



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

بهینه سازی مدیریت سوخت در راکتور US-APWR با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد حسین، استکی: حسن، کریمی و رکانی

دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

چکیده:

در این مقاله ابتدا توضیح مختصری در رابطه با راکتور US-APWR داده شده. سپس الگوریتم تکاملی ژنتیک معرفی شده و روش بکار رفته جهت بهینه‌سازی چیدمان سوخت در قلب راکتور شرح داده می‌شود. شرایط کاری راکتور حداکثر قدرت و چینش اولیه سوخت بدون وجود سموم حاصل از شکافت مد نظر می‌باشد. بهینه‌سازی در این الگوریتم با در نظر گرفتن دو پارامتر مهم قلب راکتور یعنی ضریب تکثیر موثر (K_{eff}) و ضریب پیک قدرت (PPF) به عنوان توابع هدف صورت می‌گیرد. در نهایت بهترین الگوی چینش قلب بدست آمده و با الگوی اولیه مقایسه می‌شود. K_{eff} (۱/۱٪) افزایش و PPF (۸۳٪) کاهش یافته که باعث افزایش بازدهی و ایمنی قلب راکتور US-APWR می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: راکتور US-APWR، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک، مدیریت سوخت.

مقدمه

سوخت راکتورهای هسته‌ای یکی از مهمترین منابع جایگزین سوخت فسیلی و به تبع آن تولید انرژی می‌باشد. از اصلی‌ترین مسائل راکتورهای هسته‌ای مدیریت سوخت به معنی استفاده بهینه و مفید از سوخت هسته‌ای است؛ که بدین روش چگونگی چیدمان و آرایش‌های مختلف سوخت در قلب راکتور معین می‌شود. روند پیشرفت راکتورهای هسته‌ای به‌گونه‌ای است که باعث افزایش ایمنی، اقتصادی‌تر شدن و به تبع آن موجب کاهش هزینه‌های اولیه و حتی تعمیر و نگهداری آسان و ارزان‌تر می‌شود. یکی از راه‌های موثر در تحقق این هدف، این است که با چیدمان بهینه و افزایش بازدهی نیروگاه و طول سیکل بهره‌برداری، می‌توان از سوخت بارگذری شده حداکثر استفاده را برد و هزینه تمام شده را به حداقل ممکن رسانید که گام بلندی در جهت تحقق هدف هر نیروگاه هسته‌ای می‌باشد. از مهمترین مسائل در مورد مدیریت سوخت داخل قلب راکتورهای هسته‌ای پیدا کردن بهترین آرایش جهت سوخت گذاری در ابتدای هر سیکل است. هدف هر برنامه مدیریت سوخت قلب راکتورهای قدرت ارائه یک روش سوخت گذاری است، که در نتیجه ضمن رعایت مسائل ایمنی هزینه‌ها کاهش یافته و توزیع دانسیته قدرت مناسب بدست آید. بدست آوردن الگوی چینش مناسب برای قلب راکتور یک مساله بهینه‌سازی است، که تعداد محدودیت‌ها و اهداف



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

زیادتر آن درگیرند. اهدافی همچون ضریب بیک قدرت شعاعی، طول سیکل، ضریب راکتیویته، و بخصوص مساله **Burn Up** و... که هر کدام از این پارامترها در کارکرد راکتور و نهایتاً در هزینه ها اثر دارد.

کلیاتی در خصوص راکتور US-APWR

راکتور **US-APWR** از نوع نسل سوم پیشرفته محسوب می شود. این راکتور بر اساس راکتور **APWR** که طراحی شده، ساخت آن توسط کمپانی میتسو بیشی^۱ ژاپن انجام و برای اولین بار در سال ۲۰۱۰ میلادی به پایان رسیده است. یکی از نکاتی که می توان به آن اشاره کرد این که در این راکتور جدیدترین، پیشرفته ترین و ایمن ترین تکنولوژی های روز دنیا برای ساخت قسمت های مختلف استفاده شده است. در این راکتور بازدهی حرارتی ۳۹ درصد بوده که بالاترین رقم بازدهی ممکن در راکتورهای مشابه می باشد. همچنین طول سیکل بهره برداری از آن ۲۴ ماه است که نسبت به سایر راکتورهای هسته ای بسیار مناسب و ایده آل به نظر می رسد. در این راکتور از ۹ عدد مجتمع سوخت با خصوصیات و غناهای متفاوت استفاده شده (جدول ۱). مشخصات کلی قلب راکتور **US-APWR** در جدول ۲ آورده شده است [۱].

