

آنالیز فوترونیک قلب ترکیبی راکتور تهران با جایگزینی مجتمع سوخت کنترل

با سوخت میله ای جدید

سمیه، باقری؛ حسین، خلفی؛ سید محمد، میروکیلی*

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشگاه راکتور

چکیده

در این مقاله، پارامترهای نوترونی با ورود مجتمع سوخت میله ای به قلب راکتور تحقیقاتی تهران در طی دو سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی اول مربوط به شرایط واقعی و عملیاتی در مدیریت سوخت قلب راکتور تهران در طی ۴ سیکل کاری بوده است و در سناریوی دوم، به منظور بررسی دقیق و آنالیزهای حساسیت و مقایسه ای، قلب تعادلی مرجع انتخاب شده و آنالیزهای دقیق مربوط به تغییرات پارامترهای دینامیکی و سینتیکی با ورود مجتمع سوخت میله ای صورت گرفته است. نتایج حاکی از آن است که با ورود مجتمع سوخت میله ای ضرایب راکتیویته دمایی سوخت و کندکننده هر دو افزایش، عمر نوترون های آنی کاهش و کسر نوترون های تأخیری نیز افزایش می یابد. کلید واژه: قلب ترکیبی، مجتمع سوخت کنترلی با سوخت میله ای، پارامترهای دینامیکی، پارامترهای سینتیکی

مقدمه

به دلیل پیچیدگی ساخت سوخت صفحه ای در داخل کشور در سال ۸۹، بررسی در مورد ساخت نوع ساده تری از سوخت مد نظر قرار گرفته شد. مخصوصاً در آن زمان که راکتور تهران با اتمام سوخت از نوع کنترلی (CFE) مواجه گشت و با توجه به استفاده از سوخت میله ای در راکتورهای تحقیقاتی، در مورد راکتور تهران نیز تبدیل سوخت بعنوان یک راهکار در نظر گرفته شد. در این مقاله فقط جایگزینی CFE مورد توجه است به طوری که قلب، ترکیبی از سوخت های SFE صفحه ای و CFE میله ای می باشد. در مطالعه اولیه با حفظ پارامترهای اساسی قلب راکتور تهران و در نظر گرفتن حداقل تغییرات در ساختار قلب نتایج استفاده از سوخت میله ای در CFE بصورت جایگزینی فقط یک CFE میله ای یا چهار CFE میله ای در قلب بررسی شده است. در اواخر سال ۹۰ این سوخت برای اولین بار جهت تست های عملکردی در قلب راکتور قرار گرفت و به عنوان اولین سوخت تولیدی کشور در کنار سوخت های صفحه ای، ابتدا در حاشیه قلب و سپس به جای CFE صفحه ای جایگزین شد. لذا از آنجا که هر قلبی که در راکتور تهران یا هر راکتوری چیدمان می شود باید کلیه معیارهای ایمنی بهره برداری را چه به لحاظ نوترونیک، ترموهیدرولیک و آنالیز حوادث برآورده سازد. و با توجه به اهمیت پارامترهای دینامیکی و سینتیکی در تحلیل حوادث پایه طراحی و یا حوادث فرضی اولیه و آنالیز حساسیت پارامترهای ایمنی نظیر ماکزیمم دمای سوخت، غلاف و DNBR^۱ نسبت به تغییرات قلب راکتور نظیر برناپ سوخت، تغییر در چیدمان و نوع سوخت محاسبه این پارامتر لازم و ضروری به نظر می رسد. برای محاسبه پارامترهای نوترونیک قلب راکتور شامل پارامترهای دینامیکی و سینتیکی دو سناریوی کلی در نظر گرفته شده است:

سناریوی اول مربوط به شرایط واقعی و عملیاتی در مدیریت سوخت قلب راکتور تهران بوده است. در این حالت مجتمع سوخت میله ای در طول ۴ سیکل کاری از حاشیه قلب تا نهایتاً در محل یکی از مجتمع های سوخت CFE صفحه ای و محل ورود میله کنترل تنظیمی جابجا شده است. این شرایط گذار از قلب ترکیبی شماره ۱ شروع شده و با قلب های ترکیبی ۲ و ۳ ادامه می یابد و نهایتاً در قلب ترکیبی ۴ به محل مورد نظر یعنی به جای یک مجتمع سوخت CFE صفحه ای

