



بهینه‌سازی چیدمان مجتمع‌های سوخت یک رآکتور PWR با استفاده از الگوریتم PESA-II و در نظر گرفتن پارامترهای نوترونی و ترموهیدرولیکی

رحمان قراری^۱، بهزاد سلماسیان^۲، امید صفرزاده^{۳*}

۱. پژوهشکده‌ی رآکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، کدپستی: ۷۱۹۳۶۱۶۵۴۸، شیراز - ایران

۳. دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، کدپستی: ۳۳۱۹۱۱۸۶۵۱، تهران - ایران

*Email: safarzadeh@shahed.ac.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۳/۱۳

چکیده

روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی آرایش بهینه مجتمع‌های سوخت قلب رآکتور KWU با اهداف مسطح کردن توزیع توان در قلب رآکتور و افزایش ضریب تکثیر استفاده شده است. هم‌چنین، تحلیل ترموهیدرولیکی به منظور بررسی آرایش جدید طی یک حادثه فرضی کاهش جریان خنک‌کننده انجام شده است. برای این منظور از ترکیب الگوریتم PESA-II با کد بسط یافته نودال (برای انجام محاسبات نوترونیکی) و کد COBRA-EN (برای انجام محاسبات ترموهیدرولیکی) استفاده شده است. نتایج نشان دادند که با جابه‌جایی چینش مجتمع‌های سوخت پارامترهای نوترونیکی شامل ضریب تکثیر (افزایش از ۱،۰۰۴۷ به ۱،۰۰۵۸) و مسطح شدن توان بهبود یافتند. هم‌چنین برای چینش جدید بررسی شد که در صورت وقوع حادثه فرضی کاهش جریان خنک‌کننده تا ۱۵ درصد، رآکتور هم‌چنان می‌تواند در شرایط ایمن به کار خود ادامه دهد. علاوه بر این نتایج تأکید بر کارایی بهتر الگوریتم PESA-II نسبت به الگوریتم SPEA دارند.

کلیدواژه‌ها: الگوریتم PESA-II، چینش مجتمع‌های سوخت، کاهش جریان خنک‌کننده، کدهای بسط نودال و COBRA-EN

Loading pattern optimization of a PWR reactor fuel assemblies using PESA-II algorithm by considering neutronic and thermal-hydraulic parameters

R. Gharari¹, B. Salmasian², O. Safarzadeh^{3*}

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

2. Faculty of Mechanical Engineering, Shiraz University, Postalcode: 7193616548, Shiraz - Iran

3. Faculty of Engineering, Shahed University, Postalcode: 3319118651, Tehran - Iran

Research Article

Received 22.1.2020, Accepted 2.6.2020

Abstract

The multi-objective optimization methods are widely used in various areas of science and engineering. In this paper, a multi-objective optimization algorithm has been used to design the optimal placement of fuel assemblies in the KWU reactor with the purposes of power flattening and increasing the multiplication factor. Also, thermal-hydraulic analysis has been performed to investigate the new arrangement during a hypothetical loss of coolant accident. For this purpose, the PESA-II algorithm is coupled with Nodal expansion code (for neutronic calculations) and COBRA-EN code (for thermal-hydraulic calculations). The results showed that the neutronic parameters including power flattening and the multiplication factor (increases from 1.0047 to 1.0058) improved by optimizing the fuel assemblies' placement. It was also investigated that during a hypothetical loss of coolant accident up to 15%, the reactor could continue to operate in the safe mode. In addition, the results have emphasized the better performance of the PESA-II algorithm than the SPEA algorithm.

Keywords: PESA-II algorithm, Arrangement of fuel assemblies, Loss of coolant flow, Nodal expansion and COBRA-EN codes



۱. مقدمه

گروهی ذرات مرتبه کسری برای بهینه‌سازی چیدمان سوخت رآکتور PWR با تابع هدف افزایش ضریب تکثیر و کاهش ضریب قله توان استفاده کردند [۷]. در این مطالعه برای محاسبات نوترونیکی از کدهای LEOPARD و MCRAC استفاده کردند [۷]. هم‌چنین از دیگر مطالعات انجام گرفته در این زمینه بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت می‌توان به کارهای روگزر^۳ [۸]، علیم^۴ [۹]، یلماز^۵ [۱۰]، خوش‌احوال و همکارانش [۱۱] اشاره کرد. این تحقیقات بیان‌کننده اهمیت استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مباحث مربوط به مدیریت سوخت هسته‌ای است.

از روش‌های بهینه‌سازی استفاده از الگوریتم‌های چندهدفه تکاملی است که بر پایه شکل‌دهی فضای پاسخ و تقسیم‌بندی آن، جنبه پارتو (جواب‌های مطلوب یا الگوهای مطلوب چینش است که کم‌ترین یا بیش‌ترین مقدار تابع هدف مفروض را با توجه به هدف بهینه‌سازی ایجاد می‌کنند) را تعیین می‌کند. الگوریتم PESA-II یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه تکاملی است که به علت سرعت هم‌گرایی بالا، کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف علمی و صنعتی دارد [۱۲-۱۴]. این الگوریتم توسط کرن^۶ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ منتشر شد [۱۵]. در بخش‌های بعدی این الگوریتم به صورت مفصل شرح داده شده است.

