



## تحلیل رفتار نوترونی و بهینه‌سازی مصرف سوخت رآکتور ماژولار کوچک پیشرفته SMART با استفاده از الگوریتم ژنتیک

احسان ظریفی<sup>۱</sup>، علیرضا جمشیدیان<sup>۲</sup>، غلامرضا جهافرنیا<sup>۲</sup>، سعید زارع گنجانرودی<sup>۲\*</sup>

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

### چکیده:

اهداف اصلی بهینه‌سازی چیدمان مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتورهای هسته‌ای، کاهش قله قدرت شعاعی و افزایش طول سیکل بهره‌برداری می‌باشد. رآکتور SMART از انواع رآکتورهای ماژولار کوچک پیشرفته طراحی و ساخت کشور کره جنوبی دارای قدرت ۱۰۰ مگاوات الکتریک و ۳۳۰ مگاوات حرارتی می‌باشد. در این مقاله، در ابتدا انجام محاسبات پارامترهای رفتار نوترونی قلب رآکتور اعم از ضریب تکثیر، راکتیویته مازاد و توزیع فاکتور پیک توان در حالت‌های مختلف ورود و عدم ورود میله‌های کنترل با استفاده از کدهای CITATION & WIMS انجام شد. سپس، برای اولین بار برای رآکتورهای ماژولار کوچک با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و برنامه‌نویسی در MATLAB، بهینه‌سازی چیدمان سوخت در قلب این رآکتور مورد ارزیابی قرار گرفت. الگوریتم ژنتیک با محدودیت‌ها، اولویت‌ها و دامنه متغیرها مساله یک تابع هدف تعریف می‌نماید که با بهینه نمودن آن جواب نهایی را تعریف می‌نماید. نتایج نشان داد، ضریب تکثیر موثر در چیدمان بهینه نسبت به چیدمان مرجع به میزان ۰.۸۲ درصد افزایش و پارامتر پیک شعاعی به میزان ۱.۳۸ درصد کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج با مقالات و گزارشات نشان‌دهنده سازگاری خوبی با یکدیگر می‌باشد و نتایج از درصد خطای کمی برخوردار می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، SMART، ماژولار، WIMS & CITATION، ژنتیک.

## Neutronic behavior evaluation and fuel management optimization of SMART advanced Small Modular Reactor using genetic algorithm

E. Zarifi<sup>1</sup>, A. Jamshidian<sup>2</sup>, Gh. Jahanfarnia<sup>2</sup>, S. Zare Ganjaroodi<sup>2\*</sup>

1. Reactor and Nuclear Safety Research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

2. Faculty of Engineering Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran

### Abstract:

The main goals of optimizing the arrangement of fuel assemblies in the core of nuclear reactors are to reduce the peak of radial power and increase the length of the operation cycle. SMART reactor is a type of advanced small modular reactors designed and manufactured in South Korea with a capacity of 100 MWe and 330 MWth of heat. In this paper, first, the calculations of the neutron behavior parameters of the reactor core, including K-factor, excess reactivity, and power peaking factor distribution in different states of entry and non-entry of control rods were performed using WIMS and CITATION codes. In addition, for the first time, by using genetic algorithm and programming method in MATLAB, the optimization of fuel arrangement in the core of this reactor was selected. Genetic algorithm with constraints, priorities and amplitude of variables defines the problem of a goal function which by optimizing it defines the final solution. The results showed that the K-factor in the optimal arrangement increased by 0.82% compared to the reference arrangement and the radial peak parameter decreased by 1.38%. Comparing the results with articles and reports shows appropriate compatibility with each other and the results have a low error rate.

