

## بهینه‌سازی حفاظ بیولوژیکی یک راکتور ماژولار نمونه

پریسا اسلامی<sup>۱</sup>، امید صفرزاده<sup>۲\*</sup>، محسن خردمند-سعدی<sup>۱</sup> و مرتضی اکبری-حصار<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

<sup>۲</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران.

\* تهران، دانشگاه شاهد، دانشکده مهندسی، کدپستی: ۱۸۶۵۱-۳۳۱۹۱.

پست الکترونیکی: safarzadeh@shahed.ac.ir

### چکیده

برای حفاظ‌گذاری در برابر تشعشعات هسته‌ای، وزن پائین حفاظ اهمیت فراوانی دارد. طراحی حفاظ یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه است. در طراحی حفاظ ابتدا پارامترها بر پایه معادلات به صورت تحلیلی تخمین زده می‌شود و سپس با استفاده از کدهای محاسباتی، طراحی نهایی انجام می‌شود. با این وجود در بسیاری از موارد، حفاظ طراحی شده فاقد بهینگی لازم هستند و ضروری است طرح اولیه با استفاده از روش‌های شناخته شده بهینه گردد. در این پژوهش، به منظور بهینه‌سازی حفاظ بیولوژیکی یک راکتور ماژولار، یک روش بهینه‌سازی چند هدفه جهت کویل کردن الگوریتم PSO با کد محاسباتی ANISN پیشنهاد شده است. دو تابع هدف جزء شامل وزن و دز تابشی در یک مدل ریاضی چند هدفه لحاظ شده است. تابع هدف کل عبارت است از یک ترکیب خطی وزن دهی شده از هر یک از این دو تابع جزء. مواد مورد استفاده برای بهینه‌سازی شامل بتن، کامپوزیت شامل  $B_2C$  و  $B_2O_3$  است. نتایج نشان می‌دهد روش بهینه‌سازی چند هدفه برای طراحی حفاظ بیولوژیکی یک راکتور ماژولار قابل اعتماد و کارآمد است. این روش می‌تواند کیفیت طراحی حفاظ را بهبود و وزن حفاظ را ۳۸٪ کاهش و آهنگ دز مجموع نوترون و فوتون را ۸۳٪ کاهش دهد، نسبت به حالتی که از حفاظ متداول چاهک راکتور (بتن سرپانتین) استفاده شود.

کلیدواژگان: حفاظ، راکتور ماژولار، الگوریتم PSO، ANISN.

### ۱. مقدمه

دارند. مطالعه در زمینه حفاظت در برابر پرتوها مراحل را در بر دارد که عبارتند از: انتقال پرتو در حفاظ، میزان تشعشعات آن، تولید حرارت در حفاظ، رادیو اکتیو شدن مواد حفاظ و محیط اطراف آن، نفوذ پرتو در شیارهای حفاظ، پراکندگی پرتوها در مجاورت حفاظ، انتخاب ماده مناسب به منظور حفاظ‌گذاری، و در نهایت بهینه‌سازی شکل و آرایش فضایی حفاظ [۱]. در

راکتورهای ماژولار کوچک<sup>۱</sup> به راکتورهایی گفته می‌شود که توان تولیدی آنها معمولاً کم‌تر از ۳۰۰ مگاوات الکتریکی است. این راکتورها با استفاده از فناوری ماژولار طراحی شده و منجر به صرفه‌جویی در هزینه و کاهش مدت زمان ساخت می‌شود. از دیگر مزایای SMRها ایمنی بهتر و چگالی بیش‌تر انرژی است. این راکتورها کاربردهای دیگری نظیر تولید آب شیرین و حرارت

<sup>1</sup> Small modular reactor (SMR)

راکتورهای قدرت مهم‌ترین تشعشعات هسته‌ای که نیاز به حفاظ گذاری دارند عبارتند از نوترون‌های اولیه، تابش گامای اولیه، نوترون‌های حرارتی و تابش گامای ثانویه [۲]. در طراحی حفاظ راکتور سه هدف زیر دنبال می‌شود:

۱. حفاظت از کارکنان در برابر آسیب احتمالی ناشی از تشعشعات هسته‌ای و مطمئن شدن از حفظ سلامت عمومی.
۲. کاهش پرتوگیری اجزای ساختمان برای حفاظت از دستگاه‌های الکترومغناطیسی و ابزار الکتریکی.
۳. حفاظت از مولد بخار و لوله‌های خنک‌کننده از گرمای شدید جذب شده از تشعشعات هسته‌ای.