در این مقاله، بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت رآکتور PWR از نوع KWU با استفاده از الگوریتم PESA-II با هدف افزایش ضریب تکثیر و مسطح کردن توان انجام گرفته است. برای این منظور، از ترکیب الگوریتم PESA-II با کد محاسبات نوترونیک دو بعدی نودال (این کد معادله پخش نوترون دو گروهی را به روش بسط شار مرتبه دو حل می‌کند که توسط پورصالحی و همکارانش در سال ۲۰۱۲ بسط داده شد [۱۶]) استفاده شده است. کد نودال در مراجع [۱۵، ۱۷] صحت‌سنجی شده است. علاوه بر این، نتایج کار با نتایج الگوریتم‌های SPEA و SPEA-II مقایسه شده است تا مشخص شود کدام الگوریتم عملکرد بهتری در یافتن چینش بهینه مجتمع‌های سوخت دارد. نهایتاً، تغییرات پارامتر ترموهیدرولیکی کمینه انحراف از نقطه جوش هسته‌ای طی حادثه کاهش دبی جریان خنک‌کننده (یکی از حوادث محتمل عملکردی یک نیروگاه) برای چینش بهینه شده با استفاده از کد COBRA-EN بررسی شده است.

یکی از مهم‌ترین مسائلی است که امروزه در طراحی رآکتورهای هسته‌ای مدنظر است، افزایش و بهبود ایمنی ذاتی در نیروگاه‌های هسته‌ای همراه با کاهش هزینه‌ها و سادگی در طراحی و بهره‌برداری است. ایمنی ذاتی به معنای طراحی ایمن رآکتور بدون دخالت سامانه‌های حفاظتی در جهت حفظ یکپارچگی خودبه‌خودی قلب رآکتور در مواقع خاص و حوادث است [۱]. بهینه‌سازی چیدمان مجتمع‌های سوخت برای داشتن ایمنی ذاتی بالاتر و بهره‌وری بیش‌تر اقتصادی از اهمیت زیادی برخوردار است. بهینه‌سازی چیدمان مجتمع‌های یکی از مسایل مهم در زمینه هسته‌ای است. بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تابع هدف مورد خواست کاربر انجام می‌گیرد. به منظور بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت از روش‌های مختلف بهینه‌سازی بهره گرفته می‌شود که محققان زیادی در این زمینه مطالعه کرده‌اند. ایشی گورو و همکارانش [۲] از روش بهینه‌سازی تابش پروانه برای انتخاب چیدمان بهینه مجتمع‌های سوخت قلب رآکتور PWR استفاده کردند. آن‌ها افزایش طول سیکل، کاهش ضریب قله توان و افزایش مصرف سوخت را به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفتند [۲]. عقیلی نصر و همکارانش از روش خرس قطبی برای بهینه‌سازی چیدمان سوخت یک رآکتور VVER-۱۰۰۰ استفاده کردند. تابع هدف مورد استفاده متشکل از هم‌سطح‌سازی توان، مصرف سوخت و افزایش شاخص انحراف از نقطه جوش هسته‌ای^۱ در حالت عملکرد عادی نیروگاه بود [۳]. در این مطالعه از کدهای PARCS و COBRA برای محاسبات نوترونیکی و ترموهیدرولیکی استفاده شد [۳]. اکبری و همکارانش از روش رقابت استعماری^۲ برای بهینه‌سازی چیدمان سوخت یک رآکتور VVER-۱۰۰۰ با کدهای DRAGON و CITATION استفاده کردند [۴]. تابع هدف مورد استفاده افزایش ضریب تکثیر و کاهش ضریب قله توان بود [۴]. قراری و همکارانش از روش SPEA-II برای بهینه‌سازی چینش مجتمع سوخت یک رآکتور PWR استفاده کردند. هدف مطالعه افزایش ضریب تکثیر و مسطح‌سازی توان بود [۵]. محمودی و آقایی از روش جستجوی گرانشی و هم‌آوایی برای بهینه‌سازی چیدمان قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ استفاده کردند [۶]. تابع هدف مورد استفاده افزایش ضریب تکثیر و کاهش ضریب قله توان بود. ایشان از کدهای WIMS و PARCS برای محاسبات نوترونیکی استفاده کردند [۶]. زمیر و همکارانش از روش

3. Rogers
4. Alim
5. Yilmaz
6. Corne

1. Minimum Departure from Nucleate Boiling Ration (MDNBR)
2. Imperialist Competitive



۲. الگوریتم PESA-II

۱.۲ پیاده‌سازی الگوریتم

یکی از شناخته‌شده‌ترین الگوریتم‌های چندهدفه، الگوریتم چند هدفه انتخاب بر مبنای ناحیه پارتو (PESA-II) است که به صورت گسترده در علوم و مهندسی استفاده شده است [۱۲-۱۵]. این الگوریتم یک روش بهینه‌سازی تکاملی چندهدفه با عملگرهای ژنتیک و بر اساس شکل‌دهی فضای پارتو (جواب‌های مطلوب) است که در سال ۲۰۰۱ توسط کرن و همکارانش منتشر شد [۱۵]. فضای پارتو در این الگوریتم نشان می‌دهد که جواب‌ها تا چه اندازه به مطلوب بودن نزدیک هستند. هدف الگوریتم مشخص کردن و حفظ مجموعه جواب‌های نامغلوب یا مطلوب است که مجموعه این جواب‌های مطلوب تشکیل‌دهنده جبهه پارتو هستند. در این روش، دو یا چند هدف برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود که به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

$$\begin{cases} \min_x F(x) = (f_1(x), \dots, f_M(x)) \\ s.t. x \in X \end{cases} \quad (1)$$

که $X \in \mathbb{R}^n$ فضای جستجو با $x = (x_1, \dots, x_n)$ است و $F: X \rightarrow Y \subseteq \mathbb{R}^M$ شامل M هدف و Y فضای هدف است. اساساً، در این الگوریتم معیاری که برای کنترل نظم پاسخ‌ها وجود دارد استفاده از جدول‌هایی در فضای توابع هدف است. انتخاب والدها یا حذف پاسخ‌های اضافی در فضای بایگانی در این الگوریتم بر اساس ناحیه و جدول‌بندی در فضای پاسخ‌ها است [۱۵]. مراحل این الگوریتم در زیر شرح داده شده است.