**Keywords:** Optimizing, SMART, Modular, WIMS & CITATION, Genetic.

Email: szareganjaroodi@yahoo.com

## ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر تمایل به ساخت رآکتورهای با ابعاد کوچک و ایمنی بالا به دلیل نیاز به واحدهای کوچک در شبکه‌های برق بخصوص در مناطق دورافتاده در حال افزایش می‌باشد. این نوع رآکتورها به شکل ماژولار در کارخانه ساخته شده و به دلیل ابعاد کوچک، قابلیت حمل توسط تریلرها تا مکان موردنظر و نصب در کمترین زمان ممکن را دارند. این رآکتورها دارای مزایای فراوان اعم از ایمنی ذاتی بالا، سادگی تجهیزات، زمان بهره‌برداری بیشتر، عدم نیاز به سوخت‌گذاری تا چندین سال، راندمان بالاتر، هزینه بهره‌برداری کمتر و اقتصاد بالاتر می‌باشد. این رآکتورهای پیشرفته نسل جدید با اندازه‌های کوچک (کمتر از ۳۰۰ مگاوات الکتریک) و متوسط (کمتر از ۷۰۰ مگاوات الکتریک) در جهان در حال طراحی، توسعه و ساخت می‌باشند [۱-۲].

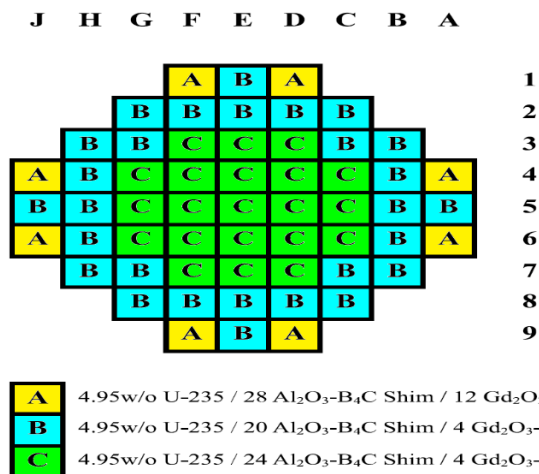
یکی از روش‌های بالا بردن عملکرد اقتصادی در نیروگاه‌های هسته‌ای، تعیین استراتژی مناسب برای سوخت‌گذاری قلب رآکتور برای بهره‌برداری بهینه از آن می‌باشد. این استراتژی بر مبنای داشتن یک توزیع چگالی مناسب توان منطبق بر معیارهای ایمنی است. بطوری‌که در قلب رآکتور پیک توان باید کمتر از یک مقدار تعیین شده باشد تا منجر به ذوب قلب رآکتور نگردد و ضریب تکثیر موثر باید به منظور افزایش طول سیکل بهره‌برداری و برداشت بیشتر انرژی افزایش یابد. انتخاب بهتر در پیکربندی بارگذاری مجتمع‌های سوخت باعث اطمینان در استفاده کافی از موجودی مواد شکافت پذیر و ایمنی بیشتر در طول بهره‌برداری رآکتور می‌شود. در واقع مدیریت سوخت یکی از شاخه‌های مهم مطالعاتی در زمینه مهندسی هسته‌ای می‌باشد که در آن آرایش سوخت درون رآکتور در سیکل اول و سیکل‌های بعدی به منظور تولید انرژی با لحاظ نمودن مسائل ایمنی به دست می‌آید.

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های جست‌وجوی هوشمند است که در ابتدا به صورت تصادفی جمعیتی را از میان فضای نمونه انتخاب کرده و نسلی از کروموزوم‌ها را تشکیل می‌دهد. سپس با استفاده از عملگر انتخاب، تعدادی از کروموزوم‌ها را که دارای خصوصیات بهتری نسبت به سایرین هستند، انتخاب می‌کند و با بکارگیری عملگرهای جفت‌یاب و بازترکیب، کروموزوم‌هایی را به عنوان والد ترکیب کرده و از هر دو والد، حداقل دو فرزند تولید می‌کند. بدین ترتیب نسل جدید با خصوصیات بهتر شکل می‌گیرد. به منظور جلوگیری از همگرایی پیش از موعد و از دست دادن پاسخ‌های بهتر، عملگر جهش، کروموزوم‌هایی با خصوصیات جدید که در نسل اول موجود نمی‌باشد را تولید می‌کند. برتری کروموزوم‌ها نسبت به یکدیگر توسط یک تابع تناسب و برازندگی که به کروموزوم نسبت داده می‌شود، مشخص می‌شود که در یک مساله بهینه‌سازی چند پارامتری، تولید تابع تناسب مهم‌ترین و شاید مشکل‌ترین بخش کار می‌باشد [۳-۴].

