

آنالیز ترموهیدرولیکی آرایش قلب ترکیبی با جایگزینی مجتمع‌های سوخت کنترلی با غنای بالا (HEU) با مجتمع‌های سوخت LEU در راکتور تحقیقاتی تهران

سید محمد میروکیلی*، سعیده صفائی، حسین خلفی

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها

چکیده

در این مقاله نتایج محاسبات ترموهیدرولیکی برای یک آرایش قلب ترکیبی^۱ از سوخت‌های با غنای بالا (HEU) و سوخت‌های با غنای پائین (LEU) در راکتور تهران ارائه شده است. پیشنهاد طراحی قلب ترکیبی بدلیل نزدیک شدن به محدوده برناپ مجاز سوخت‌های کنترلی و در دسترس بودن سوخت‌های با غنای بالای مربوط به قبل از فرآیند تبدیل قلب راکتور تهران از HEU به LEU که دارای برناپ نسبتاً کمی هستند، حائز اهمیت است. نتایج آنالیز ترموهیدرولیکی قلب ترکیبی پیشنهاد شده و پارامترهای ترموهیدرولیکی مانند توزیع دمای سوخت و غلاف، حاشیه ایمنی تا شروع جوشش هسته‌ای، میزان انحراف از جوشش هسته‌ای و ناپایداری جریان بیانگر تطابق قلب پیشنهادی با معیارهای ایمنی است.

کلید واژه: قلب ترکیبی، آنالیز ترموهیدرولیکی، HEU، LEU.

۱. مقدمه

راکتور تهران از نوع استخری با قدرت ۵ مگاوات می باشد [۱]. شروع بکار این راکتور با بسته‌های سوخت HEU با غنای ۹۳٪ از آلیاژ U-Al بوده است که از سال ۱۳۴۸ تا ۱۳۷۲ مورد استفاده قرار گرفته اند و در سال ۱۳۷۲ در طی یک همکاری مشترک با آژانس مجموعه سوخت‌های با غنای بالا از قلب راکتور خارج شده و بسته‌های سوخت LEU با غنای تقریبی ۲۰٪ از آلیاژ U_3O_8 -Al جایگزین آنها شده است. سوخت‌های قبلی در استخر کناری راکتور نگه داشته شده‌اند و در طول این سالها مرتباً تحت نظارت بوده اند بنحوی که هیچ‌گونه خرابی یا صدمه‌ای در آنها مشاهده نگردیده است. میزان مصرف متوسط سوخت‌های HEU در سوخت‌های استاندارد (SFE) ۱۳ درصد و در سوخت‌های کنترلی (CFE) ۱۸ درصد می‌باشد، بنابراین می‌توانند در قلب ترکیبی قرار بگیرند و تا حد مصرف نهایی برن آپ ببینند. در جدول ۱ مشخصات سوخت‌های کنترلی با غنای

^۱ Mixed-Core

بالا و پایین ارائه شده است. در این تحقیق محاسبات امکان سنجی برای جایگزینی سوخت کترلی با غنای بالا بجای مجتمع سوخت کنترل فعلی به لحاظ ترموهیدرولیکی برای قلب تعادلی مرجع انجام شده است و نتایج محاسبات با معیار های ترموهیدرولیک راکتور تهران مقایسه شده است. قلب مرجع شامل ۲۷ مجتمع سوخت استاندارد، ۵ مجتمع سوخت کنترل و ۶ محل تابش دهی و بسته‌های بازتابنده است که در یک شبکه ۶×۹ چیده شده اند (شکل ۱). در این مقاله جایگزینی، یک و چهار عدد از سوخت های کترلی در آن بررسی شده است.