۱. ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن‌ها و ایجاد یک بایگانی خالی: در این مرحله جمعیت اولیه ایجاد می‌شود. منظور از جمعیت اولیه، چینش‌های مختلف برای مجتمع‌های سوخت است. در این مرحله هنوز جوابی گرفته نشده و بایگانی خالی است.
۲. انتقال اعضای نامطلوب جمعیت به بایگانی و به‌روزرسانی تقسیم‌بندی‌ها.
۳. حذف اعضای اضافی با توجه به تقسیم‌بندی‌ها، موقعیت پاسخ‌ها و احتمال حذف (کنترل اعضای بایگانی): در این مرحله به سه صورت عمل می‌کنیم: الف) اگر یک جواب جدید توسط حداقل یکی از جواب‌های موجود در بایگانی مغلوب شود، جواب جدید باید کنار گذاشته شود، ب) اگر یک جواب جدید بر چند جواب موجود در بایگانی غلبه کند، جواب‌های مغلوب شده از بایگانی باید حذف شوند و

جواب جدید به بایگانی اضافه شود و اعضا به روز شوند و پ) اگر جواب جدید، هیچ عضوی از بایگانی را مغلوب نکند و یا خودش توسط عضوی مغلوب نشود، این جواب به بایگانی اضافه شود. اگر تعداد اعضای بایگانی از ظرفیت بایگانی فراتر رود، می‌توان یکی از اعضا را حذف نمود. از چرخه رولت^۱ برای حذف انتخابی استفاده می‌شود که این چرخه در مراجع [۱۲-۱۶] به صورت کامل توضیح داده شده است. سازوکار کلی چرخه به این صورت است که هر چه جواب بهتر باشد، احتمال انتخاب شدن زیادی دارد [۱۲-۱۶].

۴. بررسی شرایط خاتمه و ادامه دادن در صورت نیاز: اگر معیار اتمام حلقه برقرار شود، محاسبات خاتمه پیدا می‌کند و اعضای بایگانی نشان داده می‌شوند. در غیر این صورت، محاسبات ادامه می‌یابند.
 ۵. انتخاب والدین از بایگانی بر اساس نواحی و با توجه به تقسیم‌بندی‌ها و احتمال انتخاب: این انتخاب نیز بر پایه چرخه رولت انجام می‌گیرد.
 ۶. ایجاد جمعیت فرزندان (تقاطع و جهش^۲)
 ۷. ارزیابی جمعیت جدید
 ۸. تکرار از مرحله ۲ [۱۵].
- برای آشنایی بیشتر با نحوه پیاده‌سازی این الگوریتم می‌توانید به مرجع [۱۵] مراجعه نمایید.

۲.۲ اعتبارسنجی الگوریتم PESA-II

پارامترهای استفاده شده در الگوریتم در جدول ۱ نشان داده شده است. این پارامترها در حین مطالعات به صورت تجربی به دست آمده‌اند. به منظور اطمینان از دقت و صحت الگوریتم نوشته‌شده، مقدار کمینه توابع شافر^۳ و آکلی^۴ با این الگوریتم محاسبه شدند. نمودار توابع شافر و آکلی در شکل ۱ نشان داده شده‌اند و جدول ۲ ویژگی‌های این توابع را بیان می‌کند. این توابع دارای کمینه جهانی برابر صفر در نقطه (۰ و ۰) هستند. تابع آکلی دارای مقادیر کمینه و بیشینه محلی می‌باشد. جدول ۳ نتایج استفاده از الگوریتم PESA-II را پس از ۱۰ بار اجرا برای پیدا کردن کمینه مقادیر این توابع نشان می‌دهد. مطابق جدول ۳، الگوریتم توانسته است مقدار کمینه توابع شافر و آکلی را با دقت خوبی به دست آورد. پس از اطمینان از صحت و دقت الگوریتم، به مبحث بهینه‌سازی مجتمع سوخت در قلب رآکتور پرداخته می‌شود.

1. Roulette Wheel
2. Cross Over and Mutation
3. Schaffer
4. Ackley



جدول ۱. پارامترهای استفاده شده در الگوریتم PESA-II

پارامتر	مقدار
تعداد جمعیت	۱۰۰
جمعیت بایگانی	۵۰
تعداد تکرار	۱۲۰
احتمال تقاطع	۰٫۸
احتمال جهش	۰٫۲
نوع انتخاب	چرخ رولت

