



## بررسی ایمنی ذاتی راکتور مینیاتوری اصفهان در حوادث ناشی از اعمال راکتیویته برای سوخت HEU فعلی و سوختهای LEU پیشنهادی توسط کد PARET

سعیده صفائی، حسین خلفی، سید محمد میروکیلی\*

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

### چکیده

به دنبال طرح آژانس بین المللی انرژی اتمی مبنی بر کاهش استفاده از سوختهای با غنای بالا (HEU) در راکتورهای هسته ای، طرح تبدیل سوختهای با غنای بالای مورد استفاده در راکتورهای مینیاتوری به سوختهایی با غنای پایین تر (LEU) مورد توجه قرار گرفته است. در راستای این هدف تحقیق حاضر به بررسی ایمنی ذاتی راکتور مینیاتوری اصفهان در شرایط ترانزینت ناشی از اعمال راکتیویته در دو حالت سوخت HEU موجود و نیز پس از تعویض سوخت فعلی با سوخت LEU با استفاده از کد PARET می پردازد. در این تحقیق پارامترهایی نظیر ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و خنک کننده و نیز نقطه آغاز جوشش هسته ای برای هر دو نوع سوخت در حادثه تزریق راکتیویته مورد بررسی قرار گرفته است.

**کلید واژه:** راکتور مینیاتوری، آنالیز ایمنی، تزریق راکتیویته، سوخت HEU، سوخت LEU.

### ۱. مقدمه

راکتور چشمه نوترون مینیاتوری (MNSR)، راکتور پیشرفته ای است از نوع تانک استخری آب سبک و با قدرت کم، که سوخت آن اورانیوم ۲/۹۰٪ غنی شده و بازتابنده آن فلز برلیوم می باشد. ایمنی ذاتی، فلاکس پایدار و سهولت کاربرد این راکتور، امکان بهره برداری از آن را در زمینه های مختلف صنعتی و تحقیقاتی فراهم آورده است. راکتور مینیاتوری دارای ویژگی ایمنی ذاتی است که بوسیله معیارهایی نظیر زیر کند کنندگی (Undermoderated) قلب راکتور، نرخ جریان پایین، ضریب راکتیویته دمایی سوخت و خنک کننده و راکتیویته اضافی محدود قلب ایجاد می شود. مشخصات قلب راکتور مینیاتوری اصفهان در جدول (۱) آورده شده است. به منظور اجرای طرح جایگزینی سوخت فعلی راکتور مینیاتوری اصفهان با سوختهای با غنای پایین تر دو نوع سوخت LEU با غنای ۱۲/۶٪ و ۱۲/۳٪ پیشنهاد شده است. در جدول (۲) پارامترهای اصلی قلب HEU فعلی با قلب های LEU پیشنهادی مقایسه شده اند.



جدول ۱- مشخصات راکتور مینیاتوری اصفهان

Parameter	value	
Ratio of hydrogen to U-235	۱۹۷	
Core dimension	Diameter (mm)	۲۳۰
	Height (mm)	۲۳۰
Fuel element	Type	UAl <sub>3</sub>
	Enrichment	۹۰،۲ %
	Density (g/cm <sup>3</sup> )	۳،۴۵۶
	Diameter (mm)	۴،۳
	Length (mm)	۲۳۰
	Uranium loading of each rod (g)	۳،۲۱۳۴
Number of fuel rod position	۳۵۴	
Number of fuel rod loaded	۳۴۳	
Cladding material	Al alloy ۳۰۱-۳-۱	
Cladding thickness (mm)	۰،۶	
Dummy element material	Al	
Numbers of dummy elements	۷	
Number of concentric circles on the grid	۱۰	
Pitch between circles(mm)	۱۰،۹۵	

جدول ۲- مشخصات قلب HEU فعلی و قلب های LEU پیشنهادی

Parameter	Existing HEU	Proposed LEU (۱۲،۶٪)	Proposed LEU (۱۲،۳٪)
Fuel rod diameter (mm)	۵،۵	۵،۵	۵،۱
Enrichment	۹۰،۲	۱۲،۶	۱۲،۳
Coolant inlet temperature (°C)	۲۰	۲۰	۲۰
Inlet pressure (bar)	۱،۵	۱،۵	۱،۵
Operating power (kW)	۳۰	۳۳	۳۳
Fuel type	UAl <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>
Clad	Al	Zr	Zr
Saturation temperature in core(°C)	۱۱۱،۵	۱۱۱،۵	۱۱۱،۵

در این تحقیق پارامترهایی از قبیل ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و خنک کننده برای هر دو نوع سوخت به منظور اطمینان از عدم تجاوز آنها از حدود ایمنی نظیر دمای ذوب سوخت و غلاف و نیز آغاز جوشش هسته ای در حادثه تزریق  $\mu\text{mk}$  راکتیویته ramp (معادل با راکتیویته مازاد قلب) با استفاده از کد PARET-ANL مورد بررسی قرار گرفته است. این کد یک برنامه کامپیوتری است که برای پیشگویی عواقب حوادث راکتیویته غیر منخرب در

راکتورهای کوچک طراحی شده است و در واقع تلفیقی از محاسبات انتقال حرارت، هیدرولیک و نوترونیک است که از معادلات point kinetic و معادلات انتقال حرارت و هیدرولیک در یک بعد استفاده می نماید [۱].

