تعیین استراتژی بلند مدت مدیریت سوخت قلب راکتورهای تحقیقاتی با استفاده از بسته کد های محاسباتی MTR-PC

افشین هدایت

سازمان انرژی اتمی ایران – پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای – پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای

چکیده:

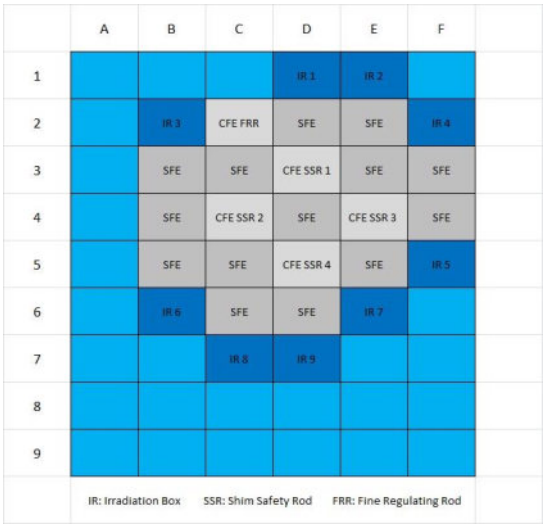
در این پژوهش سعی در ارایه یک استراتژی بلند مدت (دوره ای) مدیریت سوخت در راکتورهای تحقیقاتی، شده است. شیوه مذکور شامل تعیین پارامترهای کاری سیکل تعادلی، تعیین تقریبی تعداد سوخت های مورد نیاز، فراهم کردن شرایط تعادلی ایده ال، ساده سازی و تقریب سریع استراتژی تعادلی، مدل سازی عملیات سوخت گذاری و جابجایی مجموعه‌های سوخت، تحلیل شرایط واقعی (نیمه تعادلی)، و نیز بررسی رعایت شرایط حدود کاری و ایمنی قلب راکتور قبل از شبیه سازی کامل و نهایی استراتژی مدیریت سوخت می باشد. بررسی نتایج نشان‌دهده کارایی الگوهای ارایه شده در دو نوع راکتور تحقیقاتی تهران و راکتور با تانک آب سنگین MW ۲۰ می‌باشد.

کلید واژه: *راکتورهای تحقیقاتی، مدیریت سوخت، قلب تعادلی، MTR، MTR-PC.*

۱. مقدمه:

مدیریت سوخت یا مدیریت قلب راکتور، به مجموعه عملیات مرتبط با بار گذاری، جابجایی و خارج سازی مجموعه های سوخت در داخل قلب راکتور اتلاق می شود؛ به گونه ای که شرایط مطلوب کاری و راکتور فراهم شود [۱و۲]. همچنین به مجموعه کل انتخاب هایی که برای مدیریت سوخت طی سیکل های متوالی اتخاذ می شود؛ استراتژی مدیریت سوخت گفته می شود. به منظور برآورده سازی مجموعه شرایط مطلوب کاری ضمن رعایت حدود ایمنی و کاری راکتور توسط چیدمان قلب راکتور دو راهکار متمایز قابل استفاده خواهد بود [۳و٤ و٥]. در این تحقیق هدف تعیین یک چیدمان سیکل تعادلی و زنجیره های تکرار پذیر جابجایی سوخت به منظور بر آورده سازی شرایط یکسان و تکرار پذیر تعادلی طولانی مدت قلب راکتور نظیر طول سیکل و شار نوترونی ثابت مورد نیاز جهت فعالیت‌های پرتودهی مورد نیاز می‌باشد. به طور متداول سیکل های تعادلی راکتور های تحقیقاتی توسط زنجره های جابجایی سوخت با تعویض یک تا چند مجموعه سوخت از خارج به داخل قلب انجام می شود [٤ و٥و٦].

