

طراحی بهینه یک راکتور هسته‌ای یکپارچه کوچک با سوخت حلقوی و بررسی اثر شعاع داخلی سوخت بر پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی قلب راکتور

سپیده نصیری^۱، غلامرضا انصاری فر*، محمدحسین استکی

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان - ایران

چکیده:

یکی از شاخص‌ترین مزایای سوخت‌های حلقوی قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی و برداشت حرارت بیشتر از آنها می‌باشد که با استفاده از این مزیت می‌توان با حفظ معیارهای ایمنی، توان حرارتی راکتورها و نیروگاه‌های هسته‌ای را افزایش داد. در این مقاله، قلب یک راکتور یکپارچه کوچک (SMR) از نوع آرژانتینی با مجتمع‌های شش ضلعی که در آن از میله‌های سوخت حلقوی استفاده شده، طراحی و بر اساس پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی قلب بهینه سازی می‌شود. همچنین، تأثیر شعاع داخلی سوخت بر پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی قلب ارزیابی می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: راکتور هسته‌ای یکپارچه کوچک، سوخت حلقوی، بهینه‌سازی، پارامترهای نوترونیکی، تحلیل ترموهیدرولیکی.

Optimal design of a small modular nuclear reactor with annular fuel and investigation of the fuel internal radius effect on the neutronic and thermal-hydraulic parameters of the reactor-core

S. Nasiri¹, G. R. Ansarifar*, M. H. Esteki

1. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan- Iran.

Abstract:

One of the most significant advantages of annular fuel is the ability to cool internally and externally and more heat removal from them, which can be used to increase the thermal power of reactors and nuclear power plants by maintaining safety criteria. In this paper, the core of an Argentine small modular reactor (SMR) with hexagonal assemblies and annular fuel rods is designed and optimized based on the neutronic and thermal-hydraulic parameters of the core. Also, the effect of fuel internal radius on the core neutronic and thermal-hydraulic parameters is evaluated.

Keywords: Small Modular Nuclear Reactor, Dual-cooled Annular Fuel, Optimization, Neutronic Parameters, Thermal-hydraulic Analysis.

۱. مقدمه

آرژانتین توسعه‌ی نیروگاه‌های هسته‌ای کوچک را با عنوان CAREM دنبال می‌کند. راکتور CAREM به صورت یکپارچه و توسط کمیسیون ملی انرژی اتمی^۱ طراحی شده است و اولین راکتور قدرت کوچک یکپارچه توسط این کشور می‌باشد. این راکتور یک راکتور آب سبک ۱۰۰ مگاوات حرارتی تحت فشار یکپارچه (IPWR^۲) مبتنی بر چرخه غیرمستقیم با ویژگی‌های ممتاز است و دستیابی به سطح ایمنی بالاتر را ممکن می‌سازد همچنین در این نوع راکتور کندکنندگی و خنک‌کنندگی با آب سبک انجام می‌شود. مدار اولیه کاملاً در مخزن راکتور قرار گرفته‌است که بدین معنی است که یک راکتور خودفشارنده^۳ با ۱۲ مولد بخار در داخل مخزن فشار راکتور است که با جابه‌جایی طبیعی سیال به کار انداخته می‌شود. این طراحی خطر از دست دادن حوادث خنک‌کننده (LOCA) را به حداقل می‌رساند. توان حرارتی این راکتور ۱۰۰ مگاوات (۲۵ مگاوات الکتریکی) است. قلب با المان‌های سوخت استاندارد با اورانیوم غنی‌شده‌ی ۱/۸ درصد تا ۳/۱ درصد در ۶۱ مجتمع سوخت هگزگونال بارگذاری می‌شوند و فرآیند تعویض سوخت سالانه انجام می‌شود. مخزن فشار راکتور CAREM شامل قلب، مولدبخار، کل سیستم خنک‌کننده مدار اولیه و مکانیزم حرکت میله‌های جاذب می‌باشد. قطر مخزن فشار حدود ۳/۲ متر و طول آن ۱۱ متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱ هم نشان داده شده هر مجتمع سوخت دارای ۱۰۸ میله سوخت، ۱۸ میله جاذب و ۱ لوله راهبر ابزار دقیق می‌باشد سوخت آن نیز UO_2 غنی شده می‌باشد. راکتیویته قلب توسط سم سوختنی نوترون (Gd_2O_3) که در میله‌های سوخت خاصی استفاده می‌شود، کنترل می‌گردد. هدف اصلی راکتور فراهم کردن انرژی برق برای مناطق دور افتاده، تحقیقات یا نمک‌زدایی آب است [۱].