جدول ۳. نتایج الگوریتم PESA-II برای توابع شافر و آکلی

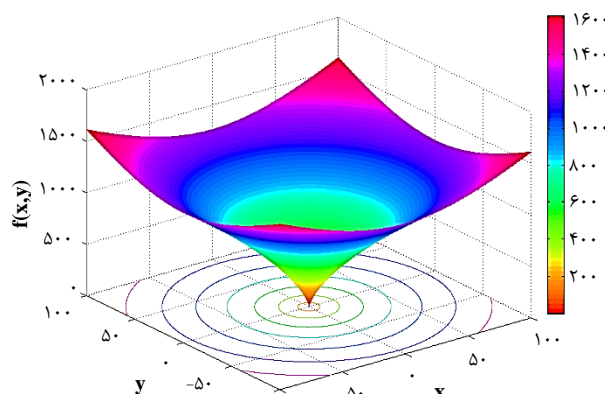
شماره اجرا	نتایج تابع شافر	نتایج تابع آکلی
اول	۰٫۰۰۰۰۱۱۴	۰٫۰۰۰۰۲۸۱
دوم	۰٫۰۰۰۰۱۱۶	۰٫۰۰۰۰۳۳۲
سوم	۰٫۰۰۰۰۱۱۰	۰٫۰۰۰۰۲۹۳
چهارم	۰٫۰۰۰۰۱۰۶	۰٫۰۰۰۰۳۴۹
پنجم	۰٫۰۰۰۰۱۰۵	۰٫۰۰۰۰۲۵۰
ششم	۰٫۰۰۰۰۱۱۳	۰٫۰۰۰۰۲۱۵
هفتم	۰٫۰۰۰۰۱۱۵	۰٫۰۰۰۰۲۳۳
هشتم	۰٫۰۰۰۰۱۱۲	۰٫۰۰۰۰۰۱۳
نهم	۰٫۰۰۰۰۱۱۹	۰٫۰۰۰۰۲۹۲
دهم	۰٫۰۰۰۰۱۰۳	۰٫۰۰۰۰۲۸۰
بهترین جواب	۰٫۰۰۰۰۱۰۳	۰٫۰۰۰۰۰۱۳
کمینه مقدار واقعی	۰٫۰۰۰۰۰۰۰	۰٫۰۰۰۰۰۰۰
میانگین	۰٫۰۰۰۰۱۱۱	۰٫۰۰۰۰۰۲۵
انحراف معیار	۰٫۰۰۰۰۰۰۵	۰٫۰۰۰۰۰۰۹
تعداد تکرار	۳۰	۳۰

۳. بهینه‌سازی چینش قلب رآکتور

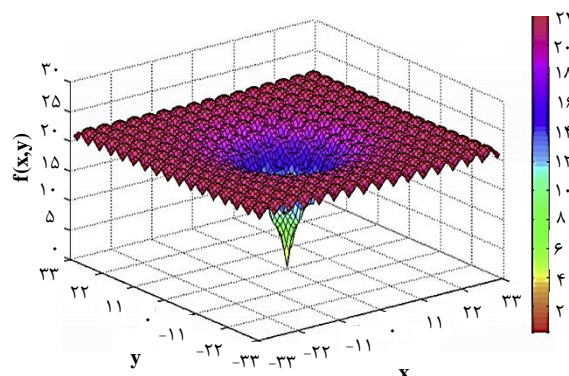
پس از اطمینان از صحت الگوریتم نوشته شده، از این الگوریتم برای بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت استفاده شده است. برای این منظور، از یک بسته محاسباتی با ترکیب این الگوریتم و کد بسط یافته نودال با هدف افزایش ضریب تکثیر مؤثر (افزایش طول سیکل) و مسطح کردن توزیع توان در یک رآکتور آبی تحت فشار از نوع KWU بهره گرفته شده است. لازم به ذکر است محاسبات مصرف سوخت در طول سیکل به دلیل محدودیت کد بسط یافته نودال در تولید سطوح مقاطع برای محصولات شکافت، انجام نگرفته است و بهینه‌سازی صرفاً برای قلب رآکتور در ابتدای سیکل انجام گرفته است.

۱.۳ معرفی رآکتور KWU

نمایی از تقارن یک هشتم قلب این رآکتور و توزیع توان در مجتمع‌های سوخت در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۷]. توزیع توان‌ها با استفاده از کد نودال به دست آمده است. لازم به ذکر است که با توجه به تقارن یک هشتم قلب رآکتور، در این‌جا به بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت در تقارن یک هشتم پرداخته شده است. علاوه بر این، در این رآکتور سه نوع سوخت با غنای مختلف وجود دارند که در شکل ۲ قابل مشاهده است. هم‌چنین در هر تقارن یک هشتم ۶ نوع مجتمع سوخت داریم. شکل ۲ الف نشان‌دهنده چیش مجتمع‌های سوخت، شکل ۲ ب توزیع سه بعدی توان و شکل ۲ ج توزیع دوبعدی توان را نشان می‌دهد.



(الف)



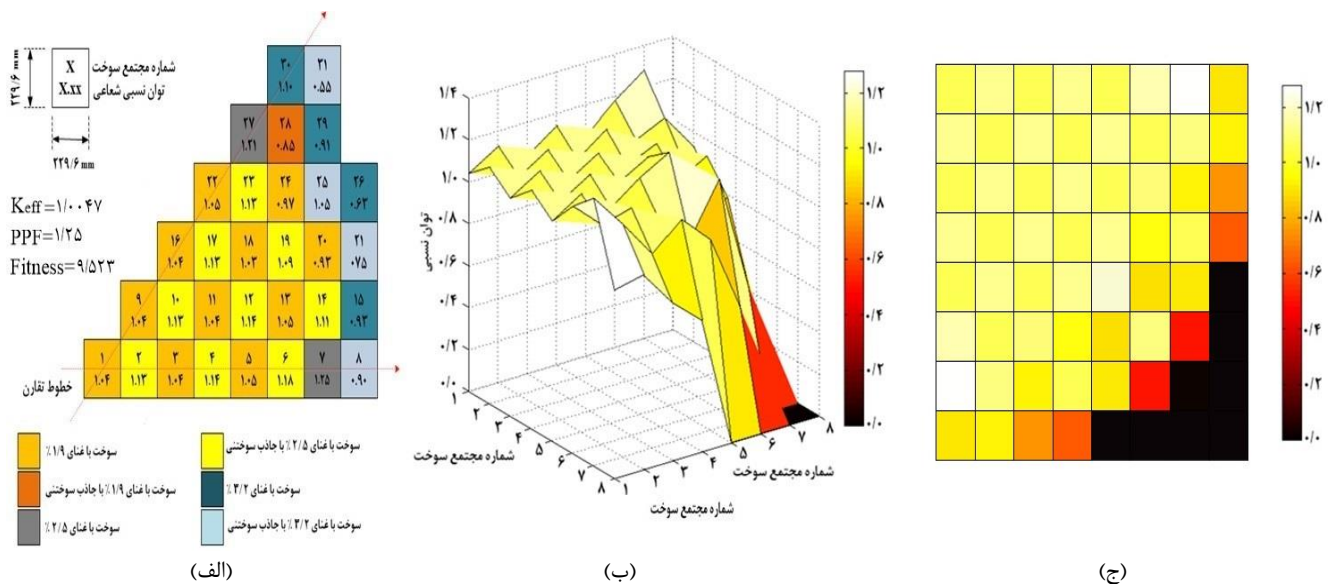
(ب)

شکل ۱. شکل تابع الف) شافر و ب) آکلی.