## ۲. روش انجام کار

در این تحقیق ابتدا آنالیز ترمو هیدرولیکی حالت پایدار و سپس آنالیز ترانزینت برای حالت تزریق  $4\text{mk}$  راکتیویته مثبت به صورت ramp در قلب HEU فعلی و قلب های LEU پیشنهادی توسط کد PARET-ANL انجام گرفته و پارامترهایی نظیر ماکزیمم توان قلب و ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و خنک کننده محاسبه شده است. پروفیل محوری توان برای سوخت HEU از آنالیز نوترونیک حالت پایدار [۲] و برای سوخت های LEU از ضرایب پیک توان مربوط به راکتورهای مشابه [۳] بدست آمده است. پارامترهای دینامیکی مورد نیاز برای شبیه سازی در مورد سوخت HEU از SAR [۴] و در مورد سوخت LEU از پارامترهای مربوط به راکتورهای مشابه [۳] بدست آمده است. جدول (۳) پارامترهای دینامیکی و ضرایب راکتیویته مورد نیاز برای شبیه سازی را نشان می دهد.

جدول ۳. پارامترهای دینامیکی و ضرایب راکتیویته قلب HEU فعلی و قلب های LEU پیشنهادی

Parameter	HEU existing core	LEU proposed core (۵,۵ mm & ۱۲,۶%)	LEU proposed core (۵,۱ mm & ۱۲,۳%)
Prompt neutron generation time ( $\mu\text{s}$ )	۸۰,۹۱	۴۷,۰۰	۵۰,۵۰
Effective delayed neutron fraction ( $\beta_{\text{eff}}$ )	۰,۰۰۸۰۸	۰,۰۰۸۴۵	۰,۰۰۸۳۲
Moderator temperature coefficient (% $\Delta\text{k}/\text{k}/^{\circ}\text{C}$ )	-۰,۰۱۵۳۹	$-۳,۹۶۶ \times ۱۰^{-۲}$	$-۴,۱۹۸ \times ۱۰^{-۲}$
Void/density coefficient (% $\Delta\text{k}/\text{k}/^{\circ}\text{C}$ )	-۰,۳۲۶	-۰,۳۵۶	-۰,۳۴۸
Doppler coefficient (% $\Delta\text{k}/\text{k}/^{\circ}\text{C}$ )	$-۲,۷ \times ۱۰^{-۴}$	$-۱,۳۹۵ \times ۱۰^{-۲}$	$-۱,۳۴۲ \times ۱۰^{-۲}$

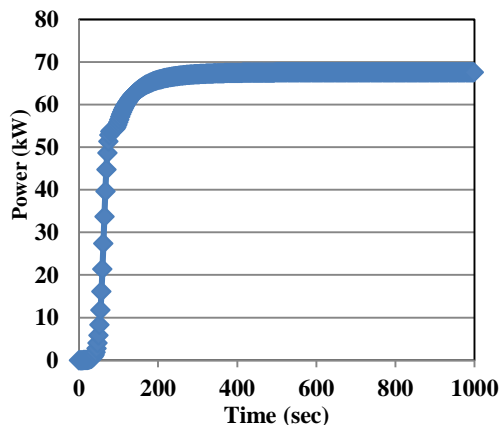
## ۳. نتایج

نتایج محاسبات ترموهیدرولیکی توسط کد PARET در حالت پایدار برای سوخت HEU فعلی و سوخت LEU پیشنهادی در جدول (۴) آورده شده است. شکل های (۱) و (۲) روند تغییرات توان و دما پس از اعمال  $4\text{mk}$  راکتیویته مثبت را به ترتیب در قلب با سوخت  $۱۲/۳\%$  و قلب با سوخت  $۱۲/۶\%$  نشان می دهند. در شکل (۳) روند تغییرات راکتیویته از لحظه صفر تا  $۱۰۰۰$  ثانیه در قلب حاوی سوخت LEU با غنای  $۱۲/۶\%$  نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است  $4\text{mk}$  راکتیویته مثبت از زمان  $۰,۰۵$  میلی ثانیه پس از شروع آنالیز به قلب در حالت