[تاکنون سوخت‌های حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج فقط در مجتمع‌های سوخت مربعی و راکتور VVER-1000 با مجتمع‌های سوخت شش ضلعی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اما در این پژوهش برای نخستین بار یک راکتور یکپارچه کوچک (SMR^۴) با مجتمع‌های سوخت شش ضلعی که در آن از سوخت‌های حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج استفاده شده مورد بررسی قرار گرفته و پارامترهای نوترونیکی از قبیل ضریب تکثیر موثر و فاکتور بیشینه‌ی توزیع قدرت شعاعی، فاکتور بیشینه‌ی توزیع قدرت محوری، راکتیویته‌ی اضافی و پارامترهای ترویدرولیکی از قبیل ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، میزان افزایش حاشیه ایمنی تا نقطه کمینه $DNBR^5$ ، افت فشار به‌دست آورده شده و با راکتور یکپارچه کوچک نوع آرژانتینی که از فناوری سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی از داخل و خارج بهره نمی‌برد مقایسه شده‌است. در این پروژه ابتدا یک میله سوخت حلقوی با قابلیت خنک‌شوندگی داخلی و خارجی فرض شده و سپس، برای اینکه ملاحظات و ایمنی‌های نوترونیک رعایت شود طول گام مناسب این نوع میله سوخت در مجتمع‌های سوخت یک راکتور SMR به‌دست آورده شد. بدین منظور راکتور مورد نظر را در شرایط قلب پاک در نظر گرفته شده و با استفاده از کدهای محاسبات نوترونیکی WIMS و CITATION طول گام میله‌های سوخت با در نظر گرفتن ملاحظات نوترونیک و ایمنی طراحی گردید [۲].

1 National Atomic Energy Commission (CNEA)

2 Integrated Pressurized Water Reactor

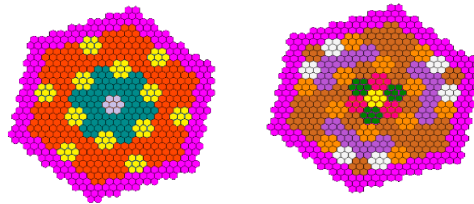
3 Self pressurized

4 Small Modular Reactors

5 Departure from Nucleate Boiling Ratio

۲. روش کار

در این پژوهش ابتدا مجتمع‌های سوخت راکتور CAREM مورد نظر در حالت Cold & Clean در کد WIMS شبیه‌سازی شد و سپس سطح مقطع‌های به دست آمده از این کد به عنوان ورودی برای کد CITATION در نظر گرفته شد و کل قلب در این کد مدل‌سازی گردید (شکل ۱)، پس از آن، با اجرای این کد، ضریب تکثیر موثر برای راکتور در همان شرایطی که راکتور کار می‌کند به دست آمد. در ادامه با تغییر گام شبکه^۱، برای چندین گام متفاوت، شبیه‌سازی‌ها در کدهای ذکر شده انجام شد و ضریب تکثیر موثر برای هر گام به دست آمد.