جدول (۱) - مشخصات مجتمع های سوخت راکتور US-APWR [۱]

شماره	مجتمع سوخت		میله اورانیوم در هر مجتمع		میله گادولینیوم در هر مجتمع		میله سموم جذب در هر مجتمع
	نام	رنگ	تعداد	غنا اورانیوم (درصد وزنی)	تعداد	غنا گادولینیوم (درصد وزنی)	
۱	R1UA	سبز	۲۶۴	۲/۰۵	-	-	-
۲	R2UA	بنفش	۲۶۴	۳/۵۵	-	-	-
۳	R2UC	قرمز	۲۶۴	۳/۵۵	۲۰	-	-
۴	R2UD	زرد	۲۶۴	۳/۵۵	۲۴	-	-
۵	R2GB	سبز	۲۴۰	۳/۵۵	۲۴	۱۰	-
۶	R2GC	آبی	۲۴۰	۳/۵۵	۲۴	۶	-
۷	R3UA	قهوه ای	۲۶۴	۴/۱۵	-	-	-
۸	R3GB	قرمز	۲۴۰	۴/۱۵	۲۴	۱۰	-
۹	R3GC	سبز	۲۴۰	۴/۱۵	۲۴	۶	-



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

جدول (۲) - برخی مشخصه‌های کلی قلب [۱]

مربعی، چهار ضلعی	شکل مجتمع‌های سوخت و قلب	۴۴۵۱	قدرت حرارتی راکتور (MWt)
۲۱/۵۰	گام مجتمع سوخت (cm)	۱۷۰۰	قدرت الکتریکی خروجی (MWe)
۱/۲۶	گام میله سوخت (cm)	۲۵۷	تعداد مجتمع‌های سوخت
۲۸۷۱۱	دمای متوسط ورودی خنک کننده (°C)	۹	انواع مجتمع‌های سوخت
۳۰۹/۳۳	دمای متوسط خروجی خنک کننده (°C)	۲۸۹	تعداد کل میله‌ها در هر مجتمع
۴۲۰	ارتفاع قلب (cm)	۲۶۴	تعداد میله‌های سوخت هر مجتمع
۳۸۷/۶۲	قطر معادل قلب (cm)	۱۷ × ۱۷	چیدمان میله‌ها در هر مجتمع

الگوریتم ژنتیک

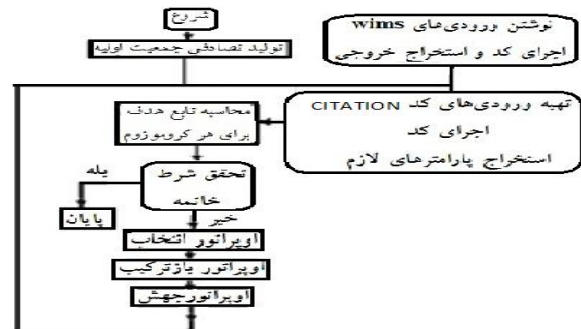
الگوریتم ژنتیک، یک روش بهینه‌سازی یوزیر مجموعه‌ها الگوریتم‌های تکاملیمی باشد. این روش اولین بار توسط **John Holland** در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ ارائه گردید. از مهمترین ویژگی‌های این روش، امکان انجام بهینه‌سازی با متغیرهای پیوسته گسسته، امکان انجام بهینه‌سازی با تعداد زیاد پارامتر، مناسب برای اعمال روش‌ها پیرداژ شمولی، توانایی زیاد در بهینه‌سازی توابع هدف پیچیده و غیرخطی می‌توان نام برد. اساس کار این روش استفاده از جامعه آماری بزرگ است. در این روش هر عضو از جمعیت کروموزوم نام داشته و دارای دو مشخصه است؛ یک رشته از اعداد که اطلاعات این کروموزوم در آن قرار دارد و عددی که نشان دهنده ارزش و برازندگی این کروموزوم در کل جمعیت است. ابتدای یک جمعیت اولیه تصادفی پیشنهاد می‌گردد و سپس محاسبه هزینه برای هر یک از این کروموزوم‌ها انجام می‌شود. محاسبه هزینه‌ها توسط جمعیت اولیه انجام می‌گیرد. الگوریتم در آن به کار گرفته می‌شود تا تفاوت نخواهد بود. (در ادامه، روند محاسبه هزینه آمده است) بعد از محاسبه تابع هزینه پردازش نتایج توسط الگوریتم در هر مرحله شرط خاتمه بررسی می‌گردد که در صورت برآورده شدن این شرط الگوریتم پایان می‌پذیرد، در غیر این صورت کروموزوم‌ها بر حسب تابع هزینه مرتب می‌شوند. در ادامه پارامترهای انتخاب، باز ترکیب و جهش و پیاسخ‌ها عملی کند تا کلی جواب‌ها بررسی گردد. [۴]