با توجه به جدید بودن طراحی و ساخت رآکتورهای ماژولار با اندازه‌های متوسط و کوچک در دنیا، بهینه‌سازی مصرف سوخت در این رآکتورها کاری انجام نشده است. اما در زمینه روش‌های بهینه‌سازی چیدمان مطالعاتی در دنیا انجام شده است. جیاکوبو در سال ۲۰۰۷ میلادی طی مقاله‌ای بیان داشت روش ریاضیات کلاسیک (محاسباتی) قادر به انجام محاسبات چینی سوخت در رآکتورهای قدرت نیستند، این روش‌ها برای رآکتورهای تحقیقاتی کاربرد دارند [۵]. جانگ در سال ۲۰۰۱ میلادی بیان داشت که بیشتر برای حل معادله پخش و محاسبات تهی‌سازی شامل دو دسته کاربرد در روش محاسباتی پخش معکوس و کاربرد در محاسبات مربوط به تکنیک تهی‌سازی معکوس به کار رفته است [۶]. کویست نشان داد که از روش‌هایی نظیر روش جست‌وجوی مستقیم، حرکت در جهت گرادیان و جست‌وجوی تابو می‌توان جهت یافتن کمینه و یا بیشینه بر روی مجموعه‌ای از جواب‌ها استفاده کرد [۷].

## ۲. روش کار

رآکتور SMART یک رآکتور سبب کوچک ماژولار از نوع آب تحت فشار به صورت مجتمع و یکپارچه بوده که تمامی تجهیزات مدار اول آن در داخل محفظه تحت فشار رآکتور قرار داده شده است. توان حرارتی این رآکتور ۳۳۰ MW(th) و توان الکتریکی آن در حدود ۱۰۰ MW(e) می‌باشد. قلب این رآکتور به صورت مربعی بوده و دارای ۵۷ مجتمع سوخت است. سوخت این رآکتور اورانیوم غنی شده می‌باشد. مواد میله کنترل در قلب این رآکتور دارای ترکیب Ag-In-Cd با چگالی ۱۰/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. شکل (۱)، نمایی از آرایش قلب این رآکتور را نشان می‌دهد [۲-۸].



شکل ۱. نمای از چیدمان قلب رآکتور SMART

در یک چیدمان بهینه، قدرت باید کمتر از یک مقدار تعیین شده نگه داشته شود تا سوخت دچار افزایش دمایی بیش از دمای ذوب نشود. همچنین، ضریب تکثیر موثر باید به منظور افزایش طول سیکل و برداشت بیشتر انرژی، به بیشینه مقدار خود برسد. پیک قدرت موضعی در رآکتورهای هسته‌ای وابستگی پیچیده‌ای به عوامل مختلفی چون چیدمان سوخت، سطح قدرت رآکتور، توزیع دمایی، موقعیت میله‌های کنترل، فرسایش سوخت، نوسانات فضایی زینان و دیگر موارد دارد. جهت ساده‌سازی بررسی تغییرات پیک قدرت موضعی، آن را به صورت حاصلضرب سه عامل تعریف می‌شود:

$$Pq = Pe * Pz * Pr$$

در این رابطه  $Pq$ ,  $Pr$  و  $Pz$  به ترتیب پیک قدرت موضعی، شعاعی و محوری و  $Pe$  فاکتور عدم قطعیت (عدم قطعیت در انجام محاسبات) می‌باشد. پیک قدرت شعاعی تابع چیدمان سوخت است ولی پیک قدرت محوری در اثر اغتشاشات ایجاد شده توسط حرکت میله‌های کنترل و نوسانات فضایی زینان، به طور مداوم در حال تغییر می‌باشد و توسط سیستم‌های کنترل رآکتور در زیر حد مجاز نگه داشته می‌شود. بنابراین برای کاهش پیک موضعی، باید ضریب شعاعی برداشت قدرت را کاهش داد. مقدار مجاز  $Pr$  در رآکتورهای آب تحت فشار در حدود ۱.۲۹ است. در این مقاله، از همین معیارها برای طراحی چیدمان سوخت استفاده شده است. با چنین معیارهایی سعی گردیده با انتخاب آرایش مناسب، ضریب تکثیر موثر در ابتدای سیکل تا حد ممکن افزایش یافته و در عین حال پیک قدرت در ابتدای سیکل در حد قابل قبول باقی نگه داشته شود. نکته قابل توجه این است که طراحی چیدمان موردنظر صرفاً با جابجا کردن مجتمع‌های سوخت انجام می‌گیرد و هیچ‌گونه تغییری در مشخصات مجتمع‌های سوخت رآکتور مرجع داده نمی‌شود. در انجام این مطالعه، برای پیدا کردن چیدمان بهینه جهت دستیابی همزمان به بیشترین ضریب تکثیر موثر و محدود نگهداشتن پیک قدرت شعاعی، از بهینه‌سازی چندهدفه با الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

حل یک مساله ژنتیکی با تعریف کروموزم به عنوان ترکیبی از متغیرهایی که باید بهینه‌یابی شوند، آغاز می‌شود. در این تحقیق هر الگوی چیدمان سوخت به عنوان یک کروموزوم در نظر گرفته می‌شود که هر مجتمع سوخت، یک ژن در این کروموزوم می‌باشد. این بهینه‌سازی بر روی سیکل اول و ادامه سیکل‌های تعادلی پیاده می‌شود.

در نهایت برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه تابع برازندگی خطی زیر صورت گرفت:

$$F = W_k \times K_{eff} + W_p (P_{cons} - P_r)$$

در معادله فوق  $P_{cons}$  یک محدودیت بر روی پارامتر پیک توان شعاعی می‌باشد که در این مساله برابر ۱.۲۹ در نظر گرفته شده است.  $W_k$  و  $W_p$  به ترتیب وزن‌های تجربی متغیرهای  $K_{eff}$  و  $P_r$  می‌باشند که در این مساله با توجه به اجرای چندین باره الگوریتم و بررسی نتایج

حاصله برابر ۱.۷۵ و ۲.۵ منظور شده‌اند. در این تحقیق بهینه‌سازی مصرف سوخت در قلب راکتور پیشرفته ماژولار SMART در سیکل اول کاری و ادامه آن در سیکل‌های تعادلی با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با بکارگیری کدهای WIMS-D5 و CITATION-LTI2 پارامترهای نوترونی قلب در مدل جدید مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، ابتدا محاسبات پارامترهای نوترونی قلب انجام و راستی‌آزمایی گردید. سپس بهینه‌سازی مصرف سوخت در قلب راکتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد تا مدل بهینه پیشنهاد گردد.

### ۳. نتایج

#### ضریب تکثیر

نتایج نشان داد که قلب راکتور بدون ورود میله‌های کنترل دارای راکتیویته مازاد معادل (mK) ۶۷.۹۳ خواهد بود. این در حالیست که در صورت ورود تمامی میله‌های کنترل به قلب، باعث اعمال راکتیویته منفی حدود (mK) ۲۵۶ خواهد شد که این موارد سازگاری مناسبی با مقالات و گزارشات دارد. در جدول (۱)، محاسبات ضریب تکثیر در دو حالت ورود و عدم ورود میله‌های کنترل به قلب راکتور آورده شده است.