(ب)

(الف)

شکل ۱. الف) شبیه‌سازی قلب راکتور CAREM با سوخت توپُر و ورود ۳۵٪ میله کنترل (مجتمع قهوه‌ای با ۶ میله جاذب سوخت، مجتمع سفید و زرد بدون میله جاذب، مجتمع نارنجی با ۱۲ میله جاذب سوخت، مجتمع بنفش و سبز با وجود ۱۸ میله کنترل، مجتمع صورتی با وجود ۱۲ میله کنترل)

ب) شبیه‌سازی قلب راکتور CAREM با سوخت حلقوی و بدون میله کنترل (مجتمع زرد با ۱۲ میله جاذب سوخت، مجتمع سبز با ۶ میله جاذب سوخت، مجتمع قرمز و یاسی مجتمع سوخت بدون میله جاذب سوخت)

با انجام محاسبات نوترونیکی برای راکتور مد نظرمان، در شرایط قلب پاک مقدار ضریب تکثیر موثر آن از کد CITATION محاسبه گردید. برای به دست آوردن طول گام مناسب میله‌های سوخت جدید، چندین بار با طول گام‌های مختلف با در نظر گرفتن شرط Under moderated بودن راکتور، شبیه‌سازی و محاسبات نوترونیکی آن انجام گردید و ضریب تکثیر موثر هر طول گام به دست آورده شد. با استفاده از ضریب تکثیرهای موثر به دست آمده برای هر شعاع داخلی، راکتیویته‌ی اضافی مربوط به آن ضریب تکثیر موثر هر شعاع داخلی را نیز می‌توان بدست آورد. جدول ۱ گام شبکه، ضریب تکثیر موثر و راکتیویته‌ی اضافی برای هر شعاع داخلی که با چیدمان مشخص و مربوط به خود به منظور برقراری شرط بحرانیات راکتور طراحی شده است را نشان می‌دهد.

¹ Pitch

² Cold and Clean

جدول ۰۱. گام شبکه، ضریب تکثیر موثر و راکتیویته اضافی قلب راکتور برای هر شعاع داخلی با چیدمان متناسب به خود

راکتیویته اضافی	ضریب تکثیر موثر	گام شبکه (cm)	شعاع داخلی (mm)
0/173827	1/2104	1/۰۸	1/5
0/18354	1/2248	1	1/7
0/161131	1/192081	0/95	2/2
0/19859	1/2478	0/95	2/5
0/1741	1/2108	1/2	2/7
0/213032	1/2707	1/38	3
0/173604	1/210073	1/38	3/2
0/190098	1/234717	1/38	3/5
0/186902	1/229864	1/38	3/7
0/163738	1/195798	1/9	4
0/176461	1/214271	1/9	4/2
0/187345	1/230534	1/9	4/5
0/۱۹۴۰۸۷	1/۲۴۰۸۳۰	1/9	4/7
0/۲۰۳۰۵۵	1/۲۵۴۷۹۳	1/9	5

برای به دست آوردن فاکتور بیشینه‌ی قدرت^۱ شعاعی و محوری، در گام‌های شبکه‌ی به دست آمده برای هر شعاع داخلی طراحی شده، در کل قلب مورد نظر به کمک کدهای هسته‌ای WIMS و CITATION در حالت Full power مدل شد و با استفاده از خروجی کد CITATION، فاکتور بیشینه‌ی قدرت شعاعی و محوری محاسبه شد. پارامترهای نوترونیکی که از این مدلسازی‌ها به دست آمدند عبارتند از فاکتور بیشینه‌ی قدرت شعاعی و محوری که از حاصل ضرب این دو به فاکتور بیشینه‌ی قدرت می‌رسیم که تمام این پارامترها را برای این مدلسازی‌ها با شعاع‌های داخلی مختلف در جدول ۲ آورده شده‌اند.