۲. راکتور مبنا و اعتبار سنجی محاسبات:



در این تحقیق از راکتور تحقیقاتی تهران [٤] به عنوان راکتور مبنای محاسبات، و نیز از الگوی مدیریت سوخت پایه آن به منظور سنجش مدل های ارائه شده محاسباتی با استفاده از بسته کد های محاسباتی[۷] MTR-PC استفاده شده است. اولین آرایش قلب با غنای پایین (LEU) ، راکتور تحقیقاتی تهران به منظور اعتبار سنجی اولیه محاسبات انتخاب شد (شکل ۱). جدول ۱ نشاندهنده نتایج شبیه سازی موقعیت اولیه بحرانی قلب راکتور می باشد.

شکل ۱ – آرایش اولین قلب با غنای پایین راکتور تحقیقاتی تهران

جدول ۱– نتایج محاسبه راکتیویته اولین قلب با غنای پایین با فرض موقعیت میله های کنترل در اولین حالت بحرانی

Parameters :	*Control Rod:*	*SSR1*	*SSR2*	*SSR3*	*SSR4*	*FRR*
	Extracting Percent:	*% 42*	*% 55*	*% 55*	*% 55*	*% 42*
K_{eff} (Cold & Clean)				1.00006		
Reactivity (Cold & Clean)				+6.1 pcm		

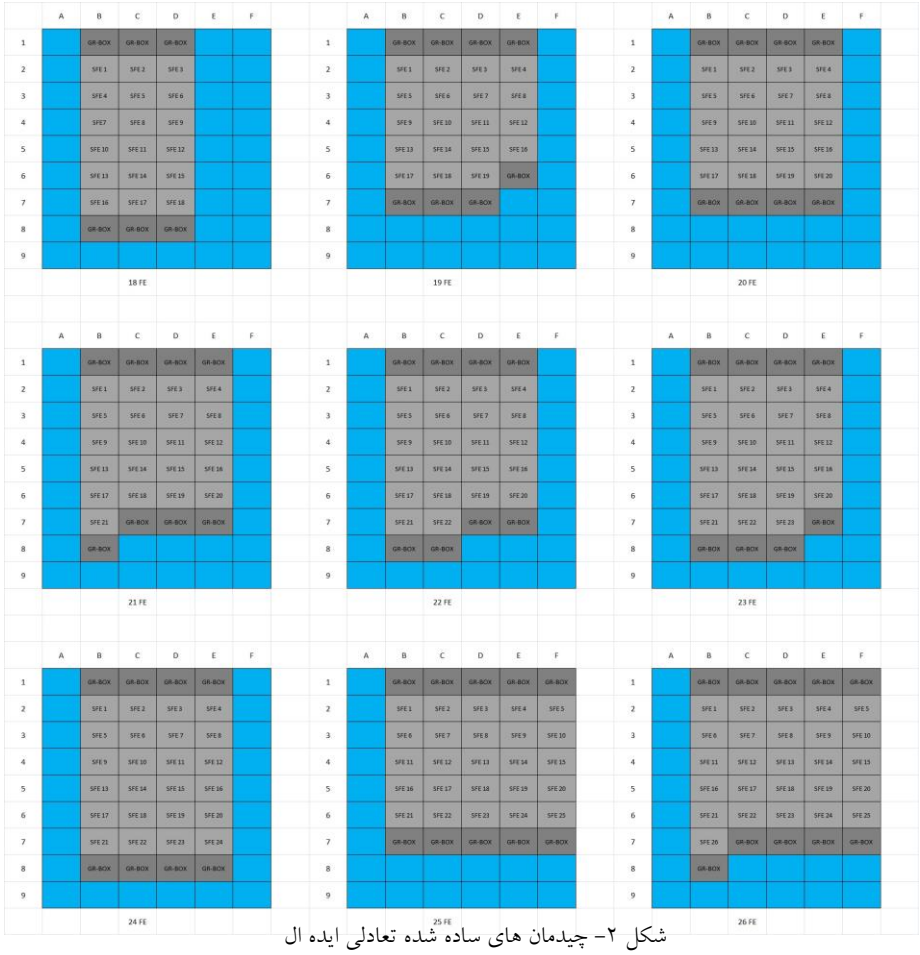
۳. تخمین تقریبی تعداد مجموعه های سوخت لازم جهت حصول شرایط تعادلی ایده ال:

کد محاسباتیCITVAP امکان جستجوی سریع شرایط تعادلی بدون باز محاسبه شار نوترونی در طی مراحل محاسبه را دارا می باشد [۸]. در این تحقیق، هر دو پارامتر تعداد مجموعه های سوخت لازم و نیز طول سیکل تعادلی به منظور دستیابی به مقادیر تعادلی مطلوب دو پارامتر برن آپ سوخت خروجی ونیز راکتیویته انتهای سیکل جستجو و بررسی شده است. سه شرط ذیل جهت حصول شرایط تعادلی در راکتور تحقیقاتی تهران انتخاب شده است: *الف*– برن آپ خروجی تقریبا ۵۰٪؛ ب– حداقل راکتیویته افزوده pcm ۲۳۰۰ در انتهای سیکل؛ ج – طول سیکل دوره ای که باید تقریبا ثابت و مطلوب باشد (حداقل دو هفته). این تقریب بر مبای الگوی ساده شده قلب با سوخت استاندارد (شکل ۲) و مدل سازی زنجیره های خارج به داخل در شرایط تعادلی ایده ال (جدول ۲)، انجام شد.

جدول ۲– زنجیره های جابجایی سوخت ایده ال یگانه

18 FE (≈ 14 SFE + 5 CFE)	FE Refueling Scheme : Fresh → 1 → 3 → 18 → 16 → 6 → 15 → 13 → 4 →2 → 9 → 12 → 17 → 10 → 7 → 5 → 14 → 11 → 8 → Discharged
19 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 1 → 4 → 17 → 8 → 16 → 13 → 5 → 2 → 3 → 12 → 19 → 18 → 9 → 6 → 7 → 15 → 14 → 10 → 11 Discharged
20 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 1 → 4 → 20 → 17 → 8 → 16 → 13 → 5 → 2 → 3 → 12→ 19 → 18 → 9 → 6 → 7 → 15 → 14 → 10 → 11 → Discharged
21 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 21 → 1 → 4 → 20 → 17 → 8 → 16 → 13 → 5 → 2 → 3 → 12→ 19 → 18 → 9 → 6 → 7→ 15 → 14 → 10 → 11 → Discharged
22 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 22 → 21 → 1 → 4 → 20 → 17 → 8 → 16 → 13 → 5 → 2 → 3 → 12 → 19 → 18 → 9 → 6 → 7 → 15 → 14 → 10 → 11 → Discharged

23 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 23 → 22 → 21 → 1 → 4 → 20 → 17 → 8 → 16 → 13 → 5 → 2 → 3 → 12→ 19 → 18 → 9 → 6 → 7 → 15 → 14 → 10 → 11 → Discharged
24 FE	FE Refueling Scheme : Fresh → 1 → 4 → 24 → 21 → 5 → 8 → 20 → 17 → 2 → 3 → 12 → 16 → 23 → 22 → 13 → 9 → 6 → 7 → 19 → 18 → 10 → 11 → 15 → 14 → Discharged
25 FE (≈ 21 SFE + 5 CFE)	FE Refueling Scheme : Fresh → 1 → 5 → 25 → 21 → 2 → 3 → 4 → 10 → 15 → 20 → 24 → 23 → 22 → 16 → 11 → 6 → 7 → 8 → 9 → 14 → 19 → 18 → 17 → 12 → 13 → Discharged
26 FE (≈ 22 SFE + 5 CFE)	FE Refueling Scheme : Fresh → 26 → 1 → 5 → 25 → 21 → 2 → 3 → 4 → 10 → 15 → 20 → 24 → 23 → 22 → 16 → 11 → 6 → 7 → 8 → 9 → 14 → 19 → 18 → 17 → 12 → 13 → Discharged