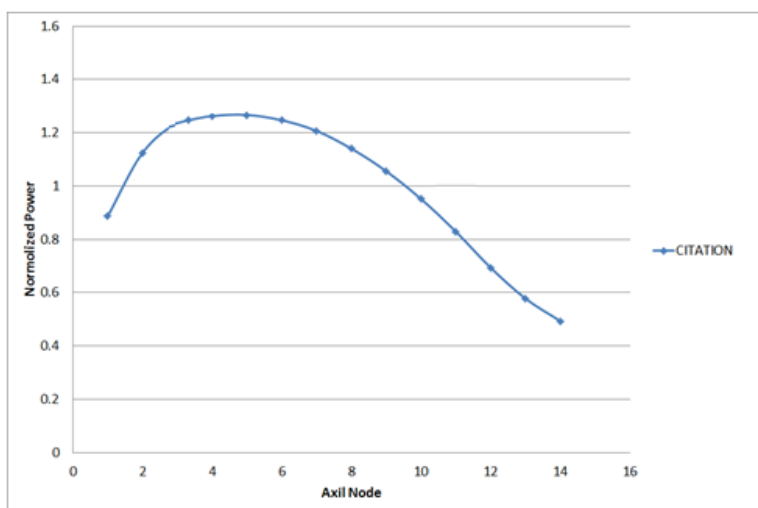
جدول ۱. محاسبات ضریب تکثیر

| وضعیت                            | CITATION   | مراجع [۹]      |
|----------------------------------|--|----------------|
| عدم ورود میله های کنترل به قلب   | $K = 1.072887$<br>Excess reactivity = 67.93 (mK)   | $K = 1.088338$ |
| ورود تمامی میله های کنترل به قلب | $K = 0.796723$<br>Excess reactivity = - 255.14(mK) | $K = 0.808174$ |

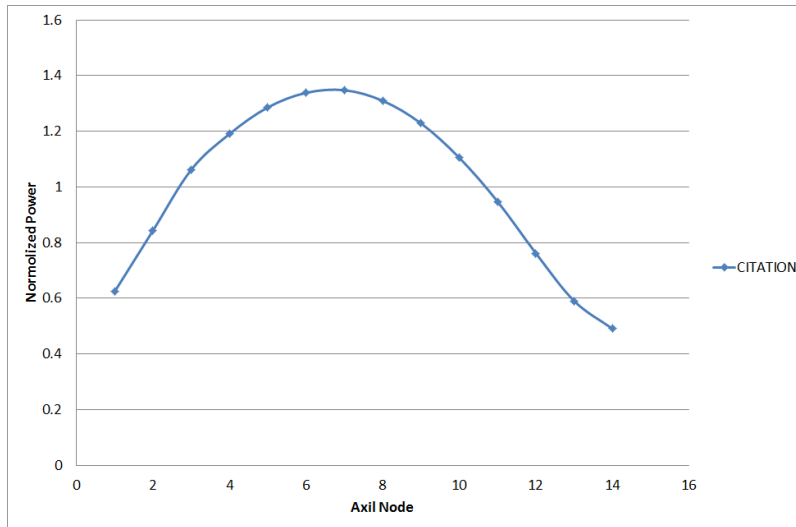
اختلاف ناچیز حاصل از مقایسه این مقاله با مراجع را می‌توان به متفاوت بودن روش محاسباتی دو مورد دانست. زیرا کد COREDAX استفاده شده در مرجع [۸] از روش بسط نودال معادله پخش استفاده می‌کند در حالیکه کد CITATION استفاده شده در این مقاله از روش اختلاف محدود برای حل معادلات استفاده می‌کند.

#### فاکتور پیک توان

توزیع فاکتور پیک توان محوری در دو وضعیت ورود و عدم ورود میله‌های کنترل به قلب در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲. توزیع فاکتور پیک توان محوری در حالت ورود میله‌های کنترل به قلب راکتور