جدول ۰۲. فاکتور بیشینه‌ی قدرت شعاعی، محوری و فاکتور بیشینه‌ی قدرت قلب راکتور برای هر شعاع داخلی

شعاع داخلی (mm)	فاکتور بیشینه‌ی قدرت شعاعی	فاکتور بیشینه‌ی قدرت محوری	فاکتور بیشینه‌ی قدرت
1/5	۱/۳۸	۱/۳۱	۱/۸۲
1/7	۱/۳۲۶	۱/۳۱۷	۱/۷۳۸۴
2/2	۱/۲۹	۱/۳۲	۱/۷۱۵
2/5	۱/۳۳۸	۱/۳۲	۱/۷۷
2/7	۱/۵۹۶۹	۱/۳۳۰۵	۲/۱۲
3	۱/۸۳۳۵	۱/۳۱۳۰	۲/۴۱
3/2	۱/۴۳۸۲۸	۱/۳۱۴۰۷	۱/۸۹۰۰۱
3/5	۱/۶۱۷۴	۱/۴۲۲۲۱	۲/۳۰۰۲۷
3/7	۱/۵۲۴۵۴	۱/۴۱۹۵	۲/۱۶۴۰۸
4	۱/۵۲۷۹۷	۱/۳۰۹۶۷	۲/۰۰۱۱۴
4/2	۱/۴۹۶۵۸	۱/۳۰۵۵۱	۱/۹۵۳۸۱
4/5	۱/۵۲۶۳۷	۱/۳۰۸۵۶	۱/۹۹۷۳۵
4/7	۱/۵۴۷۲۱	۱/۳۱۱۷۴	۲/۰۲۹
5	۱/۵۸۱۲۶	۱/۳۱۵۸۲	۲/۰۸

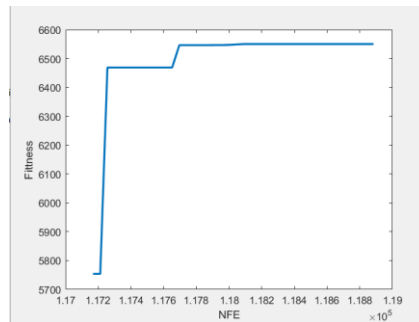
برای تحلیل ترموهیدرولیکی قلب راکتور، در محاسبات نوترونیکی صورت گرفته کانال داغ^۲ (جایی که بیشینه PPF شعاعی رخ داده است) پیدا شد و ابعاد سلول معادل برای میله سوخت مورد نظر توسط گام شبکه در آن کانال داغ برای هر شعاع داخلی مورد نظر به دست آمد. پس از مشخص شدن کانال داغ، از خروجی کد CITATION مقدار q_{max}''' در آن کانال به دست آمد و با استفاده از آن، Source term لازم برای سوخت، به عنوان UDF برای هر شعاع داخلی سوخت

¹ Power Peaking Factor

² Hot Channel

حلقوی نوشته شد و به صورت ورودی به نرم‌افزار Fluent داده شد. هدف از این پژوهش به دست آوردن بهترین شعاع داخلی سوخت با توجه به نتایج حاصل شده از تحلیل نوترونیکی و ترموهیدرولیکی است. برای رسیدن به این هدف از شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. از پارامترهای حاصل شده از تحلیل‌ها، پنج پارامتر به منظور بهینه‌سازی در قالب بیشینه نمودن تابع هدف^۱ رابطه ۱ در نظر گرفته شدند که این پارامترها و مقدار آن‌ها در جدول ۳ آورده شده‌اند.

$$Fitness - Function = \frac{(w_1(\rho_{excess}))^2 + (w_2(MDNBR))^2 + (w_3h)^2 + (w_4(V_{out} - V_{in}))^2}{(w_5(PPF_{radial}))^2 + (w_6(PPF_{axial}))^2 + (w_7\Delta P)^2 + (w_8\frac{V_{max}}{V_{avg}})^2} \quad (1)$$



شکل ۲. چگونگی بیشینه شدن تابع برازندگی برحسب تعداد فراخوانی تابع در شعاع داخلی و خارجی بهینه