مراحل انجام بهینه‌سازی چینه سوخت در راکتور US-APWR با استفاده از الگوریتم ژنتیک مطابق دیاگرامی که در شکل (۱) آمده، مراحل بهینه‌سازی به کمک الگوریتم ژنتیک مشاهده می‌شود.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان



شکل (۱) - دیاگرام الگوریتم بکار رفته برای بهینه سازی چیدمان سوخت قلب راکتور [۲-۴]

قلب راکتور **US-APWR** به صورت مکعبی می باشد که دارای چینش سوخت با تقارن یک هشتم است. در چینش یک هشتم قلب از چهل مجتمع سوخت استفاده می شود. هرچینش به عنوان یک کروموزوم و هر مجتمع سوخت به عنوان یک ژن محسوب گردیده، بنابراین ژن ها می توانند از ۱ تا ۹ باشند. در ابتدا الگوریتم به صورت تصادفی به تعداد دلخواه (در این مورد چهل عدد) کروموزوم تولید می نماید (تولید جمعیت اولیه). سپس الگوریتم به صورت خودکار ورودی کد **CITATION** را برای هر کروموزوم تهیه کرده و کد را اجرا نموده، پارامترهای لازم برای محاسبه ارزش هر کروموزوم یعنی ضریب تکثیر موثر (K_{eff})، بزرگترین مقدار نسبی قدرت در سه جهت **X** و **Y** و **Z** (به ترتیب برابر P_x و P_y و P_z) را استخراج می نماید. در ادامه تابع هدف مطابق رابطه ۱ محاسبه می شود. لازم به ذکر است فرایند بهینه سازی در چینش اولیه سوخت بدون وجود سموم تولیدی و شرایط کاری حداکثر قدرت راکتور با تمرکز بر دو پارامتر بسیار مهم قلب یعنی K_{eff} و ضریب پیک قدرت (**PPF**) صورت می گیرد. این دو پارامتر برای چینش سوخت مرجع $K_{eff}=1/0.6$ و $PPF=2/46$ بدست آمده است. هدف از اجرای این الگوریتم یافتن چینشی از سوخت است که بیشترین K_{eff} و کمترین **PPF** ممکن را داشته باشد. در نتیجه، این فرایند یک مسأله دو هدفه است و تابع هدف رابطه ۱ به گونه ای تعریف شده که فرایند بهینه سازی تبدیل شود. بنابراین هر چه مقدار تابع هزینه کروموزوم کمتر باشد مطلوب تر و بهترین جواب است. تابع هزینه برای کروموزونی که شرط گفته شده را برآورده نماید، رابطه ۱ و برای سایر موارد رابطه ۲ است. ضرایب بکار گرفته شده تجربی بوده که اهمیت هر مورد را می رساند.

$$(1) \quad = \sqrt{(K_{eff} - 1.06)^2 + 1.25 \times (PPF - 2.46)^2} \times (-1) \quad \text{تابع هزینه هر کروموزوم دارای شرایط مورد نظر}$$

$$(2) \quad = \sqrt{(K_{eff} - 1.06)^2 + 1.25 \times (PPF - 2.46)^2} \quad \text{تابع هزینه هر کروموزوم نامطلوب}$$

جمعیت براساس مقدار هزینه از کم به زیاد مرتب می شوند. در مسأله کمینه سازی کمترین هزینه ارزش بیشتری دارد. هر کروموزوم که دارای ارزش بیشتری است، از شانس بالاتری برای انتخاب به عنوان والد برخوردار می باشد.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ و انشگاه اصفهان