جدول ۱. مشخصات مجتمعهای سوخت کترلی راکتور تهران

Reactor core parameters	Values	
	CFE-LEU	CFE-HEU
Fuel plates		
Meat thickness, cm	۰,۰۷	۰,۰۵۰۸
Cladding thickness, cm	۰,۰۴	۰,۰۳۸۱
Water channel thickness, cm	۰,۲۷	۰,۳۱۰
Meat width, cm	۶,۰۰	۶,۱۵۹
Meat length, cm	۶۱,۵ cm	۵۹,۶۹
Meat density, gr/cm ^۳	۴,۷۶	۳,۱۶۵۱
Fuel assemblies		
Total dimensions, cm ^۳	۸,۱×۷,۷×۶۱,۵	۸×۷,۶۱×۸۷,۳۱
Number of fuel plates in	۱۴	۸
No of outer dummy plates	none	۲
Length of side plates, cm	۸,۰۱۰	۷,۹۵۰

۹	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	GR-BOX
۸	SFE LEU	CFE LEU	SFE LEU	CFE LEU	SFE LEU	SFE LEU
۷	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU
۶	SFE LEU	CFE LEU	SFE LEU	IR-BOX	CFE LEU	SFE LEU
۵	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU
۴	SFE LEU	SFE LEU	CFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	IR-BOX
۳	SFE LEU	SFE LEU	SFE LEU	IR-BOX	SFE LEU	GR-BOX
۲	GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
۱	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
	A	B	C	D	E	F

شکل ۱. آرایش قلب تعادلی برای جایگزینی سوخت های ترکیبی

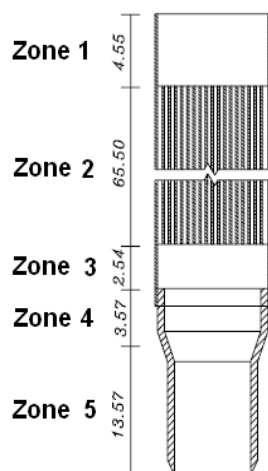


۲. روش انجام کار

۱،۲ آنالیز ترموهیدرولیک قلب راکتور

در این پروژه به منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیکی از کدهای CAUDVAP ۳،۶۰ و TERMIC ۴،۱ مجموعه ۳،۰ MTR-PC استفاده شده است. کد CAUDVAP قادر است توزیع جریان خنک کننده را در کانال های مختلف موجود در قلب یک راکتور از نوع MTR محاسبه نموده و در خروجی سرعت و آهنگ عبور جریان از هریک از کانال ها، افت فشار در کل قلب و نیز مولفه های افت فشار در هر یک از کانال های قلب را ارائه نماید [۲]. توزیع سرعت و جریان سیال برای دستیابی به گستره سرعت مورد نیاز در ورودی کد TERMIC ضروری است. کد TERMIC دمای سوخت و خنک کننده در طول کانال های مجتمع سوخت، شار حرارتی بحرانی، توان مورد نیاز برای آغاز باز توزیع جریان و نیز حداکثر مقدار مجاز توان و شار حرارتی را به ازای معیارهای ایمنی تعیین شده برای عدم بروز ¹ONB، ²DNBR و ناپایداری جریان به صورت تابعی از سرعت خنک کننده محاسبه می نماید [۳]. با توجه به جایگزینی مجتمع های سوخت کنترلی از نوع HEU با LEU، نوع کانال در ورودی کد CAUDVAP تعریف شده است. کانالهای تعریف شده در ورودی کد CAUDVAP به ترتیب مربوط به مجاری عبور سیال مابین صفحات سوخت در مجتمع های سوخت استاندارد، مجاری عبور سیال مابین صفحات سوخت در مجتمع های سوخت کنترلی از نوع HEU و LEU، مجاری عبور سیال مابین مجتمع های سوخت مجاور و نیز مجرای عبور سیال از محل های تابش دهی می باشد. در تعریف کانال مربوط به عبور سیال از محل های تابش دهی، این محل ها به صورت محفظه هایی حاوی آب با ابعاد مجتمع های سوخت فرض شده اند. از آنجا که افت فشار در طول قلب برای تمامی این کانال ها یکسان است سرعت خنک کننده و در نتیجه آهنگ عبور جریان در هر کانال بسته به سطح مقطع عبور جریان متفاوت خواهد بود. در نتیجه هر کانال از ورودی تا خروجی بر اساس تغییرات سطح مقطع عبور جریان در طول کانال به چندین بخش تقسیم بندی شده (شکل ۲) و کسر آهنگ عبور جریان مربوط به هر کانال، سرعت عبور جریان از هر بخش کانال و مولفه های افت فشار (برگشت ناپذیر ناشی از تغییر سطح مقطع، اصطکاک و برگشت پذیر) برای هر بخش توسط کد CAUDVAP محاسبه شده اند. ویژگیهای هیدرولیکی هر یک از این نواحی در جدول ۲ آمده است. بر اساس داده های موجود در SAR راکتور تهران دمای مرجع $37/8^{\circ}\text{C}$ و کل آهنگ عبور خنک کننده از قلب $500 \text{ m}^3/\text{hr}$ لحاظ شده است. نتایج حاصل از این مدل سازی در بخش نتایج ارائه شده است.