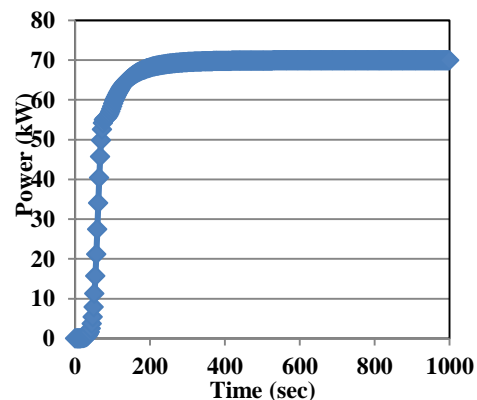
cold zero power اعمال شده است. در شکل (۴) روند تغییرات توان در قلب HEU فعلی پس از اعمال ۴mk راکتیویته مثبت ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج محاسبات ترموهیدرولیکی حالت پایدار راکتور مینیاتوری اصفهان برای سوخت HEU فعلی و سوخت های LEU پیشنهادی

Parameter	HEU (existing core)	LEU proposed core (۵,۵ mm & ۱۲,۶٪)	LEU proposed core (۵,۱ mm & ۱۲,۳٪)
<b>Power peaking factors</b>			
Radial	۱,۱۲	۱,۱۳۱	۱,۱۳۹
Axial	۱,۱۰	۱,۱۳۳	۱,۱۳۲
<b>Temperatures at steady-state condition</b>			
Coolant temperature rise across core	۲۰,۱۷	۲۱,۱۵	۲۰,۴
Coolant temperature rise across hot channel	۲۲,۵۸	۲۳,۹	۲۳,۲۲
Maximum Clad temperature	۵۷,۷۵	۶۱,۶	۶۲,۲۲
Maximum Fuel centerline temperature	۵۸,۰۲	۶۶,۷۱	۶۷,۰۶
<b>Heat flux (W/cm<sup>۲</sup>)</b>			
Average	۱,۹۹۷	۲,۴۹	۲,۳۶
Maximum	۲,۴۶	۲,۸۲	۳,۰۵
Critical heat flux (Mirshak correlation)	۳۳۴,۱۲	۳۳۴,۵	۳۳۵,۲۹
Minimum Margin to CHF	۱۳۵,۸۲	۱۱۸,۶۲	۱۰۹,۹۳

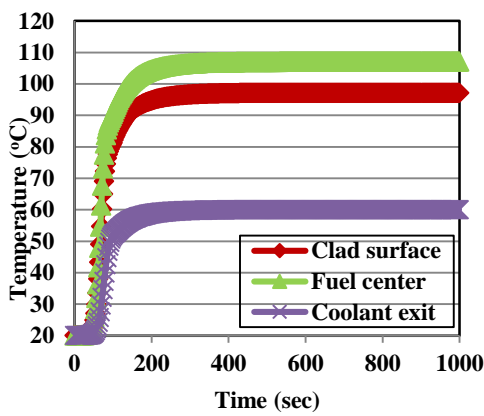


(ب)

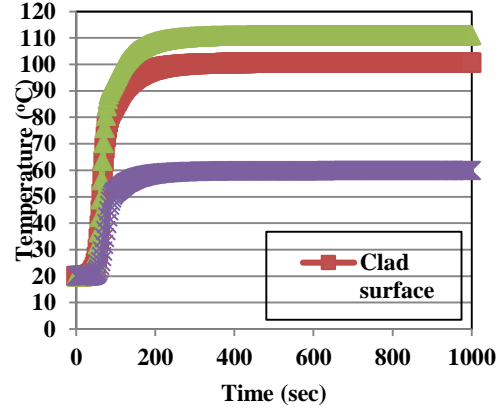


(الف)

شکل ۱. روند تغییرات توان پس از اعمال ۴mk راکتیویته مثبت در قلب با سوخت (الف) ۱۲/۳٪ و سوخت (ب) ۱۲/۶٪

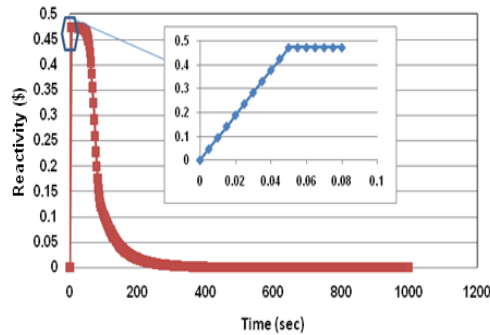


(ب)