طراحی حفاظ شامل انتخاب مواد مناسب، تعیین ضخامت مورد نیاز برای کاهش تشعشعات و دز ناشی از آن و رساندن آن به مقدار مجاز است. خصوصیات حفاظ مناسب در یک راکتور وابسته به اهداف راکتور است. به‌عنوان مثال؛ در یک راکتور قدرت معمولی برای حفاظ به ترکیبی از مواد سنگین با ۲ تا ۳ متر ضخامت بتن خارجی نیاز است.

در سال‌های اخیر استفاده از ترکیب مواد نوین و مواد مرسوم مانند بتن در حفاظ گذاری مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. ملکی و همکاران در سال ۲۰۲۳، از یک نانوکامپوزیت مبتنی بر اکسید بیسموت در بستر پلی اتیلن به منظور حفاظ‌گذاری در رادیوگرافی دندان استفاده کردند [۳]. نتایج محک روی نمونه‌های حیوانی از فک نشان داد اشعه X تابیده شده به‌صورت کامل در کامپوزیت جذب شده و تأثیری روی کیفیت تصاویر رادیوگرافی ندارد. مختاری و همکاران از یک ماده نوین شامل ترکیب نانو پلیمر  $PbO-H_3BO_3$  در درون بتن به‌منظور افزایش خواص حفاظتی این ماده در میدان‌های مختلط نوترون و گاما استفاده کردند [۴]. نتایج نشان داد استفاده از تنها ۵٪ وزنی از نانو کامپوزیت، می‌تواند ضریب تضعیف گاما

را با ضریب ۱/۵ افزایش دهد. یداللهی و همکاران از یک مدل-سازی مبتنی بر شبکه عصبی به‌منظور به‌دست آوردن ترکیب بهینه از ماده کولمانیت در بتن استفاده کردند [۵]. نتایج نشان داد به‌منظور دستیابی به حالت بهینه از حفاظ‌گذاری نوترون، کسر حجمی کولمانیت بایستی حداقل برابر ۵۰٪ باشد. لی و همکاران در سال ۲۰۲۳، از الگوریتمی تحت عنوان BBMOPSO به‌منظور بهینه‌سازی وزن، حجم و دز در راکتور مسئله نمونه Savannah استفاده کردند [۶]. نتایج نشان داد که با طراحی لایه‌های حفاظتی متعدد و انتخاب مواد مناسب و با ضخامت بهینه، در مقایسه با طراحی اولیه می‌توان وزن را تا ۷۸.۷۷٪، حجم را تا ۲۳.۱۰٪ و آهنگ دز را به اندازه ۷۲.۴۱٪ کاهش داد. هدف از مقاله حاضر طراحی حفاظ بیولوژیکی یک راکتور ماژولار نمونه با استفاده از مواد نوین جهت افزایش اثر بخشی و مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی PSO<sup>۱</sup> است.

برای این منظور از کد ترابرد ANISN برای ترابرد گاما و نوترون در مواد با ضخامت‌های مختلف حفاظ استفاده گردید. برای استخراج طیف نوترون و گاما در قلب راکتور از کد MCNP استفاده شد. روش بهینه‌سازی PSO برای ارائه پیکربندی هندسی جدید با استفاده از تابع هدف مورد استفاده قرار گرفت تا جنس لایه‌ها و ضخامتشان به‌صورت بهینه به دست آید.

## ۲. روش کار

### ۱.۲ راکتور ماژولار

راکتورها مدولار به‌دلیل اندازه کوچک و ویژگی طراحی (شامل: اندازه قابل تنظیم، ماژولار بودن، بهبود ایمنی راکتور، قیمت پایین‌تر) مزیت بیش‌تری نسبت به سایر راکتورها بزرگ مرسوم دارند [۷]. از طرف دیگر، این راکتورها قابلیت استفاده در نواحی

<sup>1</sup> Particle Swarm Optimization

دور دست برای تولید برق، شیرین‌سازی آب و تولید حرارت را دارند. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی، این راکتورها در نقاط مختلف دنیا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸]. انواع مختلفی از این نوع راکتورها در مراحل طراحی، مجوزگیری و ساخت هستند [۹]. به‌عنوان مثال؛ در کشور روسیه راکتور ماژولار KLT40s، در آرژانتین راکتور CAREM و در چین راکتور PM-HTR در دست ساخت هستند. در جدول ۱ مهم‌ترین پارامترهای راکتور ماژولار SMART مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول (۱). پارامترهای اصلی راکتور [۱۰].