شکل ۲- چیدمان های ساده شده تعادلی ایده ال

بررسی نتایج برای اثر تغییر تعداد مجموعه های سوخت مورد نیاز با فرض بدون بازتابنده و با بازتابنده و نیز بررسی اثر تغییر طول سیکل ثابت تعادلی ایده ال انجام شد. نتایج نشان داد، بهترین انتخاب تعداد مجموعه های سوخت (با فرض وجود ۵ مجموعه سوخت کنترل) تعداد ۲۲ تا ۲۳ مجموعه سوخت استاندارد وابسته به استفاده از بازتابنده ؛ و نیز طول سیکل تعادلی ما بین ۲۰ تا ۲٤ روز جهت وجود حداقل راکتیویته افزوده مورد نیاز در انتهای سیکل خواهد بود.

٤. شبیه سازی سریع استراتژی مدیریت سوخت در حالت تعادلی:

این کار با انتخاب زنجیره های جابجایی سوخت پایه (جدول ۳) برای قلب تعادلی با غنای پایین راکتور تحقیقاتی تهران (شکل ۳) با ساده سازی در حذف سیکل های گذار به تعادل (سیکل های ۱ – ۱۹) و نیز فرض شرایط تعادلی ایده ال انجام شد.

	A	B	C	D	E	F
1	GR BOX	GR BOX	GR BOX	GR BOX	GR BOX	GR BOX
2	1.21E+04	6.19E+04	3.46E+04	3.50E+03	4.92E+04	9.92E+03
3	3.78E+04	5.08E+04	7.94E+04	4.06E+04	5.77E+04	2.37E+04
4	5.06E+04	5.47E+04	6.77E+04	7.39E+04	3.89E+04	6.19E+04
5	2.49E+04	6.40E+04	2.11E+04	7.66E+04	2.28E+04	8.08E+03
6	IR BOX 1	5.14E+03	1.89E+04	IR BOX 2	3.62E+04	IR BOX 3
7		GR BOX	IR BOX 4		GR BOX	
8						
9						

شکل ۳ – آرایش قلب تعادلی ایده ال راکتور تحقیقاتی تهران

جدول ۳– زنجیره های جابجایی سوخت پایه با غنای پایین

Refueling Chain	Refueling Pattern
SFE - chain 1	Fresh SFE → A2 → A5 → A3 → A4 → B5 → C3 → Discharged
SFE - chain 2	Fresh SFE → F2 → F3 → E6 → E2 → F4 → D5 → Discharged
SFE - chain 3	Fresh SFE → F5 → E5 →D3 →E3 → D4 → Discharged
SFE - chain 4	Fresh SFE → B6 → C6 → C2 → B3 → C4 → Discharged
CFE - chain 1	Fresh CFE → D2 → C5 → B2 → Discharged
CFE - chain 2	Fresh CFE → D2 → C5 → B4 → Discharged
CFE - chain 3	Fresh CFE → D2 → C5 → E4 → Discharged

جداول ٤ و ٥ به ترتیب نشاندهنده نتایج محاسبات ساده شده بدون تعریف سیکل های گذار و مقادیر نوترونی اولین قلب تعادلی راکتور تهران می باشد.

جدول 4 – پارامترهای نوترونی قلب تعادلی ایده ال با حذف سیکل های گذار

State	T_c *(days)*	K_{eff}	*Reactivity (pcm)*	*PPF*	*Average burn up (MWD/T)*	*(%)*	*Maximum burn up (MWD/T)*	*(%)*
BOC	21	1.03460	3343.9	2.47	36051	22.29	73569	45.48
EOC		1.02773	2698.6	2.47	38883	24.04	76554	47.32
BOC	21.8	1.03067	2975.3	2.48	37520	23.19	76296	47.16
EOC		1.02347	2293.5	2.48	40460	25.01	79366	49.06
BOC	22	1.02967	2881.3	2.48	37889	23.42	76959	47.57
EOC		1.02240	2190.5	2.48	40856	25.26	80051	49.49