جدول ۲. مشخصات توابع شافر و آکلی

شافر	
فرمول	$(x^2 + y^2)^{-0.5} [50(x^2 + y^2) + 1]$
محدوده متغیرها	$-100 \leq x, y \leq 100$
کمینه مقدار	۰٫۰
آکلی	
فرمول	$-20 \cdot \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(\pi x_i))$
محدوده متغیرها	$-32,768 \leq x, y \leq 32,768$
کمینه مقدار	۰٫۰





شکل ۲. نمایی از تقارن یک هشتم قلب رآکتور KWU [۵].

باید بر طبق بردار مواد^۲ به الگوی چینش مجتمع سوخت (برای ورودی کد نودال) تبدیل شود. بردار مواد شامل شماره مواد از یک تا شش است و به تعداد مجتمع‌های سوختی است که قرار است جابه‌جا شوند. سپس برای هر الگوی چینش تابع هدف محاسبه شده و با هم مقایسه می‌شود تا الگوی بهینه انتخاب شود. تابع هدفی که برای بهینه‌سازی لحاظ شده است به صورت زیر است:

$$Fitness = \frac{\delta}{K_{eff}} + \begin{cases} \sum_{i=1}^{r_1} |P_{ri} - 1| & \text{if } PPF < P_{max} \\ \sum_{i=1}^{r_1} |P_{ri} - 1| \times \left(1 + \frac{PPF}{P_{max}}\right) & \text{if } PPF \geq P_{max} \end{cases} \quad (2)$$

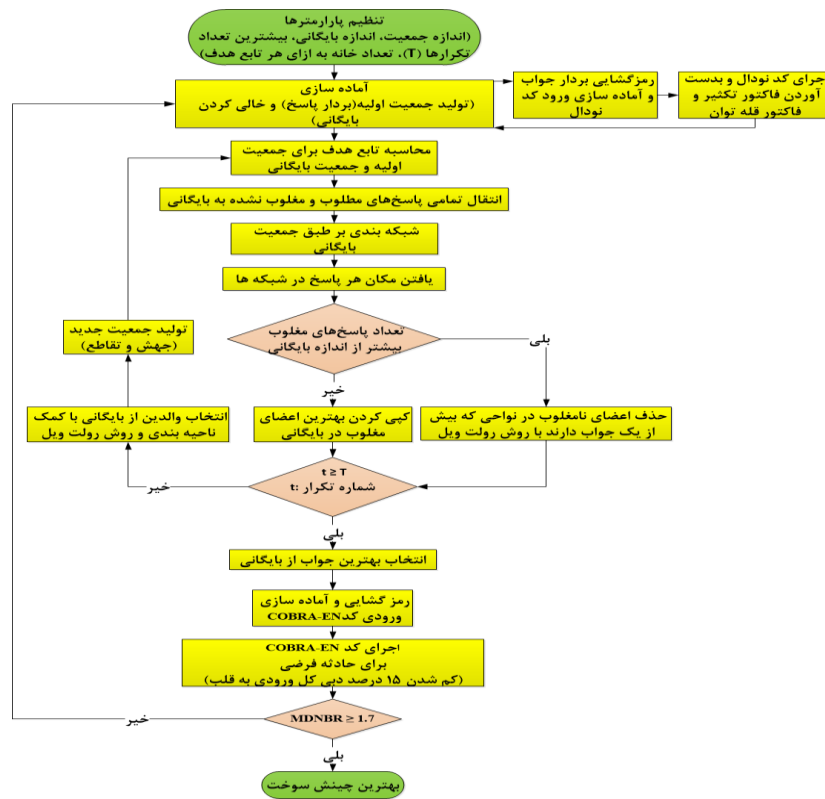
در رابطه ۲، جمله اول و دوم به ترتیب مربوط به افزایش طول سیکل (افزایش ضریب تکثیر مؤثر) و مسطح کردن توان است. P_r مربوط به توان نسبی مجتمع‌های سوخت است و P_{max} برابر با ۱٫۲۸ است. هدف این مسئله، تعیین کمینه مقدار تابع هدف در رابطه (۲) است. این تابع هدف از مرجع [۵] گرفته شده است.

۲.۳ بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت

طرح‌واره کلی الگوریتم بهینه‌سازی با ترکیب کد بسط یافته نودال برای انجام محاسبات نوترونیک و کد COBRA-EN برای انجام محاسبات ترموهیدرولیکی و الگوریتم PESA-II برای یافتن بهترین چینش در شکل ۳ نشان داده شده است. این الگوریتم با کد فترن نوشته شده است. در شکل ۳ کد نوترونیک نودال و الگوریتم PESA-II ترکیب شده و در نهایت، خروجی وارد کد COBRA-EN شده و پارامتر ترموهیدرولیکی کمینه انحراف از نسبت جوشش هسته‌ای طی حادثه کاهش جریان خنک‌کننده برای الگوی چینش به دست آمده، محاسبه شده و در صورت صحت شرط، با توجه گزارش تحلیل ایمنی رآکتور KWU ($MDNBR \geq 1.7$) الگوی چینش نهایی به دست می‌آید [۵].