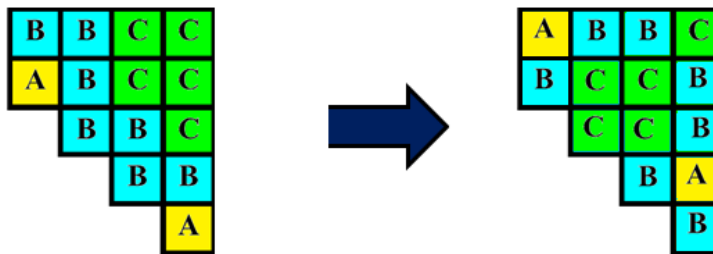


شکل ۳. توزیع فاکتور پیک توان محوری در حالت عدم ورود میله‌های کنترل به قلب رآکتور

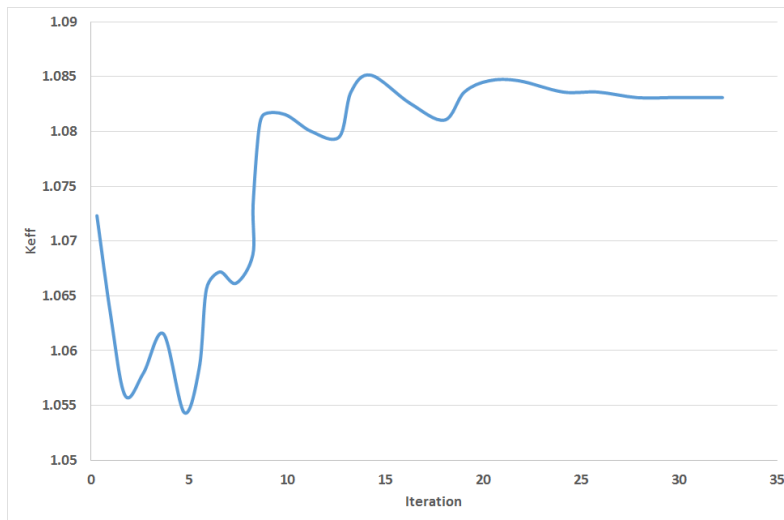
مطابق با شکل‌های (۲) و (۳)، ورود میله‌های کنترل به قلب توزیع توان و مطابق آن شار نوترون را به کف قلب متمایل می‌کند که علت آن ورود مواد جاذب به قلب می‌باشد. لازم به ذکر است که مقایسه نتایج توزیع فاکتور پیک توان محوری در دو حالت ورود و عدم ورود میله‌های کنترل به قلب رآکتور با نتایج گذشته [۹] سازگاری مناسب دارد.

### بهینه‌سازی چیدمان

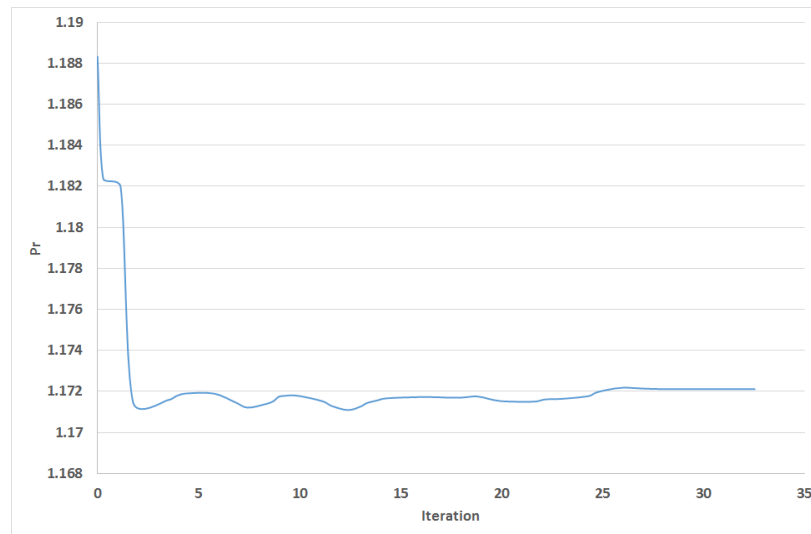
پس از محاسبات چیدمان مرجع، با بکارگیری الگوریتم ژنتیک و اجرای برنامه، یک چیدمان بهینه انتخاب خواهد شد که  $K_{eff}$  را افزایش و  $P_r$  را محدود می‌کند که در آن تقارن یک چهارم مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور حفظ شده است. این چیدمان پیشنهادی در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴. چیدمان پیشنهادی به روش الگوریتم ژنتیک



شکل ۵. تغییرات نسبی  $K_{eff}$  کروموزوم برتر



شکل ۶. تغییرات نسبی  $\beta_r$  کروموزوم برتر

همان‌طور که در جدول (۲) نشان داده شده است ضریب تکثیر موثر در چیدمان بهینه نسبت به چیدمان مرجع به میزان ۰.۸۲ درصد افزایش و پارامتر پیک شعاعی به میزان ۱.۳۸ درصد کاهش یافته است.