پارامتر	مقدار
ظرفیت حرارتی راکتور (MWth)	۳۳۰
قطر معادل قلب (m)	۱/۸۳۱۶
قطر بیرونی Baffle (m)	۲/۴۴
قطر بیرونی Barrel (m)	۲/۵
قطر بیرونی Down-comer (m)	۳/۷
قطر بیرونی محفظه تحت فشار (m)	۴/۳
ارتفاع قلب فعال (cm)	۲۰۰
گام مجتمع سوخت (cm)	۲۱/۵۰۴
گام میله سوخت (cm)	۱/۲۵۹۸
شعاع قرص سوخت (cm)	۰/۴۰۹۶
شعاع داخلی غلاف سوخت (cm)	۰/۴۱۸۷۵
شعاع خارجی غلاف سوخت (cm)	۰/۴۷۵
جنس غلاف سوخت	Zircalloy-۲
چگالی غلاف سوخت (g/cm <sup>۳</sup> )	۶/۵۶
شعاع داخل میله اندازه‌گیری (cm)	۰/۵۶۱۵
شعاع بیرونی میله اندازه‌گیری (cm)	۰/۶۱۲
جنس غلاف میله راهنما	Zircalloy-۴
چگالی غلاف میله راهنما (g/cm <sup>۳</sup> )	۶/۵۶

## ۲.۲ مواد حفاظ

از آغاز دوران هسته‌ای، بتن یکی از پرکاربردترین مواد در حفاظ سازی راکتورهای قدرت تجاری برای تضعیف گاما و نوترون، محسوب شده است. برای کامل کردن بتن، مواد پلیمری نوین با

هدف حفاظ سازی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مواد چگالی کم‌تر و عناصر سبک‌تری را در ترکیب‌شان دارند که برای کاهش انرژی نوترون مناسب است. به‌عنوان مثال؛ رزین‌های اپوکسی و پلی اتیلن با بورون و گادولونیوم (با توجه به قابلیت مانور، سهولت جایگزینی و هزینه‌ها) می‌تواند مفید باشد [۱۱]. در این پژوهش از بتون سر پانتین، اپوکسی با B<sub>۴</sub>C و اپوکسی با B<sub>۲</sub>O<sub>۳</sub> (جدول ۲) استفاده شده است.

جدول (۲): مشخصات مواد نوین.

ماده	چگالی اتمی (#/b.cm)	ایزوتوپ	درصد اتمی
اپوکسی با B <sub>۴</sub> C	۰/۱۱۵۷۷۹	H-۱	۰/۲۵۷۴۲
		B-۱۰	۰/۳۷۹۵۴
		C-۱۲	۰/۳۲۰۱۳
اپوکسی با B <sub>۲</sub> O <sub>۳</sub>	۰/۰۹۸۴۰۰۶	O-۱۶	۰/۰۴۲۹۱
		H-۱	۰/۳۰۲۸۸
		B-۱۰	۰/۱۲۷۲۸
		C-۱۲	۰/۵۱۹۳۵
		O-۱۶	۰/۰۵۰۴۹