¹ Onset of Nucleate Boiling² Departure from Nucleate Boiling Ratio



شکل ۲. بخشهای مختلف یک مجتمع سوخت استاندارد در راستای محوری برای مدل‌سازی به وسیله کد CAUDVAP

جدول ۲. پارامترهای هیدرولیکی هر یک از نواحی تعریف شده در امتداد یک SFE

Zone number	Channel Hydraulic Parameters		
	Length (m)	Flow Area (m ²)	Hydraulic Diameter (m)
۱	۰,۰۴۵۵	۰,۰۰۵۰	۰,۰۷۰۴
۲	۰,۶۵۵۰	۰,۰۰۳۳	۰,۰۰۵۲
۳	۰,۰۲۵۴	۰,۰۰۵۰	۰,۰۷۰۴
۴	۰,۰۳۵۷	۰,۰۰۲۸	۰,۰۶۰۰
۵	۰,۱۳۵۷	۰,۰۰۲۲	۰,۰۵۳۰

پس از تعیین میزان سرعت خنک کننده عبوری از مجاری مابین صفحات سوخت درون مجتمع های سوخت برای بررسی این مسئله که آیا آرایش پیشنهاد شده برای قلب ترکیبی، تمامی معیارهای ترموهیدرولیکی ایمنی شامل معیار عدم آغاز جوشش هسته ای، معیار نسبت انحراف از جوشش هسته ای، معیار عدم آغاز ناپایداری جریان و نیز معیار دمای مجاز سطح غلاف را برآورده می سازد یا خیر مجتمع های سوخت راکتور تهران توسط کد TERMIC مدل‌سازی شده اند. برای محاسبه ONB از رابطه Bergles-Rohsenow برای DNB از رابطه Mirshak و برای OFI از Whittle and Forgan استفاده شده است [۴]. از جمله موارد تاثیر گذار در نتایج مدل‌سازی توسط این کد سرعت عبور خنک کننده، حداکثر شار حرارتی در راستای محوری و فاکتورهای عدم قطعیت می باشند. فاکتورهای عدم قطعیت از SAR راکتور تهران استخراج شده اند. سرعت عبور خنک کننده با استفاده از کد CAUDVAP محاسبه شده است ولی حداکثر شار حرارتی در راستای محوری به روش زیر (به عنوان مثال برای حالتی که یک مجتمع سوخت کنترل HEU جایگزین شود) بدست آمده است.

$$\text{Heating surface area} = [(27 \times 19) + (4 \times 14)] \times [2 \times (0.7 + 60)] \times 610 + (1 \times 8) \times [2 \times 61.09] \times 59.09 = 42580.40914 \text{ mm}^2 = 42580.40914 \text{ cm}^2$$

$$\text{Average heat flux} = \frac{\text{Thermal power}}{\text{Heating surface area}} = \frac{0.000000}{425804.914} = 11.742 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

$$\text{Maximum heat flux} = \text{Average heat flux} \times \text{Power peaking factor} = 11.742 \times 2.5 = 29.355 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