جدول ۲. مقایسه ضریب تکثیر موثر

| Pr      | $K_{eff}$ | وضعیت                |
|---------|-----------|----------------------|
| 1.18832 | 1.072887  | سیکل مرجع            |
| 1.17212 | 1.083081  | نتایج بهینه پس از ۳۲ |
| -1.38%  | 0.82%     | درصد تغییرات         |

## ۵. نتیجه‌گیری

تعیین یک روش مناسب برای سوخت‌گذاری و بهره‌برداری از سوخت داخل قلب رآکتور، در صورتی‌که قلب رآکتور انرژی موردنیاز را در چارچوب مسایل ایمنی تامین نماید، از اهداف مدیریت سوخت قلب رآکتور های هسته‌ای می‌باشد. با توجه به مزایای فراوان و جدید بودن



رآکتور های ماژولار کوچک، در این مقاله پس از مدلسازی و تحلیل پارامترهای نوترونی قلب رآکتور ماژولار کوچک پیشرفته SMART با استفاده از کدهای CITATION & WIMS، برای اولین بار برای رآکتورهای ماژولار کوچک بهینه‌سازی مصرف سوخت رآکتور با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شد. در این مطالعه، سعی بر آن شد تا با استفاده از پارامترهای پیک قدرت موضعی، شعاعی و محوری و فاکتور عدم قطعیت، با انتخاب آرایش مناسب، ضریب تکثیر موثر در ابتدای سیکل تا حد ممکن افزایش یافته و در عین حال پیک قدرت در ابتدای سیکل در حد قابل قبول باقی نگه داشته شود. نتایج نشان داد، با ورود میله‌های کنترل به داخل قلب توزیع توان و شار نوترون از مرکز به سمت کف قلب متمایل خواهد شد که علت آن ورود مواد جاذب به قلب می‌باشد. همچنین، با انتخاب چیدمان بهینه، ضریب تکثیر موثر جدید نسبت به چیدمان مرجع، به میزان ۰.۸۲ درصد افزایش و پارامتر پیک شعاعی به میزان ۱.۳۸ درصد کاهش می‌یابد.

## ۶. مراجع

- [1] Advances in small modular reactor technology developments, (2014), IAEA TECDOC.
- [2] Advances in small modular reactor technology developments, (2018), IAEA TECDOC.
- [3] Ying Zheng, (2007), "On the local optimal solutions of metabolic regulatory networks using information guided genetic algorithm approach and clustering analysis" vol.131, pp: 159-167.
- [4] S.F.Mussati, (2005), "Optimization of alternative structures of integrated power and desalination plants". vol.182, pp: 123-129.
- [5] F.Giacobbo, (2007), "Monte Carlo simulation of nonlinear reactive contaminant transport in unsaturated porous media" pp: 51-63.
- [6] Chang Sun Jang, (2001), "Optimization layer by layer networks for in-core fuel management optimization computations in PWR s" vol.28 pp: 1115-1132.
- [7] A.J.Quist "Application of Nonlinear Optimization to Reactor Core Fuel Reloading." (1999) pp: 423-448.
- [8] M.H. Chang, et al., (1999), "SMART – AN Advanced Small Integral PWR for Nuclear Desalination and Power Generation," Proc. of Global 99, International Conference on Future Nuclear Systems, Jackson Hole, USA, Aug. 29 - Sept. 3.
- [9] Jaejun Lee, Jong Hyuck Won, Nam Zin Cho, Yong Ho Ryu, and Ju Yeop Park, (2010), A Preliminary Analysis of SMART Reactor Core Using the COREDAX Code, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Jeju, Korea, October 21-22.
- [10] Oak ridge national laboratory, RSICC computer code collection (CITATIONLDI2 code). (1972).
- [11] Halsall, W.J., A Summary of WIMSD5 Input Options. AEEW - M1327. (1990).