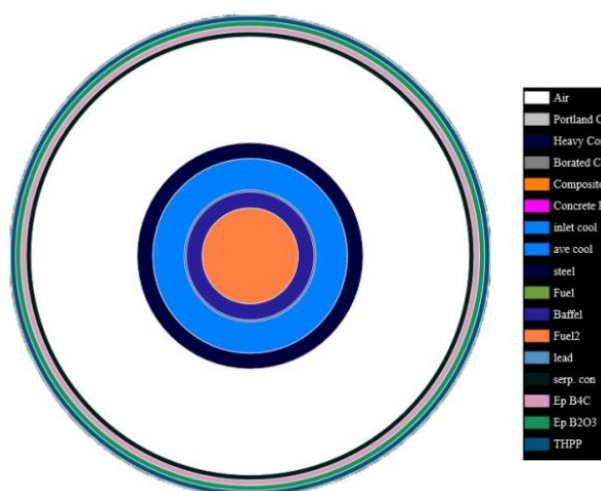
## ۳.۲ مدل‌سازی حفاظ توسط ANISN

کد محاسبات ترابرد ANISN [۱۲] جهت حل معادله ترابرد نوترون و گاما به‌طور کوپل شده (در یک بعد) و هندسه حلقوی استفاده شد. این کد با گسسته‌سازی انرژی، مکان و زاویه فضایی به حل عددی معادله ترابرد می‌پردازد. در این گسسته‌سازی عددی، متغیر مکان با استفاده از روش تفاضل-محدود، متغیر زاویه با استفاده از روش S<sub>n</sub> و متغیر انرژی با استفاده از گروه‌بندی در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، طول مش مکانی ۰/۰۱ سانتی‌متر و مرتبه S<sub>n</sub> برابر ۱۶ انتخاب شده است. بنابراین، گسسته‌سازی مکانی دارای خطای مرتبه دوم (O(h<sup>۲</sup>)) است. به‌دلیل گسسته‌سازی زاویه فضایی، این کد توانایی حل مسائل ناهمسان‌گرد را نیز دارا است. شار سیستم با استفاده از حل معادله ترابرد با چشمه شکافت به‌دست می‌آید. به همین

محااسبه شد [۱۴]. این دو طیف در جدول ۳ و ۴ آورده شده است.

جدول (۳): طیف نوترون در قلب راکتور.

مقدار	انرژی (eV)	گروه
۰/۰۱۳۰۵۷	۱/۷۳۳۳E+۷	۱
۰/۲۰۲۶۱۰	۵/۲۲۰۵E+۶	۲
۰/۱۰۷۸۶۰	۱/۰۰۲۶E+۶	۳
۰/۱۴۷۰۰۰	۴/۹۷۸۷E+۵	۴
۰/۱۱۳۶۵۰	۹/۸۰۳۷E+۴	۵
۰/۳۰۷۳۰۰	۹/۱۱۸۸E+۳	۶
۰/۱۰۸۵۳۰	۵/۳۱۵۶E-۱	۷



شکل (۲): مدل سازی راکتور در کد ANISN.

جدول (۴): طیف گاما در قلب راکتور.

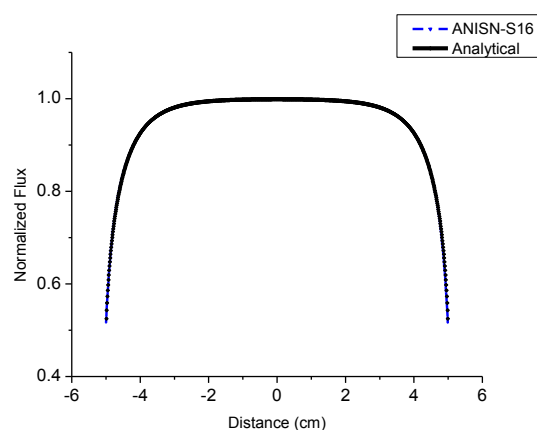
مقدار	انرژی (MeV)	گروه
۰/۰۰۰۰۱۵	۱۴/۰	۱
۰/۰۱۲۸۴۱	۱۰/۰	۲
۰/۲۰۷۲۱۲	۵/۰	۳
۰/۲۸۴۴۲۶	۲/۰	۴
۰/۲۷۲۴۷۵	۱/۰	۵
۰/۲۲۳۰۳۰	۰/۵	۶

## ۴.۲ الگوریتم بهینه سازی حفاظ

طراحی حفاظ تابشی راکتورهای هسته‌ای اغلب اهداف متعددی دارد. با در نظر گرفتن راکتور هسته‌ای، هدف به دست آوردن

دلیل از این کد در محاسبات حفاظ سازی که به دلیل حضور مواد با جذب بالا دارای ناهمسان گردی فضایی است، استفاده می‌شود.

برای صحت سنجی کد ANISN مورد استفاده، یک محیط کاملاً جاذب شامل چشمه همسان گرد با توزیع مکانی یکنواخت با سطح مقطع کل  $1 \text{ (1/cm}^2\text{)}$ ، طول  $10 \text{ cm}$  و شرط مرزی خلاء در نظر گرفته و نتایج با مقادیر تحلیلی مقایسه و در شکل ۱ به نمایش در آمده است. همان گونه که مشخص است تطابق بسیار مناسبی بین نتایج کد ANISN با نتایج تحلیلی وجود دارد که نشان دهنده اعتبار نسخه کد مورد استفاده است.



شکل (۱): توزیع شار درون محیط.