در جابه‌جایی مجتمع‌های سوخت باید قیودی رعایت شوند. طول بردار پاسخ^۱ برابر با تعداد مجتمع‌های سوختی است که قرار است جابه‌جا شوند و در این مطالعه ۱۸ مجتمع سوخت جابه‌جا می‌شوند. مجتمع‌های سوخت روی خطوط تقارن و مرکز ثابت فرض شده است (زیرا تعداد مجتمع‌های سوخت و نوع آن‌ها همواره در کل قلب رآکتور باید ثابت باشد). همچنین، مجتمع‌های سوخت شماره ۲۷ و ۷ با توجه به طراحی پایه قلب رآکتور ثابت فرض شده است. المان‌های بردار جواب باید عدد صحیحی بین یک تا هجده و بدون تکرار باشند. این بردار جواب





شکل ۳. نمایی از الگوریتم PESA-II برای بهینه‌سازی چینی سوخت سوخت.

ضرایب برای هر ۳۱ مجتمع سوخت ۰/۸۵ وارد شده است. ضریب ۰/۸۵ نشان‌دهنده آن است که دبی ورودی به آن مجتمع ۱۵ درصد کم شده است.

جدول ۴. پارامترهای استفاده شده در کد COBRA-EN

تعداد گره‌های محوری	۲۰
تعداد گره‌های شعاعی	۷
مسیر جریان	رو به بالا
انواع کانال	۳
مدل ترموهیدرولیکی	چهار معادله‌ای

جدول ۵. نتایج حالت پایا برای قلب رآکتور با کد COBRA-EN

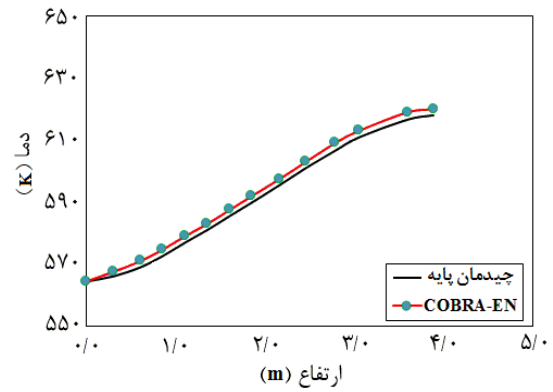
خطای نسبی (%)	چیدمان پایه	COBRA	پارامتر
۰/۰۳	۶۲۱/۷	۶۲۱/۹	بیشینه دمای غلاف (K)
۰/۷۲	۲۳۶۵/۱	۲۳۴۸/۱	بیشینه دمای سوخت (K)
۰/۳۲	۶۰۱/۲	۶۰۳/۱	دمای سیال خروجی (K)
۰/۵۶	۱/۷۹	۱/۷۸	MDNBR

۳.۳ مدل‌سازی ترموهیدرولیکی

در مدل‌سازی ترموهیدرولیکی، قلب رآکتور به صورت تقارن یک هشتم و با ۳۱ مجتمع سوخت با کد COBRA مدل شده است. پارامترهای مهم استفاده شده در این کد در جدول ۴ آورده شده است. ابتدا برای بررسی دقت مدل‌سازی با کد COBRA-EN نتایج حالت پایای قلب رآکتور مدل شده، در جدول ۵ آورده شده و با نتایج مربوط به چیدمان پایه مجتمع‌های سوخت مقایسه شده است. با دقت در جدول ۴ مشاهده می‌شود که کد COBRA-EN با دقت خوبی توانسته است حالت پایا را مدل نماید. برای تحلیل بیشتر، تغییرات دمای سیال در طول مجتمع سوخت با استفاده از این کد در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌طور که از شکل ۴ مشهود است، این کد تغییرات دمای سیال را برای مجتمع سوخت گرم با قله توان ۱/۲۵ (مجتمع سوخت شماره ۷) با دقت خوبی مدل کرده است. پس از اطمینان از صحت مدل‌سازی با استفاده از این کد، به بررسی حادثه کاهش دبی کل ورودی به قلب رآکتور پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی حادثه کاهش جریان خنک‌کننده، در کارت شماره ۲۴ در ورودی کد مقادیر ضریب دبی خنک‌کننده ورودی به هر مجتمع سوخت قابل تغییر است [۱۸]. در مدل‌سازی، کلیه