جدول ۳. پارامترهای نوترونیکی و ترموهیدرولیکی استفاده شده جهت بهینه‌سازی شعاع‌های داخلی و مقدار آن‌ها

V_{max}/V_{avg}	$V_{out} - V_{in}$	h	ΔP	MDNBR	شعاع داخلی
1/14185	0/009748	4806/95	-39681/9	۱/۸۸	CAREM
1/063876	0/024067	12786/21	-42422/3	۱/۷۵	۱/۵
1/070157	0/017692	22015/4۵	-42822/1	۲/۲۵	۱/۷
1/102949	0/010855	8685/424	-43451	۳	۲/۲
1/099397	0/00084	7721/96	-43790/5	۳/۸	۲/۵
1/111287	0/012988	7261/234	-42803/3	۳/۲	۲/۷
1/090316	0/017328	7244/441	-42393/8	۲/۷۵	۳
1/112464	0/018736	6845/505	-42439/9	۲/۸	۳/۲
1/089738	0/010632	6269/897	-43213/8	۳/۸	۳/۵
1/106497	0/012606	6755/026	-42919/4	۲/۶۵	۳/۷
1/136463	0/039817	7846/056	-41343/8	۱/۷۷	۴
1/147886	0/035303	7501/413	-41534/3	۱/۸۳	۴/۲
1/119601	0/032915	6830/365	-41556/7	۱/۸۴	۴/۵
1/132615	0/031327	6672/727	-41639/4	۱/۸۷	۴/۷
1/123835	0/028333	6182/22	-41782/6	۱/۹۳	۵

^۱ Fitness-Function

با اجرای الگوریتم ژنتیک شعاع داخلی و خارجی بهینه برای قلب راکتور CAREM به صورت زیر به دست آمد.

جدول ۴. شعاع داخلی و خارجی بهینه سوخت برای قلب راکتور CAREM

مقدار بهینه	شعاع داخلی سوخت (cm)	شعاع خارجی سوخت (cm)	گام شبکه (cm)
	۰/۳۴۸۸	۰/۷۳۶۵	۱/۶۵۱۲

شبکه عصبی مصنوعی متصل شده به الگوریتم ژنتیک، پارامترهای مربوط به این شعاع داخلی و خارجی بهینه‌ی حاصل شده را به صورت زیر به دست آورد.

جدول ۵. پارامترهای مربوط به شعاع داخلی و خارجی بهینه از شبکه عصبی

ρ_{excess}	MDNBR	h	$V_{\text{out}}-V_{\text{in}}$	PPF rad	PPF axe	ΔP	$V_{\text{max}}/V_{\text{avg}}$
0/۱۶۹۵۷	2/58096	6939/27	0/022313	1/658951	1/360202	-43667/9	1/124469

در ادامه برای اعتبارسنجی شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده و همچنین بررسی قلب راکتور با سوخت حلقوی بهینه به دست آمده با مدل سازی مجدد به بررسی نوترونیکی و ترموهیدرولیکی قلب راکتور در این شعاع، پرداخته شد و مقایسه‌ی این دو حالت در جدول ۶ بیان شده‌است.

جدول ۶. اعتبارسنجی مدل سازی و شبکه عصبی مصنوعی ایجاد شده برای سوخت حلقوی بهینه

$V_{\text{max}}/V_{\text{avg}}$	$V_{\text{out}}-V_{\text{in}}$	ρ_{excess}	MDNBR	h	PPF axe	PPF rad	ΔP	
1/124469	0/022313	۰/۱۶۹۵۷	2/58	6939/27	1/360	1/65	43667/9	شبکه
۱/۱۴۳۱۵۳	۰/۰۳۹۱۸۴	۰/۱۵۷۳۱	۲/۳	۷۵۳۷/۶۸۳	۱/۳۰۹۶۱	۱/۵۵۴۰۷	۴۱۸۷۰/۲۷۳۱	شبیه سازی
1/63%	7/9%	7/2%	10/8%	7/9%	3/71%	6/31%	4/1%	خطای شبکه