شکل ۲ مدل سازی قلب راکتور به همراه Baffle, Barrel, Down-comer، محفظه تحت فشار، چاله راکتور و حفاظ بیولوژیکی در کد ANISN را نشان می‌دهد. در شبیه سازی حاضر از کتابخانه معتبر IRAN۴.LIB استفاده شد [۱۳]. در این کتابخانه سطح مقطع برهم کنشها در یک ساختار ۱۲ گروهی از انرژی، شامل ۷ گروه برای نوترون‌ها و ۵ گروه برای فوتون‌ها وجود دارد. مدل سازی صورت گرفته مبتنی بر ترابرد نوترون و فوتون‌های حاصل از شکافت و نیز فوتون‌های گیراندازی است. در این مدل سازی نیاز به طیف نوترون‌های حاصل از شکافت و گاما است که این طیف با استفاده از تالی F۴ در کد MCNP

$$c_2 r_2 (gbest(k) - x_i(k))$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1)$$
 که  $v_i(k)$  سرعت حرکت ذره  $i$ ام در تکرار  $k$ ام،  $c_1$ ،  $c_2$  و  $w$  عدد ثابت،  $x$  موقعیت ذره،  $pbest$  بهترین موقعیت محلی ذره،  $gbest$  بهترین موقعیت سراسری ذره،  $r_1$  و  $r_2$  دو عدد تصادفی در محدوده [۰،۱] هستند. مقدار  $c_1$  و  $c_2$  برابر ۱/۵ و  $w$  برابر ۰/۷۳ است.

روش وزن‌دهی را می‌توان برای تبدیل مسئله چند هدفه به مسئله تک هدفه استفاده کرد که در آن با توجه به اهمیت اهداف، ضرایب وزنی تعیین می‌شود. با توجه به این‌که اهداف مختلف اغلب دارای ابعاد و مرتبه‌های متفاوتی هستند، لازم است عملیات بدون بعد روی تابع هدف انجام شود. برای به دست آوردن تابع هدف کل، هر تابع هدف جزء بدون بعد در ضریب وزنی مربوطه ضرب شده و سپس جمع می‌شود. تابع هدف کل با در نظر گرفتن دز تابش و وزن حفاظ به شرح زیر است [۱۴]:

$$F(x) = C_R f_R(x) + C_W f_W(x)$$

$$f_R(x) = \frac{R(x)}{R_0}$$

$$f_W(x) = \frac{W(x)}{W_0}$$

$$C_R + C_W = 1$$

که  $C_R$  وزن تابع دز،  $C_W$  وزن تابع وزن،  $W$  وزن حفاظ،  $W_0$  وزن حفاظ مرجع،  $R_0$  دز و  $R$  مقدار مرجع است. مقدار  $C_R$  برابر با ۰/۶ و مقدار  $C_W$  برابر با ۰/۴ انتخاب شده است.

در این روش، الگوریتم PSO با کد محاسباتی حفاظ یعنی ANISN کوپل می‌شود. روش وزن‌دهی برای ارزیابی تناسب ابعاد استفاده می‌شود. این روش می‌تواند به‌طور خودکار نوع مواد و ضخامت لایه‌های حفاظ را برای طراحی بهینه آن تنظیم کند. این روش عمده‌تاً شامل مدل بهینه‌سازی و مدل محاسبه دز است. مدل بهینه‌سازی، نه تنها می‌تواند پارامترهای طراحی را تنظیم کند، بلکه فایل ورودی برای محاسبه دز تابشی را نیز تولید

طرح حفاظ با وزن تا حد امکان سبک و دز تابشی تا حد امکان کم است. علاوه بر این، طراحی بهینه‌سازی حفاظ تابشی یک مسئله همبسته شده از ترابرد نوترون و فوتون است [۱۵].

کار را می‌توان به‌سادگی این‌گونه توصیف کرد: تنظیم متغیر مستقل برای یافتن حداقل متغیر وابسته. متغیرهای مستقل، نوع مواد و ضخامت لایه‌های حفاظ است. متغیرهای وابسته اهداف طراحی هستند، مانند دز تابش و وزن حفاظ. مدل ریاضی یک مسئله چند هدفه<sup>۱</sup> به شرح زیر است [۱۵]:

$$\min F(x) = (F_R(x), F_W(x) \dots)^T$$

$$F_R(x) = R_N(x) + R_P(x)$$

$$F_W(x) = \sum_{m=1}^M V_m \cdot \rho_m$$

$$I_j \leq x_j \leq u_j (j = 1, 2, \dots, D)$$

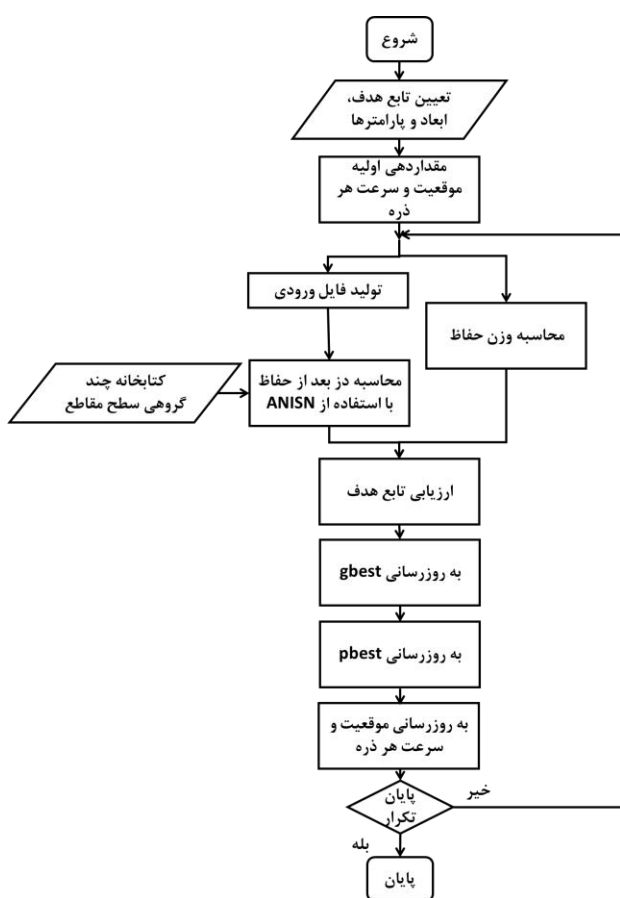
که در آن  $F(x)$  تابع هدف،  $F_R(x)$  تابع دز،  $F_W(x)$  تابع وزن حفاظ،  $R_N(x)$  دز ناشی از تابش نوترون،  $R_P(x)$  دز ناشی از تابش فوتون،  $V_m$  حجم لایه  $m$  حفاظ،  $\rho_m$  چگالی لایه  $m$  حفاظ،  $x_j$  بیان‌گر ضخامت و جنس لایه حفاظ است. برای محاسبه دز ناشی از فوتون/نوترون از ضرایب تبدیل شار فوتون/نوترون به دز مطابق با استاندارد ۲۱-ICRP استفاده شده است. به عبارتی، با محاسبه شار گروهی و استفاده از ضرایب مذکور، مقدار دز محاسبه می‌شود. در الگوریتم PSO، هر ذره مختصات موقعیت و سرعت خود را دارد. موقعیت یک ذره نشان دهنده تمام اطلاعات طراحی حفاظ، از جمله نوع ماده و ضخامت هر لایه حفاظ است. سرعت و جهت می‌تواند موقعیت ذره را در لحظه بعد تعیین کند. حرکت ذرات همراه با سرعت، معادل فرآیند بهینه‌سازی طراحی حفاظ راکتور است. هر ذره موقعیت فعلی خود و گروه ذرات و بهترین موقعیتی که در طول دوره به آن رسیده است را می‌داند [۱۵]. ذرات براساس تجربیات گذشته به موقعیت بعدی حرکت می‌کنند. ذرات سرعت و موقعیت<sup>۲</sup> خود را با معادلات زیر به روز می‌کنند [۱۵]:

$$v_i(k+1) = wv_i(k) + c_1 r_1 (pbest_i(k) - x_i(k)) +$$

<sup>2</sup> Position

<sup>1</sup> Multi-objective

۱۲. اگر تعداد تکرارهای فعلی به حداکثر برسد، پاسخ بهینه خروجی است. در غیر این صورت، فرآیند تا رسیدن به پاسخ بهینه تکرار می‌گردد.
۱۳. در نهایت، آرایش حفاظ بهینه شده و طرح‌های بهینه‌شده و طرح اصلی مقایسه و تحلیل می‌شوند.
۱۴. بر اساس پارامترهای اصلی طراحی، دز نوترون، دز گاما و دز کل خارج از محافظ ثانویه با استفاده از ANISN محاسبه می‌شوند.



شکل (۳): فلوچارت روش بهینه‌سازی.