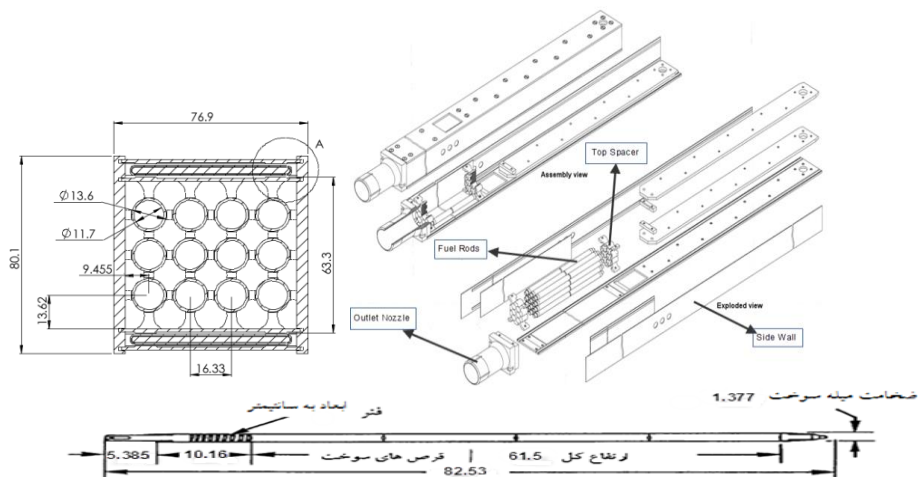
۱- Departure from nucleat boiling (DNBR)

منتقل می شود. در سناریوی دوم، به منظور بررسی دقیق تر و آنالیزهای حساسیت و مقایسه ای، قلبی از راکتور تهران به نام قلب تعادلی مرجع را انتخاب نموده و آنالیزهای دقیق مربوط به تغییرات پارامترهای نوترونیک قلب راکتور شامل پارامترهای سینتیکی و دینامیک صورت گرفته است. نخستین گام مدلسازی راکتور با استناد به اطلاعات جمع آوری شده از SAR [۱] راکتور توسط کدهای [۲] WIMSD۵، [۳] CITVAP و [۴] BORGES v۳,۰ از مجموعه ی [۵] MTR-PC صورت می گیرد.

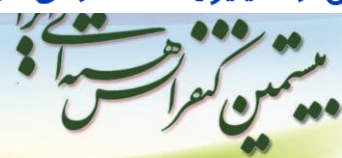
روش کار

در این قسمت همانطور که در شکل (۱) مشاهده می شود، مشخصات مجتمع سوخت کنترل جدید با سوخت میله ای آورده شده است. طراحی به گونه ای است که ابعاد هندسی مجتمع جدید مطابق با مجتمع های کنترلی فعلی راکتور تهران به لحاظ ابعاد بیرونی مجتمع و گام شبکه در قلب راکتور باشد و ابعاد دقیق محل قرارگیری میله های کنترل راکتور رعایت گردد تا نیازی به تغییر در شرایط عملیاتی و سیستم خنک کننده راکتور تهران نباشد. به گونه ای که با حفظ پارامترهای اساسی قلب راکتور تهران امکان تست سوخت های تولیدی در شرایط کارکرد با توان کامل در قلب را فراهم آورد و کلیه پارامترهای ایمنی قلب راکتور تهران را برآورده سازد. در ضمن برای طراحی ترکیب و غنای سوخت سعی شده است تا سوخت تولیدی کشور با چگالی موردنظر تا غنای ۳/۱ در صد طراحی شود تا میزان بارگذاری سوخت اورانیوم ۲۳۵ در مجتمع های جدید مطابق با سوخت قبلی باشد. مجتمع سوخت کنترل جدید دارای ۱۲ میله سوخت به قطر خارجی cm ۱/۳۶ می باشد. غلاف میله های سوخت از جنس $Zr-Nb 1\%$ و با ضخامت ۰/۹۵mm در نظر گرفته است. ارتفاع فعال میله های سوخت cm ۶۰ می باشد که تقریباً شامل ۴۲ قرص سوخت به ارتفاع ۱۴ mm است. تیغه های کنترلی حاوی In-Cd- Ag همانند CFE قبلی در طرفین و سوخت در وسط قرار گرفته است. مجتمع CFE جدید دارای همان گام شبکه فعلی یعنی $7/71\text{cm} \times 8/1\text{cm}$ است قلب ترکیبی جدید (Mixed-core) همانند قلب فعلی و مطابق با سیستم خنک کننده موجود با مقدار دبی $500\text{ m}^3/\text{h}$ برای کارکرد در حالت پایدار با توان ۵ MW در نظر گرفته شده است.

