج قلب.



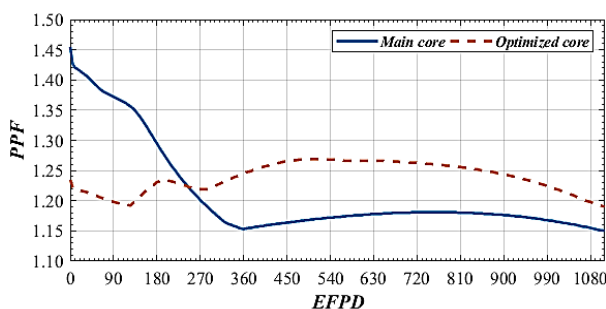
شکل ۱۵. توان نسبی محوری راکتور در حالت تمام میله‌های کنترل داخل قلب.

نگران‌کننده شده است. با این حال برای غلبه بر اختلال ایجاد شده در توزیع توان محوری و ایجاد قله‌ی توان نسبتاً زیاد در اواسط چرخه برای الگوی بهینه در اثر عاری بودن راکتور از محلول اسید بوریک، می‌توان الگو و جنس میله‌های کنترل و همچنین ورود و خروج نوآورانه آنها را مورد بررسی قرار داد. در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب مقدار ضریب تکثیر مؤثر و ضریب قله‌ی توان در طول چرخه و حالت گرم کامل قدرت برای دو قلب اصلی و بهینه در حالت تمام میله‌های کنترل خارج از قلب رسم شده‌اند. با توجه به شکل ۱۶، در ابتدای کار

با توجه به شکل ۱۵ در حالتی که تمام میله‌های کنترل در داخل قلب قرار دارد، توزیع توان محوری برای دو قلب بهینه و اصلی در ابتدای چرخه کاملاً یکسان حاصل شده است، اما در اواسط چرخه وجود میله‌های کنترل در داخل قلب برای الگوی بهینه باعث شده است تا قله‌ی توان محوری در پایین قلب و با اختلاف زیاد نسبت به الگوی اصلی ایجاد شود که می‌تواند رخدادی نگران‌کننده باشد. وجود میله‌های کنترل در داخل قلب برای دو الگوی بهینه و اصلی در انتهای چرخه نیز موجب ایجاد توزیع توان محوری هموار و بدون قله‌ی توان زیاد و



شکل ۱۶. نمودار تغییرات ضریب تکثیر مؤثر بر حسب روز برای حالت گرم کامل قدرت.



شکل ۱۷. نمودار تغییرات ضریب قله توان بر حسب روز برای حالت گرم کامل قدرت.

ایجاد می‌شود که مقدار آن ۱/۲۷ است. با این که مقدار آن کمتر از مقدار ضریب قله توان در قلب اصلی است اما در اوایل چرخه رفتاری نوسانی نشان می‌دهد که ممکن است در ایمنی عملیات بهره‌برداری از راکتور تأثیر منفی بگذارد.

۴. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

راکتورهای کوچک ماژولار با مزایایی مانند قابلیت حمل آسان، کاهش چگالی قدرت، محدود کردن حادثه بزرگ از دست رفتن خنک‌کننده و افزایش طول چرخه کاری راکتور، معرفی شده‌اند. به طور خاص، محاسبات ضریب تکثیر، قدرت و ضریب قله توان برای اسمارت به عنوان راکتور کوچک ماژولار عاری از محلول اسیدبوریک با استفاده از کد محاسبات سلولی دراگون و کد محاسبات قلب پارکس بررسی شد.

در این تحقیق، با تعریف یک تابع دو هدفه و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی سنجاکک به عنوان یک روش امیدوارکننده، بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت اسمارت با موفقیت انجام شد. تابع هدف پیشنهاد شده برای بهینه‌سازی آرایش مجتمع‌های سوخت با توجه به محدودیت‌های ایمنی و افزایش

راکتور ضریب تکثیر مؤثر قلب بهینه کمتر از قلب اصلی محاسبه شده که به عملیات ایمن‌تر کمک خواهد کرد. با ادامه کار راکتور، ضریب تکثیر مؤثر قلب بهینه به دلیل وجود جاذب قوی گادولینیوم تا ۶۰ روز اول رفتار کاهشی نشان می‌دهد و سپس با مصرف شدن گادولینیوم و تمام شدن آن تا روز ۲۴۰ مقدار ضریب تکثیر مؤثر افزایش می‌یابد و در ادامه با مصرف شدن سوخت باقی‌مانده، مقدار ضریب تکثیر مؤثر با شیب ملایم تا انتهای چرخه کاهشی است. در نتیجه رفتار نوسانی در مقدار ضریب تکثیر مؤثر برای اوایل چرخه مشاهده می‌شود. همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، قلب بهینه شده توسط الگوریتم پیشنهادی در این تحقیق سبب افزایش قابل توجه ۱۸۵ روزه در طول چرخه شده است.