می‌کند. در مورد مدل محاسبه دز، دز تابش توسط ANISN محاسبه می‌شود. شکل (۳) فلوچارت بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

مراحل دقیق و فرآیند اجرای روش بهینه‌سازی به شرح زیر است:

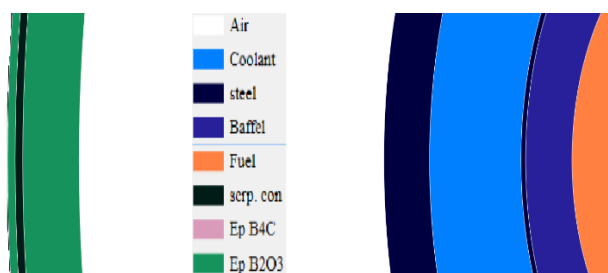
۱. ارائه اهداف بهینه‌سازی (از جمله دز تابش و وزن حفاظ).
۲. تنظیم پارامترهای اساسی PSO مانند تعداد ذرات، حداکثر تعداد تکرارها، ثابت‌های شتاب، وزن اینرسی، ضریب جهش و غیره. در این جا ۲۰ ذره در ۱۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است.
۳. راه‌اندازی موقعیت ذرات در کل فضا که به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. در ابتدا سرعت ذرات را روی صفر مقداردهی می‌شوند.
۴. ایجاد فایل‌های ورودی برای محاسبه دز با رمزگشایی از اطلاعات موقعیت ذرات. هر ذره شامل اطلاعاتی از قبیل نوع حفاظ و ضخامت آن است.
۵. محاسبه مقادیر تابع هدف و از روی آن محاسبه وزن کل حفاظ و دز تابشی که با کد ANISN محاسبه می‌گردد.
۶. ارزیابی تناسب ابعاد. کیفیت موقعیت ذرات با استفاده از حالت وزن‌دهی اهداف ارزیابی می‌شوند.
۷. راه‌اندازی  $best\ P$  و  $best\ g$ .
۸. به روز رسانی سرعت و موقعیت هر ذره. فایل‌های ورودی ANISN نیز متعاقباً به روز می‌شوند.
۹. محاسبه مقادیر تابع هدف در موقعیت جدید. روش محاسبه همانند مرحله (۵) است.
۱۰. ارزیابی مجدد تناسب ذرات در موقعیت جدید. روش ارزیابی همانند مرحله (۶) است.
۱۱. به روز رسانی  $best\ P$  و  $best\ g$ .

### ۳. نتایج

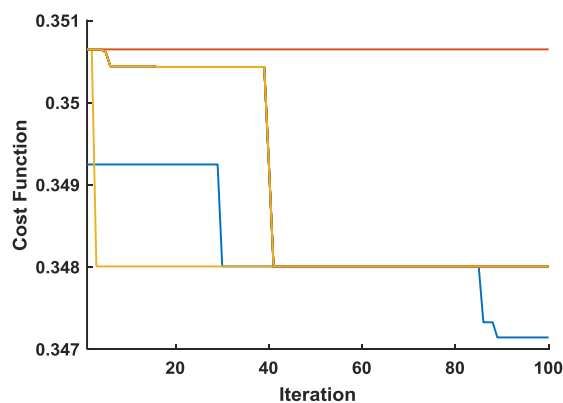
الگوریتم بهینه‌سازی برای ۱۰۰ تکرار و ۱۰ بار اجرا و تابع هدف در تکرارهای مختلف در شکل ۴ رسم شد. مواد و ضخامت برای طرح بهینه شده در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حفاظ بهینه‌سازی شده موجب کاهش قابل ملاحظه وزن و دز شد. میزان دز کل فضای تجهیزات و منطقه خارج از حفاظ ثانویه بهتر از طرح اصلی است. در شکل ۵ چیدمان پیشنهادی لایه‌های حفاظ نشان داده شده است.

جدول (۵): مواد و ضخامت طرح حفاظ بهینه شده.

حالت	ماده و ضخامت حفاظ	وزن حفاظ (نسبی)	دز بعد از حفاظ (نسبی)
قبل از بهینه‌سازی	۴۰ سانتی‌متر بتون سرپانتین و ۳۷ سانتی‌متر اپوکسی و $B_2O_3$ ۱ سانتی‌متر بتون سرپانتین، ۲ سانتی‌متر اپوکسی و $B_2O_3$	۱	۱
بعد از بهینه‌سازی	۳۷ سانتی‌متر بتون سرپانتین، ۲ سانتی‌متر اپوکسی و $B_2O_3$	۰/۶۱۷۰	۰/۱۶۷۲



شکل (۵): نمایه طرح حفاظ اصلی (نحوه قرارگیری قلب راکتور، Downcomer, Baffle, Barrel، محفظه فشار و فاصله هوایی و در نهایت حفاظ).