جدول ۷. مقایسه راکتور طراحی شده با شعاع بهینه با راکتور CAREM با توجه به پارامترهای محاسبه شده

$V_{\text{max}}/V_{\text{avg}}$	$V_{\text{out}}-V_{\text{in}}$	ρ_{excess}	MDNBR	h	PPF axe	PPF rad	ΔP	نوع قلب طراحی شده
1/14185	0/009748	0/21875	1/88	4806/95	1/4	1/675057	39681/9	قلب راکتور CAREM
۱/۱۴۳۱۵	۰/۰۳۹۱۸۴	۰/۱۵۷۳۱	۲/۳	۷۵۳۷/۶۸۳	۱/۳۰۹۶۱	۱/۵۵۴۰۷	۴۱۸۷۰/۲۷۳۱	قلب طراحی شده با شعاع بهینه

۳. نتیجه گیری

در نهایت پس از به دست آمدن شعاع داخلی و خارجی بهینه، به بررسی قلب راکتور با استفاده از این سوخت حلقوی با شعاع‌های بهینه‌ی حاصل شده و مقایسه آن با قلب راکتور CAREM پرداخته شد. مشاهده گردید که پارامتر ضریب انتقال حرارت جابه جایی سیال در این حالت برابر $۷۵۳۷/۶۸۳$ بوده که با توجه به ضریب انتقال حرارت جابه جایی سیال که مقدار آن $۴۸۰۶/۹۵$ محاسبه شده، در این پارامتر بهبود حاصل شد. پارامتر MDNBR در قلب با سوخت حلقوی با شعاع بهینه، $۲/۳$ محاسبه شد، این پارامتر در قلب راکتور CAREM $۱/۸۸$ به دست آمده بود که با این حساب، با افزایش MDNBR قلب طراحی شده نسبت به قلب راکتور CAREM، ایمنی قلب از این لحاظ افزایش داشت همچنین افزایش پارامترهای گردش طبیعی سیال نشان از بهبود این ویژگی راکتور هستند. افت فشار سیال در ارتفاع قلب تفاوت چندانی نداشتند (تفاوت به اندازه‌ی $۰/۰۰۲۱۸۸$ مگاپاسکال) اما فاکتور بیشینه توزیع قدرت شعاعی، بیشینه توزیع قدرت محوری

در قلب طراحی شده نسبت به قلب راکتور CAREM کاهش محسوسی داشت. در قلب طراحی شده با سوخت حلقوی با شعاع بهینه، این فاکتورها به ترتیب برابر $۱/۵۵۴۰۷$ و $۱/۳۰۹۶۱$ محاسبه شد که در مقایسه با مقدار $۱/۶۷۵۰۵۷$ و $۱/۴$ برای قلب راکتور CAREM مقدار کمتری است و همین کاهش می‌تواند به افزایش ایمنی و کارایی قلب کمک کند.

۶. مراجع

- [1]] TOHN R.LAMARSH, "Introduction to Nuclear Engineering", *Polytechnic Institute of New York*. 3th edition, 524-547. (2001).
- [2] Fukami M.V., Santecchia A. "CAREM project: innovative small PWR". *Progress Nuclear Energy*, 37, 265–270. (2000).
- [3] Villarino, E., Hergenreder D., Matzkin, S., COMPORTAMIENTO NEUTRONICO DEL NÚCLEO DEL REACTOR CAREM 25, *Moreno 1089/ 8400 Bariloche – Argentina*.
- [4] Tashakor. S., Zarif. E., Naminazari. M., Neutronic simulation of CAREM-25 small modular reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 185-195. (20017).
- [5] Zaidabadi Nejad. M., Ansarifar. G.R., Optimal design of a Small Modular Reactor core with dual cooled annular fuel based on the neutronics and natural circulation parameters, *Nuclear Engineering and Design*, 360. (2020).