این کروموزومها به صورت تجفت - جفتو بهر و شبالا بهایا یینبا همتر کیبشدهو نسلجدیدا ایجاد میگردد (اوپراتور باز ترکیب). برای ترکیب مجدد کروموزومها و شهایمتفاوتی وجود دارد؛ جفتیابیا با بالابهایی، جفتیابیتصادفی، جفتیابیتصادفیوز نداد ه شده (وزندهیبر اساسر تبه - وزندهیبر اساسهزینه)، انتخابدر مسابقه. زمانی که تعداد کروموزومها و آرایششرکتانهادر عملجفتگیری مشخصگر دید، مرحله تولید مثل فرامیرسد. در این مرحله هر دو کروموزوم و مانتخابیبه عنوان پدر و مادر مشابه تولیدیولوژیکی طبیعی به تبادل اطلاعات می - پردازند و از آنجا که این دو والد از بهترین کروموزومها یینسلانتخاب شده اند، انتظار می رود که فرزندان آنها با بهار ثبردنویژگی - های این دو والد، کروموزومهای بهتر یینسبتبهوالدین خود بود و در واقع نسل بعدی نسبتبه نسل فعلی پیشرفتتکاملیداشته باشد. مرحله تبادل اطلاعات تکپیوند نامدار د به شیوه های گوناگون یا انجام می گیرد. ساده -

ترین روش پیوند این است که یک یا چند نقطه پدر کروموزوم و مبعنوان نقاط پیوند معین شده هژن های ما بین این نقاط پدر و والد جابه جاشوند. در روشی که شناخته شده است، آرایه ای به طول کروموزومها از اعداد تصادفی ۰ و ۱ ایجاد می گردد. اگر مقدار متناظر با شماره ژن ۱ امیکباشد، ژن - ۱ امبرای فرزندان برابر ژن ۱ ام والد و لوژن ۱ ام برای فرزندان دوبرابر ژن ۱ ام والد و مانتخاب میشود و اگر مقدار متناظر با شماره ژن - ۱ ام صفر باشد، برعکس این فرایند صورت می گیرد. در این تحقیق از هر دو روش به صورت یکسان استفاده شده است.

در ادامه، تولید فرزندان توسط اپراتور جهش به این گونه است که ابتدا یک کروموزوم را به عنوان والد در نظر گرفته و چند ژن آن را تغییر می دهد و فرزند جدیدی ایجاد می نماید. تعداد کروموزومهای جهش یافته و تعداد ژن - هایی که تغییر می کند به نوع مسأله و تعداد جمعیت بکار گرفته شده بستگی دارد. در اینجا تعداد جمعیت هر نسل ۴۰ عدد است که ۳۰ فرزند با اپراتور باز ترکیب و ۱۰ مورد با اپراتور جهش ایجاد می گردد. در اپراتور جهش هر بار فقط ۴ ژن تغییر داده می شود. بعد از تولید جمعیت فرزندان، تابع هزینه برای هر کدام محاسبه می شود. در انتها شرایط خاتمه بررسی می گردد که در صورت تحقق آن اجرای الگوریتم پایان می پذیرد و در غیر این حالت چرخه طی شده دوباره تکرار می شود.

شرایط توقف متفاوتی مانند همگرایی جوابها، طی شدن تعداد تکرار معین، سپری شدن زمان معین و... برای این روش وجود دارد که می توان از هر مورد استفاده نمود. در این مقاله بر اساس تجربیات و آزمایش های صورت گرفته، شرط توقف طی شدن ۵۰ تکرار در نظر گرفته شده است به گونه ای که در هر بار تکرار ۴۰ کروموزوم ایجاد و بررسی می شود. البته نتایج نشان داده قبل از این مقدار جوابها همگرا می شود (شکل های ۳ و ۲). بنابراین تعداد ۲۰۴۰ مرتبه الگوی جدید چینی سوخت در قلب پیشنهاد و کد CITATION اجرا می گردد.