در جدول (۱) نیز میزان بارگذاری سوخت جدید با سوخت صفحه ای مقایسه شده است.



شکل ۱. نمای کلی از مجتمع سوخت کنترلی جدید



جدول ۱. مقدار سوخت مورد نیاز برای ساخت مجتمع سوخت کترلی CFE و مقایسه آن با مقدار سوخت صفحه ای

CFE	UO ₂	U ₃ O ₈ -Al
Enrichment	۳,۱٪	۲۰ %
Meat	۶,۷۲۴ kg	۱,۶۶ kg
U	۵,۹۲۸ kg	۱,۰۷ kg
U-۲۳۵	۱۹۷gr	۲۱۴,۲ gr
U-۲۳۸	۵,۷۲۰ kg	۸۵۶ gr

برای محاسبه پارامترهای نوترونیک قلب راکتور شامل پارامترهای دینامیکی و سینتیکی دو سناریوی کلی در نظر گرفته شده است:

الف) سناریوی اول: سناریوی اول مربوط به شرایط واقعی و عملیاتی در مدیریت سوخت قلب راکتور تهران بوده است. در این حالت همانطور که در شکل های ۱ الی ۴ نشان داده شده است، مجتمع سوخت میله ای در طول ۴ سیکل کاری از حاشیه قلب تا نهایتاً در محل یکی از مجتمع های سوخت CFE صفحه ای و محل ورود میله کنترل تنظیمی جابجا شده است.



شکل ۲. آرایش قلب های ترکیبی

محاسبه پارامترهای سینتیکی و دینامیکی برای ۴ قلب ترکیبی

در این قسمت پارامترهای سینتیکی و دینامیکی چهار قلب ترکیبی محاسبه و به همراه متوسط برناب قلب ها در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود، از قلبی به قلب دیگر با توجه به تغییر آرایش و ترکیب قلب، متوسط برناب قلب کاهش یافته و با کاهش برناب، عمر نوترون های آنی کاهش و کسر نوترون های تأخیری افزایش می یابد، که در جدول زیر نیز این روند مشهود می باشد.

محاسبات پارامترهای دینامیکی نیز برای ۴ قلب ترکیبی با در نظر گرفتن میزان برناب انجام گرفته است و نتایج در جدول (۲) آورده شده است. ضرایب راکتیویته دمایی سوخت برای چهار قلب ترکیبی با ثابت در نظر گرفتن کلیه پارامترها و تغییر دمای سوخت در محدوده ی دمایی $340^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ با گام 20°C محاسبه شده و برای کندکننده نیز محاسبات با تغییرات همزمان دما (در محدوده ی دمایی $140^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ با گام 5°C) و چگالی (با محدوده ی $0.9982 - 0.927 \text{ gr/cm}^3$) انجام شده و نتایج در جدول (۲) آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود میانگین ضریب راکتیویته دمایی سوخت برابر با $(-1.56 \text{ to } -1.51 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C})$ محاسبه شده است، که در محدوده ی ذکر شده در $[1] \text{ SAR } (-2.0 \text{ to } -1.4 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C})$ قرار دارد و میانگین ضریب راکتیویته دمایی کندکننده برابر با $(-23 \text{ to } -21 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C})$ محاسبه شده است و محدوده ی ذکر شده در $[1] \text{ SAR}$ ، $(-28.6 \text{ to } -15.8 \text{ pcm}/^{\circ}\text{C})$ می باشد.