جدول ٥ – پارامترهای نوترونی اولین سیکل تعادلی قلب راکتور تحقیقاتی تهران [٤] با غنای پایین (سیکل ۱۹)

Parameters	K_{eff}	*Reactivity (pcm)*	*PPF*	*Maximum Burn up (%)* *SFE*	*CFE*	*Cycle length (Days)*
BOC	1.03131	3037	2.78	43	44.4	22
EOC	1.02354	2300	2.81	44.9	45.8	

نتایج نشاندهنده تقریب بسیار مناسبی از سیکل تعادلی ایده ال می باشد؛ به طوری که تقریب محاسبات کمتر از یک روز در محاسبه طول سیکل تعادلی است. به منظور بررسی رفتار نیمه تعادلی قلب، پارامترهای نوترونی قلب در هر یک از سیکل های تعادلی زیر مجموعه محاسبه شد (جدول ٦).

جدول ٦ – پارامترهای نوترونی در حالت ابتدای هر یک از سیکل های زیر مجموعه

Category	*Sub cycles*	*Refueling chains*	K_{eff}	*Reactivity (pcm)*	*Average burn up (MWD/T)*	*(%)*	*Maximum burn up (MWD/T)*	*(%)*
Group A	1	SFE - chain 1	1.02984	2897.8	37351	23.09	76714	47.42
Group A	2	SFE - chain 2	1.02864	2783.8	37167	22.98	76502	47.29
Group A	3	SFE - chain 3	1.03087	2994.3	36983	22.86	73929	45.70

Group A	4	SFE - chain 4	1.03170	3072.7	36894	22.81	74856	46.27
Group A	5	CFE - chain 1	1.02914	2831.8	37762	23.34	77906	48.16
Group B	6	SFE - chain 1	1.02847	2767.8	37530	23.20	76738	47.44
Group B	7	SFE - chain 2	1.02722	2649.6	37345	23.09	76629	47.37
Group B	8	SFE - chain 3	1.02939	2855.3	37157	22.97	75384	46.60
Group B	9	SFE - chain 4	1.03023	2934.2	37076	22.92	78198	48.34
Group B	10	CFE - chain 2	1.02985	2898.4	37673	23.29	77905	48.16
Group C	11	SFE - chain 1	1.02928	2844.7	37441	23.14	76785	47.47
Group C	12	SFE - chain 2	1.02794	2718.2	37255	23.03	76616	47.36
Group C	13	SFE - chain 3	1.03003	2915.3	37067	22.91	75540	46.70
Group C	14	SFE - chain 4	1.03093	3000.4	36986	22.86	78417	48.48
Group C	15	CFE - chain 3	1.03058	2967.6	37577	23.23	77734	48.05

جدول ۷ – توزیع محوری میزان مصرف سوخت خروجی

Ave. over axial seg. from the top	*Fuel Burn up (MWD/T)*	*Fuel Burn up (%)*
1	5.27E+04	32.59
2	6.37E+04	39.37
3	7.64E+04	47.20
4	8.45E+04	52.25
5	8.85E+04	54.71
6	8.86E+04	54.78
7	8.48E+04	52.45
8	7.68E+04	47.50
9	6.42E+04	39.70
10	5.33E+04	32.92

محاسبات در حالت سه بعدی تکرار شد؛ که مقادیر پیشین راکتیویته افزوده در حالت ابتدا و انتهای سیکل تعادلی با فرض طول سیکل 20/2 روزحاصل شد. مقدار متوسط برن آپ خروجی در حالت سه بعدی برابر ٪ ٤٥,٣٥ مصرف سوخت می باشد.