با توجه به شکل ۱۷، ضریب قله توان قلب اصلی در ابتدای چرخه قرار دارد و برابر ۱/۴۵ است که تا ۳۶۰ روز اول با شیب زیادی کاهش می‌یابد. در ادامه کار راکتور تا انتهای چرخه، مقدار ضریب قله توان بیشتر از ۱/۱۸ نمی‌شود و همچنین بدون نوسان با شیب ملایم تغییر می‌کند که به ایمنی عملیات کمک می‌کند. اما برای قلب بهینه ضریب قله توان در اواسط چرخه

از بهینه‌سازی الگوریتم سنجاکک و تابع هدف پیشنهادی ممکن است روش جدیدی در بهینه‌سازی راکتورهای هسته‌ای ایجاد شود.

در این تحقیق بهینه‌سازی الگوی مجتمع‌های سوخت قلب اسمارت در حالت پایدار و بدون حضور میله کنترل انجام شد. همان طور که اشاره شد بهینه‌سازی الگوی میله‌های کنترل و ورود و خروج نوآورانه آنها می‌تواند از موضوعات پیشنهادی برای تحقیق و پژوهش‌های آینده باشد. همچنین پس از بهینه‌سازی الگوی میله‌های کنترل و محاسبات حالت ناپایدار، محاسبات ترموهیدرولیکی و ایمنی با استفاده از کد‌های محاسباتی مربوطه می‌تواند از مسائل چالش برانگیز دیگری برای این الگوی نوین باشد.

طول چرخه مصرف سوخت یکی از مهم‌ترین مزایای رویکرد اعمال شده است. در این کار، بهینه‌سازی ضریب تکثیر مؤثر در انتهای چرخه باعث افزایش طول چرخه مصرف سوخت به اندازه ۱۸۵ روز شده است. علاوه بر این، کمینه‌سازی تابع برازندگی اشاره شده برای ابتدای چرخه در تعریف تابع هدف منجر به توزیع قدرت یکنواخت‌تر و بهبود ایمنی شده است.

در اوایل چرخه برای قلب بهینه ضریب تکثیر مؤثر رفتاری افزایشی نشان می‌دهد و ضریب قله توان نیز نوسان دارد. شاید با تعریف میله‌های کنترل و تنظیم ورود و خروج نوآورانه آنها در ۴ ماه اول بتوان نوسانات ابتدای چرخه را کنترل کرد تا فرایندی با ایمنی بالاتری به دست آید. همچنین با توجه به نتایج، طول چرخه بیشتر و توزیع یکنواخت‌تر قدرت، با استفاده

مراجع

1. L A Adamovich, G I Grechko, and V A Shishkin, *Nuclear Engineering and Design* **173** (1997) 175.
2. P J Turinsky and G T Parks, *Advances in Nuclear Science and Technology* **26** (1999) 137.
3. R B Stout and A H Robinson, *Nuclear Technology* **20** (1973) 86.
4. K C Okafor and T Aldemir, *Nuclear Technology* **81** (1988) 381.
5. Y P Mahlers, *Annals of Nuclear Energy* **22** (1995) 29.
6. M Sadighi, S Setayeshi, and A A Salehi, *Annals of Nuclear Energy* **29** (2002) 41.
7. A Yamamoto and K Kanda, *Journal of Nuclear Science and Technology* **34** (1997) 882.
8. F Khoshahval, et al., *Annals of Nuclear Energy* **37** (2010) 1263.
9. M Jamalipour, et al., *Annals of Nuclear Energy* **54** (2013) 134.
10. S A Mirjalili, *Neural Computing and Applications* **27** (2016) 1053.
11. IAEA, "Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS)", Austria (2016).
12. G Locatelli, C Bingham, and M Mancini, *Progress in Nuclear Energy* **73** (2014) 75.
13. J Mart, A Klein, and A Soldatov, *Nuclear Technology* **188** (2014) 8.
14. S Q Zee, et al., "Development of Design Technology for Integral Reactor", KAERI/RR-2217/2001, Taejon, Korean (2002).
15. M K Rowinski, T J White, and J Zhao, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **44** (2015) 643.
16. J C Kim, et al., *Journal of the Korean Nuclear Society* **30** (1998) 342.
17. P Thomet, *Nuclear Technology* **127** (1999) 259.
18. A Norouzi, et al., *Progress in Nuclear Energy* **53** (2011) 449.
19. A Zameer, et al., *Nuclear Science and Techniques* **29** (2018) 34.
20. G Marleau, A Hebert, and R Roy, "A User Guide for DRAGON", Ecole Polytechnique de Montreal, Montreal (2016).
21. T J Downar, Y Xu, and V Seker, "PARCS v3.0 U.S. NRC Core Neutronics Simulator USER MANUAL", University of Michigan, Michigan (2010).
22. M Mafarja, et al., *Studies in Computational Intelligence* **811** (2020) 47.
23. F Khoshahval, et al., *Annals of Nuclear Energy* **37** (2010) 1263.
24. C H Kim, et al., "Development of core design/analysis technology for integral reactor; Verification of SMART Nuclear Design by Monte Carlo Method", KAERI-CM-487/2001, Taejon, Korean (2002).
25. D Rochman, et al., *Nuclear Data Sheets* **139** (2017) 1.
26. C C Lee, et al., *GENES4/ANP2003 Conference*, (2003) 15.
27. J S Song, et al., *Proceedings of the Korean Nuclear Society Conference* (1996) 244.
28. C H Lee, et al., "Nuclear Design Manual for Generation of Cross Section and Heterogeneous Form function for CASMO-3/MASTER", KAERI/TR-782/96, Taejon (1997).