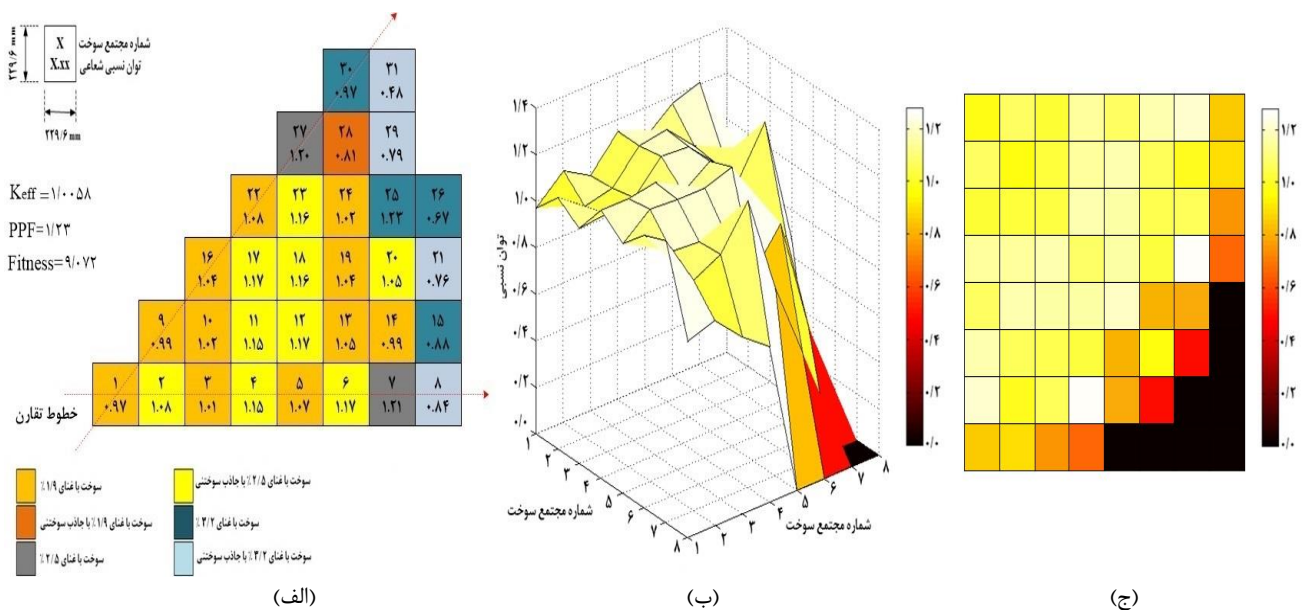
شود، نسبت انحراف از جوش هسته‌ای نسبت به مقدار این پارامتر برای چیدمان پایه بیش‌تر می‌شود. به عبارت دیگر این امر بیان می‌کند که با بهینه کردن چینش سوخت، ایمنی ذاتی رآکتور تحت تأثیر قرار گرفته و بیش‌تر می‌شود. هم‌چنین از شکل ۶ استنباط می‌شود که نسبت انحراف از جوش هسته‌ای به صورت شار حرارتی بحرانی به شار حرارتی محلی تعریف می‌شود. تغییرات شار حرارتی بحرانی از پایین تا بالای مجتمع سوخت کاهش می‌یابد. هم‌چنین به دلیل توزیع کسینوسی در قبل رآکتور، شار حرارتی محلی توزیع کسینوسی دارد. به این صورت که در ورودی مجتمع سوخت کم‌تر است و رفته‌رفته افزایش می‌یابد و با گذر از مرکز مجتمع سوخت به سمت بالا، به تدریج کاهش می‌یابد. با توجه به تغییرات شار حرارتی بحرانی به شار حرارتی محلی می‌توان استنباط نمود که نسبت شار حرارتی بحرانی به محلی (نسبت انحراف از جوش هسته‌ای) در ورودی مجتمع سوخت به دلیل بالا بودن شار حرارت بحرانی و پایین بودن شار حرارت محلی، زیاد است. با نزدیک شدن به مرکز مجتمع سوخت، شار حرارتی محلی به شدت زیادتر شده و شار بحرانی کم‌تر می‌شود و در نتیجه نسبت انحراف از جوش هسته‌ای کم‌تر می‌شود. با حرکت از مرکز به سمت بالا و خروجی مجتمع سوخت، دوباره شار حرارتی محلی و شار بحرانی کم‌تر می‌شود. در این حالت نسبت انحراف از جوش هسته‌ای دوباره زیاد می‌شود. نتایج دو کد RELAP و COBRA نیز در شکل ۶ برای حادثه کاهش خنک‌کننده با هم مقایسه شده است که نتایج در تطابق خوبی با هم قرار دارند.



شکل ۴. تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در طول مجتمع سوخت.

۴. نتایج و بحث

در شکل ۵، بهترین چینش مجتمع سوخت برای قلب رآکتور نشان داده شده است. با مقایسه دو شکل ۳ و ۵ مشاهده می‌گردد که مقدار ضریب تکثیر در مقایسه با چیدمان پایه مورد مطالعه برای رآکتور KWU [۵] افزایش یافته و توزیع توان مسطح‌تر شده است. هم‌چنین نتایج حاصل از این کار با مطالعه قراری و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۵] با روش‌های بهینه‌سازی SPEA-II و SPEA مقایسه شد که نتایج این مقایسه در جدول ۶ نشان داده شده است. نتایج حاصل از دو الگوریتم SPEA-II و PESA-II به هم نزدیک است اما این الگوریتم در مقایسه با الگوریتم SPEA بهتر عمل کرده است. برای آرایش بهینه حاصل شده که در شکل ۵ نشان داده شده است، تغییرات انحراف از جوش هسته‌ای طی حادثه کاهش ۱۵ درصدی کل خنک‌کننده ورودی به قلب رآکتور در شکل ۶ آورده شده است. از شکل ۶ می‌توان پی برد که حتی در حالتی که دبی خنک‌کننده برای چینش سوخت بهینه ۱۵ درصد کم



شکل ۵. چینش سوخت بهینه‌شده برای رآکتور KWU.