۵. بررسی شرایط و حدود کاری ایمنی قلب راکتور:

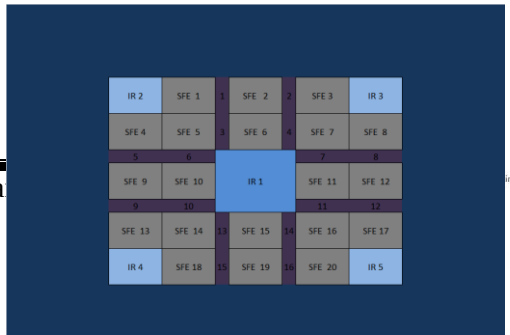
استراتژی مدیریت سوخت در هر یک از مراحل سوخت گذاری، راه اندازی و کاری راکتور باید متضمن رعایت حاشیه های ایمنی راکتور باشد. این محاسبات پس از تهیه کتابخانه ماکروسکوپیکی بر حسب میزان سوخت مصرفی (در حالت سرد بدون زینان)، با استفاده از مدل سازی سه بعدی میله های کنترل انجام شد.

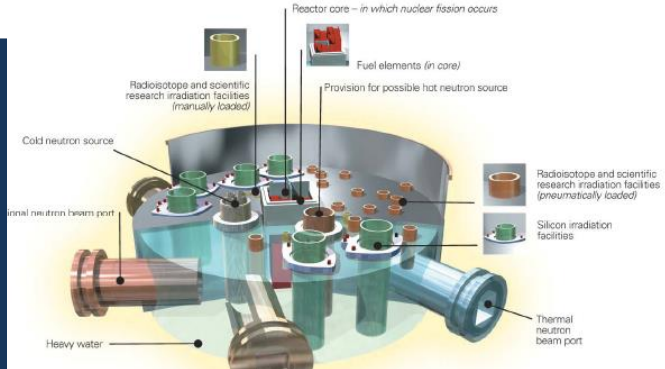
جدول ۸– بررسی شروط ایمنی برای قلب تعادلی

Neutronic Parameters	*Calculated Parameters*	*Safety limit*
Shutdown Margin (pcm)	6984 pcm	> 3000
Reactivity at 30% extraction (pcm)	-2894 pcm	Sub Critical
Total Power Peaking Factor (PPF)	2.36	< 3.0
Safety Reactivity Factor (SRF)	2.1	> 1.5
Reactivity worth of the FRR	412 pcm	< 800 pcm
Maximum Extracting Burn up	45.35 %	< % 50
Maximum local burn up (Axial Distribution)	55 %	-

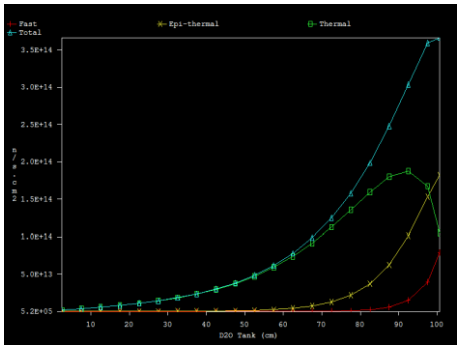
٦. تعیین مشخصه های کاری سیکل تعادلی در یک راکتور MW ۲۰

نسل جدید راکتورهای تحقیقاتی شامل راکتورهای نوع MTR با خنک کننده اب سبک و تانک آب سنگین با توان متوسط بالاتر از MW ۲۰ (شکل ٤) می باشند. بررسی رفتار تعادلی قلب یک راکتور تحقیقاتی چندمنظوره (شکل ٥)، توسط مجموعه‌های سوخت راکتور OPAL از نوع U_3Si_2 باغنای ٪۲۰ U^{235}، انجام شد. از جمله مزایای استفاده از تانک آب سنگین: افزایش راکتیویته راکتور به میزان تقریبی ٦۰۰۰pcm ، سیستم خاموش سازی ثانویه، و بهبود چشمگیر شار نوترون های حرارتی در ناحیه آب سنگین می‌باشد (شکل ٦). مشخصه های تعادلی قلب مذکور در جدول ۹ ارائه شده است.