شکل (۴): مقادیر تابع هدف در تکرار مختلف.

### ۴. نتیجه‌گیری

با تجزیه و تحلیل میزان وزن و دز در قبل و بعد از بهینه‌سازی با روش PSO این نتیجه حاصل می‌گردد که در صورت استفاده از مواد نوین مانند اپوکسی و  $B_2O_3$  به همراه بتون سرپانتین در

۴۰ سانتی‌متر از حفاظ بیولوژیکی می‌توان وزن حفاظ را ۳۸٪ و آهنگ دز را ۸۳٪ کاهش داد.

### ۵. مراجع

- B. P. Fairand. *Radiation Sterilization for Health Care Products X-ray, Gamma and Electron Beam*. CRC Press, New York, 2002.
- S. Sahoo. *Production and Applications of Radioisotopes*. Physics Education, 2006.
- Sh. Maleki, S. Kashian, A. Akhavan, M. Kheradmand saadi. Preliminary study of a novel radiation shield for jaw in dental radiography using the high-density polyethylene/bismuth oxide nanocomposite. *Radiat. Phys. Chem.* 205 (2023) 110743.
- K. Mokhtari, M. Kheradmand-saadi, H. Ahmad-Panahi, Gh. Jahanfarnia. The shielding properties of the ordinary concrete reinforced with innovative nano polymer particles containing  $PbO-H_3BO_3$  for dual protection against gamma and neutron radiation. *Radiat. Phys. Chem.* 189 (2021) 109711.
- A. Yadollahi, E. Nazemi, A. Zolfaghari, A. M. Ajorloo. Optimization of thermal neutron shield concrete mixture using artificial neural network. *Nucl. Eng. Des.* 305 (2016) 146-155.

6. J. Lei, C. Yang, H. Zhang, C. Liu, D. Yan, G. Xiao, Z. He, Z. Chen, T. Yu. Radiation shielding optimization design research based on bare-bones particle swarm optimization algorithm. *Nucl. Eng. Tech.* 55 (2013) 2215-2221.
7. Korea Institute of Nuclear Safety. Regulatory Assessment Technology for System-integrated Modular Advanced Reactor. KINS/RR-946, 2012.
8. IAEA. Manual for reactor produced radioisotopes. IAEA TECDOC 1340, 2003.
9. SMART SSAR. Standard Design Safety Analysis Report. Korea Atomic Energy Research Institute, 2010.
10. A. Pourrostam, S. Talebi, O. Safarzadeh. Core analysis of accident tolerant fuel cladding for SMART reactor under normal operation and rod ejection accident using DRAGON and PARCS. *Nucl. Eng. Tech.* 53 (3) (2021) 741-751.
11. M. Giménez, E. M. Lopasso. Tungsten Carbide compact primary shielding for Small Medium Reactor. *Ann. Nucl. Energy* 116 (2018) 210-223.
12. W. W. Engle. ANISN-PC: Multigroup One-Dimensional Discrete Ordinates Transport Code with Anisotropic Scattering. RSIC CCC-514, 1994.
13. M. K. Marashi, J. R. Maiorino, A. G. Mendonça, A. Santos. IRAN. LIB (Improved Range of ANISN/PC LIBrary): a P-3 coupled neutron-gamma cross-section library in ISOTXS format to be used by ANISN/PC (CCC-0514/02). *Ann. Nucl. Energy* 18 (10) (1991) 597-602.
14. D. B. Pelowitz. MCNPX USER'S MANUAL, Version 2.6.0. Los Alamos National Laboratory, 2008.
15. M. A. Tunes, C. R. E. de Oliveira, C. G. Schön. Multi-objective optimization of a compact pressurized water nuclear reactor computational model for biological shielding design using innovative materials. *Nucl. Eng. Des.* 313 (2017) 20-28.
16. Z. Chen, Z. Zhang, J. Xie, Q. Guo, T. Yu. Metaheuristic optimization method for compact reactor radiation shielding design based on genetic algorithm. *Ann. Nucl. Energy* 134 (2019) 318-329.
17. O. Safarzadeh, A. Tizdast. Optimization of PID controller for water level control of the nuclear steam generator using PSO and GA. *Kerntechnik* 87 (5) (2022) 597-606.