جدول ۲. نتایج حاصل از محاسبات پارامترهای سینتیکی و دینامیکی برای ۴ قلب ترکیبی

پارامتر	قلب ترکیبی ۱	قلب ترکیبی ۲	قلب ترکیبی ۳	قلب ترکیبی ۴
عمر نوترونهای آنی (Sec)	$6.15 \text{E}-05$	$6.11 \text{E}-05$	$6.05 \text{E}-05$	$5.90 \text{E}-05$
کسر نوترونهای تأخیری	$7.18 \text{E}-03$	$7.20 \text{E}-03$	$7.20 \text{E}-03$	$7.24 \text{E}-03$
ضریب راکتیویته دمایی سوخت ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)	-۱.۵۴	-۱.۵۳	-۱.۵۱	-۱.۵۷
ضریب راکتیویته دمایی کندکننده ($\text{pcm}/^{\circ}\text{C}$)	-۲۳.۰۴	-۲۳.۱۲	-۲۲.۹۶	-۲۱.۵۶
متوسط برناب (درصد)	۳۳.۰۴	۳۲.۶۰	۳۲.۱۴	۲۹.۱۳

ب) سناریوی دوم: در این قسمت به سناریوی دوم پرداخته می شود، در این سناریو به منظور بررسی دقیق تر و آنالیزهای حساسیت و مقایسه ای، قلبی از راکتور تهران را که به نام قلب تعادلی مرجع در محاسبات $[1] \text{ SAR}$ [راکتور تحقیقاتی تهران که توسط شرکت آرژانتینی INVAP ارائه شده، انتخاب نموده و آنالیزهای دقیق مربوط به تغییرات پارامترهای نوترونیک قلب راکتور شامل پارامترهای سینتیکی و دینامیک صورت گرفته است. قلب تعادلی مرجع دارای ۲۸ مجتمع سوختی بوده ولی از این ۲۸ مجتمع سوختی ۴ عدد مجتمع سوخت کنترل می باشد که آرایش آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

محاسبه پارامترهای دینامیکی و سینتیکی برای قلب تعادلی مرجع با ورود مجتمع سوخت میله ای

در این قسمت پارامترهای دینامیکی و سینتیکی قلب تعادلی مرجع ابتدا در شرایطی که تمامی مجتمع های سوخت صفحه ای باشند (NoRod) محاسبه شده سپس این محاسبات با ورود مجتمع سوخت میله ای در

موقعیتهای مختلف (C₂, E₄, C₄ و D₃) و همچنین در شرایطی که مجتمع سوخت میله ای در دو، سه تا چهار موقعیت وارد شود صورت گرفته و نتایج در جدول (۳) آورده شده است. برای هر یک از حالت های ورود مجتمع سوخت میله ای، ضرایب راکتیویته دمایی برای سوخت با ثابت در نظر گرفتن کلیه پارامترها و تغییر دمای سوخت در محدوده ی دمایی ۲۰-۳۴۰°C با گام ۲۰°C محاسبه شده و برای کندکننده نیز محاسبات با تغییرات همزمان دما (در محدوده ی دمایی ۱۴۰-۲۰°C با گام ۵°C) و چگالی (با محدوده ی ۰,۹۹۸۲-۰,۹۲۷ gr/cm^۳) انجام شده است.

9	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
8	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
7	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
6	H ₂ O	SFE	SFE	SFE	SFE	SFE
5	SFE	SFE	SFE	CFE	SFE	SFE
4	SFE	SFE	CFE	SFE	CFE	SFE
3	SFE	SFE	SFE	CFE	SFE	SFE
2	H ₂ O	SFE	SFE	SFE	SFE	SFE
1	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
	A	B	C	D	E	F