۳. نتایج آنالیز ترموهیدرولیک

نتایج محاسبه توزیع جریان و سرعت خنک کننده توسط کد CAUDVAP و نیز نتایج محاسبات ترموهیدرولیکی حاصل از کد TERMIC و مقایسه آنها با معیارهای ایمنی برای دو حالت مربوط به جایگذاری ۱ و ۴ مجتمع سوخت کنترلی HEU بجای LEU در آرایش قلب مرجع با در نظر گرفتن میله های کنترل در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳. نتایج آنالیز ترموهیدرولیک در حالت جایگزینی یک و چهار مجتمع سوخت HEU

Parameter	Results		Safety Criteria [۱]&[۵]
	۱ HEU in core	۲ HEU in core	
Coolant flow through SFE, %	۷۸,۱۳	۷۸,۴۴	-
Coolant flow through CFE_LEU, %	۹,۰۴	۲,۲۷	-
Coolant flow through CFE_HEU, %	۲,۰۳	۸,۱۴	-
Coolant flow by-pass, %	۱۰,۸۱	۱۰,۴۹۶۷	-
Coolant velocity between fuel plates in SFE, m/s	۱,۲۳۴	۱,۲۳۹	
Coolant velocity between fuel plates in CFE_LEU, m/s	۱,۱۹۸	۱,۲۰۳	< ۱۵,۳
Coolant velocity between fuel rods in CFE_HEU, m/s	۱,۴۱۰	۱,۴۱۶	
Margin to ONB	SFE	۱,۴۸۵	۱,۴۵
	CFE_LEU	۱,۴۵	۱,۴۱
	CFE_HEU	۱,۶۸	۱,۶۳۵
Margin to DNB	SFE	۱۰,۲۱۱	۹,۸۷۸
	CFE_LEU	۱۰,۱۶۲	۹,۸۲۲
	CFE_HEU	۱۰,۵۵۸	۱۰,۲۱۹
Peak cladding temp. (°C)	SFE	۹۵,۷۵	۹۷,۲
	CFE_LEU	۹۷	۹۸,۷
	CFE_HEU	۹۰,۱	۹۱,۴۵
Peak fuel temp. (°C)	SFE	۱۱۳,۳۵	۱۱۵,۴
	CFE_LEU	۱۱۴,۶	۱۱۶,۹
	CFE_HEU	۱۰۵,۰	۱۰۶,۸
Margin to OFI	SFE	۲,۸۴۳۵	۲,۷۶۴
	CFE_LEU	۲,۷۶۹	۲,۶۸۲
	CFE_HEU	۳,۶۹۶	۳,۵۹
Margin to T _{wall} =۱۰۵ °C	SFE	۱,۱۸۵	۱,۱۵
	CFE_LEU	۱,۱۵	۱,۱۲
	CFE_HEU	۱,۲۳	۱,۲۹

۴. نتیجه گیری

آنالیز ترموهیدرولیکی انجام گرفته بر روی چیدمان قلب پیشنهاد شده و نتایج حاصل از آن نیز بیانگر این واقعیت است که علی رغم اعمال شرایط محافظه کارانه و در نظر گرفتن ضریب پیک توان ۲/۵ هیچ یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی از محدوده های مجاز فراتر نرفته و همگی با معیارهای ایمنی مطرح شده در OLC راکتور [۵] و مدارک آژانس بین المللی انرژی اتمی که در بخش مراجع به آنها اشاره شده است [۷ و ۸] سازگاری دارند.

۵. مراجع

- [۱] TRR Final Safety Assessment Report.
- [۲] P. Abbate, "User's manual of CAUDVAP V ۳,۶۰".
- [۳] P. Abbate, "User's manual of TERMIC v۴,۱".
- [۴] Liaquat Ali Khan, "Study of reactor design parameters", PhD thesis, university of Punjab, Lahore", ۱۹۹۹.
- [۵] Operational Limits and Conditions (OLC's) of TRR, ۲۰۱۰.
- [۶] IAEA Safety Standards, "Safety of Research Reactors", Safety Requirements No. NS-R-۴.
- [۷] IAEA Safety Series, "Safety in the Utilization and Modification of Research Reactors", VIENNA, ۱۹۹۴.
- [۸] IAEA Safety Reports Series No. ۵۵, "Safety Analysis for Research Reactors".