نتیجه گیری

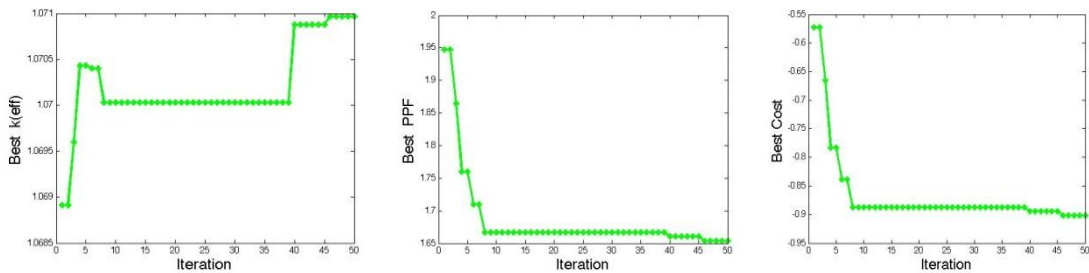


بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

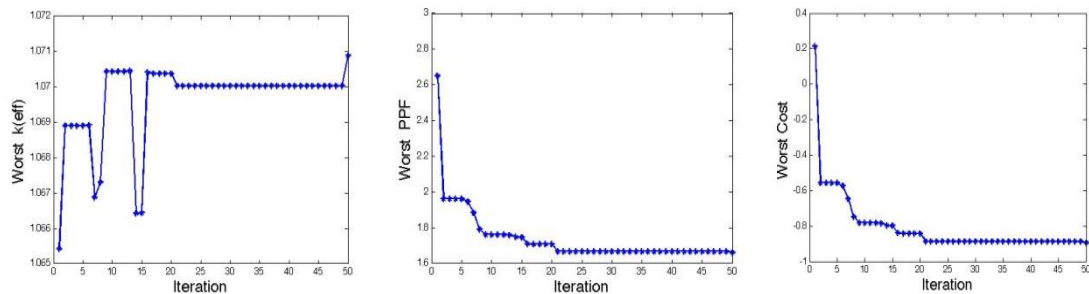
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم ژنتیک به همراه درصد موفقیت در جدول ۳ آمده‌است. همچنین در شکل ۲ و ۳ به ترتیب نمودارهای بهترین کروموزوم و بدترین کروموزوم بر حسب نسل هادر طیف رانند بینه سازی رسم شده‌است. جدول (۳) - نتایج نهایی بدست آمده از بینه سازی

پیک قدرت	ضرب تکثیر	هزینه کروموزوم	
۲/۴۶	۱/۰۶	۰	چیدمان مرجع
۱/۶۳	۱/۰۷۱	-۰/۹۰۱۵	بهترین کروموزوم
۸۳	۱/۱	-	درصد بهبود نتیجه



شکل (۲) - نمودار بهترین نتایج نهایی بدست آمده از بینه سازی در هر سیکل



شکل (۳) - نمودار بدترین نتایج نهایی بدست آمده از بینه سازی در هر سیکل

مقدار تابع هزینه هر کروموزوم روندی کاهشی دارد که در مسأله کمینه سازی هدف دستیابی به کمترین مقدار ممکن است که تابع هزینه بهترین کروموزوم -۰/۹۰۱۵ می‌باشد. مقدار K_{eff} برای قلب راکتور بینه برابر ۱/۰۷۱ به دست آمده که نسبت به چیدمان مرجع ۱/۱ افزایش یافته است و باعث افزایش طول سیکل بهره برداری از راکتور می‌شود. همچنین مقدار PPF بینه برابر ۱/۶۳ شده که ۸۳٪ نسبت به چیدمان مرجع بهبود یافته است. این کاهش در پیک توان دو مزیت مهم را به دنبال دارد؛ یکی امکان دریافت انرژی بیشتر از قلب موجود بدون تغییر در غنای سوخت و دیگری موجب افزایش ایمنی و قابلیت اطمینان راکتور می‌شود. در نهایت نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم با توجه به شرایط بکار گرفته شده از آن مطلوب و رضایت بخش می‌باشد.

مراجع



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

- [1] L. Break, "MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. 16-5, KONAN 2-CHOME, MINATO-KU," 2010.
- [2] F. Leszcynski and I. A. E. Agency, "WIMS-D library update final report of a coordinated research project Internat," Atomic Energy Agency, 2007.
- [3] T. Fowler, "CITATION-LDI2 nuclear reactor core analysis code system," CCC-643, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 1999.
- [4] R. L. Haupt and S. E. Haupt, Practical genetic algorithms: John Wiley & Sons, 2004.