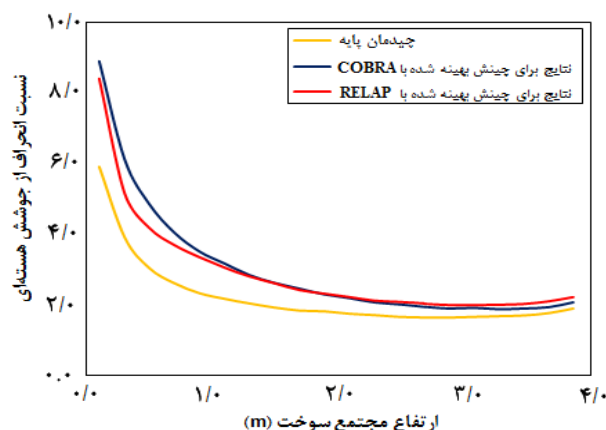


مراجع

1. A. David, P.E. Moore, *The regulation of inherent safety*, *ICHEM Symposium Series*, 149 (2003).
2. S. Ishiguro, E. Tomohir, Y. Akio, *Loading pattern optimization for a PWR using Multi-Swarm Moth Flame Optimization Method with Predator*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 1-14 (2019).
3. M.A. Nasr, et al., *Neutronic and thermal-hydraulic aspects of loading pattern optimization during the first cycle of VVER-1000 reactor using Polar Bear Optimization method*, *Ann. Nucl. Energy*, **133**, 538 (2019).
4. R. Akbari, et al., *A novel multi-objective optimization method, imperialist competitive algorithm, for fuel loading pattern of nuclear reactors*, *Prog. Nucl. Energy*, **108**, 391 (2018).
5. R. Gharari, et al., *Implementation of strength pareto evolutionary algorithm-II in the multi objective burnable poison placement optimization of KWU pressurized water reactor*, *Nucl. Eng. Technol.*, **48**, 1126 (2016).
6. S.M. Mahmoudi, M. Aghaie, *Evaluation of fuzzy based HS and GSA on reloading cycle length optimization of PWR nuclear power plant*, *Ann. Nucl. Energy*, **134**, 1-10 (2019).
7. A. Zameer, et al., *Fractional-order particle swarm based multi-objective PWR core loading pattern optimization*, *Ann. Nucl. Energy*, **135**, 106982 (2019).
8. T.J. Rogers, *PWR fuel assembly optimization using adaptive simulated annealing coupled with translat*, *Doctoral dissertation, Texas A & M University* (2010).
9. F. Alim, K. Ivanov, S.H. Levine, *New genetic algorithms (GA) to optimize PWR reactors: Part I: Loading pattern and burnable poison placement optimization techniques for PWRs*, *Ann. Nucl. Energy*, **35**, 93-112 (2008).
10. S. Yilmaz, K. Ivanov, S. Levine, *Application of genetic algorithm to optimize burnable poison placement in pressurized water reactors*. In *Proceedings of the 7th annual conference on Genetic and evolutionary computation*. 1477-1483 (2005).
11. F. Khoshahval, et al., *A new hybrid method for multi-objective fuel management optimization using parallel PSO-SA*, *Prog. Nucl. Energy*, **76**, 112-121 (2014).
12. G. Chen, L. Junhua, *A diversity ranking based evolutionary algorithm for multi objective and many objective optimization*, *Swarm Evolution. Comput.*, **48**, 274-287 (2019).
13. L. Lv, et al., *Multi objective firefly algorithm based on compensation factor and elite learning*, *Fut. Gen. Com. Sys.*, **91**, 37-47 (2019).
14. Y.L.T. Silva, A.B. Herthel, A. Subramanian, *A multi objective evolutionary algorithm for a class of mean-variance portfolio selection problems*, *Exp. Sys. App.*, **133**, 225-241 (2019).
15. W.D. Corne, et al., *PESA-II: Region-based selection in evolutionary multi objective optimization*, *Proceedings of the 3rd Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation* (2001).
16. N. Poursalehi, A. Zolfaghari, A. Minuchehr, *Performance comparison of zeroes order nodal expansion methods in 3D rectangular geometry*, *Nucl. Eng. Des.*, **252**, 248-266 (2012).
17. *Preliminary Safety Analysis Report (PSAR), Power plant Iran1, 2, prepared for AEOI by KWU* (1976).
18. D. Basile, et al., *COBRA-EN manual* (1999).

جدول ۶. نتایج الگوریتم PESA-II برای تابع شافر

چینش	ضریب تکثیر نهایی	فاکتور قله توان	مقدار تابع هدف
چیدمان پایه	۱,۰۰۴۷	۱,۲۵	۹,۵۲۳
[۵] SPEA	۱,۰۰۵۷	۱,۲۴۱	۹,۲۳۱
[۵] SPEA-II	۱,۰۰۵۹	۱,۲۳۵	۹,۰۷۴
PESA-II	۱,۰۰۵۸	۱,۲۳	۹,۰۷۲



شکل ۶. تغییرات نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای برحسب ارتفاع مجتمع.

۵. نتیجه‌گیری

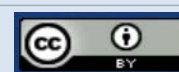
در این مقاله الگوریتم PESA-II برای بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت داخل قلب رآکتور KWU به کار گرفته شد. چینش سوخت بهینه‌شده دارای ضریب تکثیر بیش‌تر و توزیع توان مسطح‌تری نسبت به چینش پایه است. علاوه بر این، با منظور امتحان این چینش جدید طی فرضی کاهش جریان کل خنک‌کننده تا ۱۵ درصد، مشاهده شد که رآکتور هم‌چنان می‌تواند در شرایط ایمن به کار خود ادامه دهد. می‌توان نتیجه گرفت که با بهبود و بهینه‌سازی چینش مجتمع‌های سوخت ایمنی ذاتی سیستم تحت تأثیر قرار گرفته و افزایش می‌یابد. هم‌چنین نتایج این کار بر قابلیت بهینه‌سازی چینش سوخت در قلب رآکتور توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی چند هدفه تأکید دارد و در این رابطه الگوریتم PESA-II بهتر از الگوریتم SPEA عمل کرده است.

تشکر و قدردانی

از زحمات آقای دکتر پور صالحی که کد نودال را در راستای اجرای این مطالعه در اختیار ما قرار دادند، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

رحمان قراری، بهزاد سلماسیان، امید صفرزاده (۱۳۹۹)، بهینه‌سازی چیدمان مجتمع‌های سوخت یک رآکتور PWR با استفاده از الگوریتم PESA-II و در نظر گرفتن پارامترهای نوترونی و ترموهیدرولیکی، ۹۴، ۱۳۸-۱۴۵

DOI: 10.24200/nst.2021.1160
Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1160.html