شکل ۳. آرایش قلب تعادلی مرجع

با توجه به جدول (۱) جرم U^{۲۳۸} در یک سوخت میله ای نسبت به یک سوخت صفحه ای به طور قابل توجهی بیشتر است، همین امر منجر به کاهش عمر نوترون های آنی در نتیجه افزایش جذب بیشتر نوترون ها در U^{۲۳۸} و افزایش ضریب راکتیویته دمایی سوخت در نتیجه افزایش فیدبک ناشی از اثر دوپلر با ورود مجتمع سوخت میله ای می گردد. از طرفی با توجه به اینکه کسر نوترون های تأخیری باید به صورت میانگین بندی های با وزن مناسب در ترکیب سوخت محاسبه شوند، کسر نوترون های تأخیری میانگین بندی شده، با افزایش U^{۲۳۸} با ورود سوخت میله ای افزایش پیدا خواهد کرد چرا که U^{۲۳۸} نسبت به U^{۲۳۵} درصد تولید نوترون های تأخیری بیشتری دارد. همچنین نسبت کندکننده به سوخت در یک سوخت میله ای نسبت به سوخت صفحه ای بیشتر می باشد که منجر به افزایش ضریب راکتیویته دمایی کندکننده می شود. در حالت کلی با ورود مجتمع سوخت میله ای پارامترها تغییرات چندان محسوسی را نشان نمی دهند، به طوری که حداکثر تغییرات با ورود چهار مجتمع سوخت میله ای مربوط به عمر نوترون های آنی است که حدوداً ۲,۸۹ درصد می باشد.

نتیجه گیری

هدف از انجام این مقاله محاسبه و تحلیل پارامترهای نوترونیک قلب ترکیبی راکتور تحقیقاتی با جایگزینی مجتمع سوخت کنترلی با سوخت میله ای جدید می باشد. نتایج به دست آمده با ورود سوخت میله ای به شرح زیر می باشد:



- افزایش کسر نوترون های تأخیری بر حسب ورود سوخت میله ای (در جهت عکس ایمنی)
- کاهش عمر نوترون های آنی بر حسب ورود سوخت میله ای (در جهت عکس ایمنی)
- افزایش ضریب راکتیویته دمایی سوخت بر حسب ورود سوخت میله ای (در جهت ایمنی)
- افزایش ضریب راکتیویته دمایی کندکننده بر حسب ورود سوخت میله ای (در جهت ایمنی)

جدول ۴. محاسبه پارامترهای سیستمی و دینامیکی برای قلب تعادلی مرجع با ورود مجتمع سوخت میله ای

PARAMETER	ROD POSITIONs IN MODIFIED REFERENCE CORE								Approach
	NO ROD	C _۴	D _۳	D _۵	E _۴	D _۳ ,C _۴	D _۳ ,C _۴ ,E _۴	D _۳ ,C _۴ ,E _۴ ,D _۵	
PROMPT-NEUTRON LIFETIME(sec)	۴,۰۷E-۰۵	۴,۰۴E-۰۵	۴,۰۴E-۰۵	۴,۰۵E-۰۵	۴,۰۴E-۰۵	۴,۰۱E-۰۵	۳,۹۸E-۰۵	۳,۹۶E-۰۵	↓
DELAYEDNEUTRON FRACTION	۷,۷۹E-۰۳	۷,۸۱E-۰۳	۷,۸۲E-۰۳	۷,۸۰E-۰۳	۷,۸۱E-۰۳	۷,۸۴E-۰۳	۷,۸۷E-۰۳	۷,۸۸E-۰۳	↑
FUELTEMPRATURE COEFFICIENT (pcm/C)	-۱,۶۶۴	-۱,۶۶۸۴۴	-۱,۶۶۸۷۵	-۱,۶۶۷۱۹	-۱,۶۶۷۵	-۱,۶۷۲۸۱	-۱,۶۷۶۲۵	-۱,۶۷۸۴۴	↑
MODERATOR TEMPRATURE COEFFICIENT(pcm/C)	-۲۱,۳۸	-۲۱,۳۹	-۲۱,۳۸	-۲۱,۳۹	-۲۱,۳۹	-۲۱,۳۹	-۲۱,۴۱	-۲۱,۴۲	↑

مراجع

- [۱]. Invap, TRR SafetyAnalysis Report, (۱۹۸۹).
- [۲]. UK.,Wims D_۵ Code the Preparation of Input Data for Wims(۱۹۸۰).
- [۳]. Invap, Nuclear engineering division, MTR_PC, “BORGES v۳,۰”, (۱۹۹۳).
- [۴]. Invap, Nuclear engineering division, MTR_PC, Reactor calculation code, “Citvap v۳,۱”, (۱۹۹۹).
- [۵]. Invap S.E., Nuclear engineering division, “Neutronic section of MTR_PC vers.۳,۰”, (۲۰۰۱).