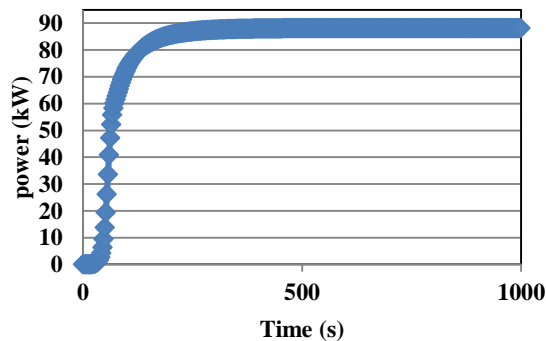


(ف)

شکل ۲. روند تغییرات دما پس از اعمال  $\pm mk$  راکتیویته مثبت در قلب با سوخت  $^{12}C/^{12}O$  و سوخت  $^{12}C/^{12}O$  (الف) و سوخت  $^{12}C/^{12}O$  (ب) سوخت  $^{12}C/^{12}O$



شکل ۳. روند تغییرات راکتیویته پس از اعمال  $\pm mk$  راکتیویته مثبت در قلب حاوی سوخت LEU با غنای  $^{12}C/^{12}O$



شکل ۴. روند تغییرات توان پس از اعمال  $\pm mk$  راکتیویته مثبت در قلب HEU

#### ۴. بحث و نتیجه گیری

به منظور دستیابی به شار نوترونی یکسان در سایت‌های تابش دهی هر دو قلب HEU و LEU، پیشنهاد شده است که توان قلب LEU به ۳۳kW افزایش یابد. نتایج آنالیز حالت پایدار هر دو نوع سوخت LEU پیشنهادی که در جدول (۴) آمده است نشان می‌دهد که با افزایش توان حالت پایدار راکتور، دمای سوخت و غلاف افزایش یافته است ولی افزایش دمای غلاف بسیار کمتر از آن است که بروز جوشش در خنک کننده را موجب شود. همچنین ماکزیمم دمای مرکز سوخت نیز بسیار کمتر از دمای ذوب  $UO_2$  (حدود ۲۸۰۰ درجه سانتی‌گراد) است. بر اساس نتایج بدست آمده از آنالیز ترانزینت در اثر تزریق راکتیویته  $4\text{mk}$  در هر دو نوع LEU پیشنهادی  $12/6\%$  و  $12/3\%$ ، توان به ترتیب تا  $67/6$  و  $69/42$  کیلو وات بالا می‌رود. در قلب با سوخت  $12/6\%$  بزرگتر بودن ضریب داپلر ماکزیمم توان را نسبت به قلب با سوخت  $12/3\%$  کاهش می‌دهد. در اثر این ترانزینت دمای سطح غلاف این دو نوع سوخت به ترتیب  $97/19$  و  $100/76$  درجه سانتیگراد خواهد بود که همچنان کمتر از دمای اشباع آب بوده و جوشش در خنک کننده بروز نمی‌کند. در این حالت ماکزیمم دمای مرکز سوخت نیز به ترتیب  $107/1$  و  $111/18$  درجه سانتیگراد است که بسیار کمتر از دمای ذوب  $UO_2$  می‌باشد. در نتیجه با اعمال این راکتیویته که تقریباً معادل راکتیویته مازاد قلب است ایمنی ذاتی راکتور مانع عبور دما از حدود مجاز می‌شود. مقایسه نتایج آنالیز ترانزینت در قلب HEU و LEU حاکی از آن است که قلب های LEU پیشنهادی به دلیل ضرایب داپلر بزرگتر دارای فاکتور پیک توان کمتر و در نتیجه ماکزیمم دمای سطح غلاف کمتری هستند.

#### ۵. مراجع

- [۱] C. F. Obenchain, Paret Manual, January ۱۹۶۹.
- [۲] F. Faghihi, S.M. Mirvakili, Burn up calculations for the Iranian miniature reactor: a reliable and safe research reactor. Nuclear Engineering and Design ۲۳۹, ۱۰۰۰-۱۰۰۹, ۲۰۰۹.
- [۳] I. Bokhari and Sh. Pervez, Safety analysis for core conversion (from HEU to LEU) of Pakistan research reactor-۲ (PARR-۲), Nuclear Engineering and Design, ۲۴۰, ۱۲۳-۱۲۸, ۲۰۱۰.
- [۴] G. Chengzhan and G. Yongchun. Safety Analysis Report for Miniature Neutron Source Reactor (MNSR), China Institute of Atomic Energy Report, ۱۹۹۴.
- [۵] IAEA-TECDOC-۶۴۳, Research reactor core conversion guidebook, Volume ۴: Fuels.