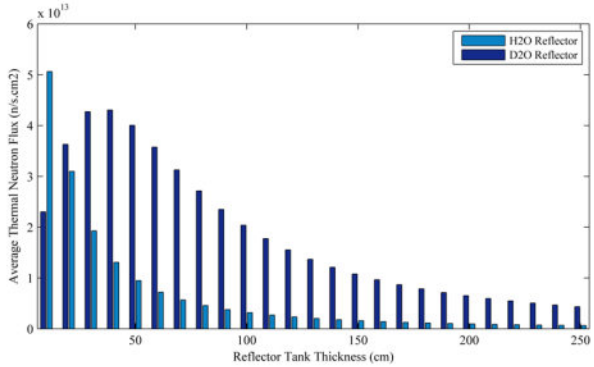




شکل ٤ – نمونه ای از یک راکتور تحقیقاتی چند منظوره (OPAL)



شکل ٥ – چیدمان یک راکتور تحقیقاتی چند منظوره (IR20)



شکل ٦- توزیع شار نوترونی در ناحیه تانک آب سنگین

جدول ۹- مشخصه های تعادلی یک راکتور ۲۰ MW

Fresh Feed FE	Refueling pattern	Average Burn up (EOC)		Discharging Burn up (EOC)		ρ_{BOC} (pcm)	ρ_{EOC} (pcm)	T_C (Days)
		(MWD/T)	(%)	(MWD/T)	(%)			
4	Chain 1: 1→ 4→5→10→2 Chain 2: 18→13→14→15→ 9 Chain 3: 17→20→16→11→19 Chain 4: 3→ 8→7→6→12	5.6727E+04	33.38	9.2181E+04	54.2	6979.3	2286.3	44

۷. بحث و تحلیل نتایج:

در این تحقیق، مجموعه هایی از الگوهای محاسباتی و تحلیلی تعیین استراتژی مدیریت سوخت دوره ای در راکتورهای تحقیقاتی ارائه شد. اعتبار سنجی داده ها و کد های محاسباتی مورد استفاده، الگوهای محاسباتی قلب راکتور، محاسبات مصرف سوخت، و نیز شبیه سازی عملیات تعویض سوخت دوره ای بر مبنای راکتور تحقیقاتی تهران و یک راکتور تحقیقاتی چندمنظوره 20 MW، انجام شد. بررسی نتایج نشان‌دهنده تقریب بسیار مناسب پارامترهای قلب تعادلی، ضمن تسریع موثر روند محاسبات و تحلیل نتایج می باشد.

فهرست منابع:

1- IAEA Safety Standards Series No. NS-G-4.3, 2008. Core Management and Fuel Handling for Research Reactors. Safety Guide, International Atomic Energy Agency, Vienna.
2- IAEA Safety Standards Series No. NS-G-4.4, 2008. Operational Limits and Conditions and Operating Procedures for Research Reactors. Safety Guide, International Atomic Energy Agency, Vienna.
3- Hedayat, A., Davilu H., Abdollahzadeh Barfrosh, A., Sepanloo, K., 2009. Optimization of the core configuration design using a hybrid artificial intelligence algorithm for research reactors. Nuclear Engineering and Design, V. 239 , 2786–2799.

4- FSAR for TRR, 2009. Final Safety Analyses Report for Tehran Research Reactor. Atomic Energy Organization of Iran, Tehran.
5- Villarino, E. A., and Padilla, A. G., 2011. Core Performance Improvement Using U3Si2-Al Fuel in the RP-10 Modernization. RERTR 2011 — 33rd INTERNATIONAL MEETING ON REDUCED ENRICHMENT FOR RESEARCH AND TEST REACTORS, October 23-27, 2011 Marriott Santiago Hotel Santiago, Chile.
6- IAEA Proceeding Series, 2005. Research reactor utilization, safety, decommissioning, fuel and waste management. Proceedings of an international conference, 10–14 November 2003, Santiago, Chile.
7- MTR-PC V. 3.0, 2006. Neutronic, Thermal hydraulic and shielding, Calculations on Personal Computers. Nuclear Engineering Division, INVAP.
8- CITVAP V. 3.1 user manual, 2006. CITVAP V. 3.1 Reactor Calculation Code. Nuclear Engineering Division of the INVAP S. E.