



دانشگاه گیلان

## آنالیز ایمنی ترموهیدرولیکی در شرایط تست مجتمع سوخت میله ای با غنای طبیعی در راکتور تهران

سعیده، صفائی؛ حسین، خلفی\*؛ سید محمد، میروکیلی

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

### چکیده

به منظور حصول اطمینان از عملکرد ایمن مجتمع سوخت میله ای حاوی قرصهای  $UO_2$  با غنای طبیعی تولید شده در داخل کشور پس از بارگذاری درون قلب راکتور، ضروری است عملکرد این سوخت در معرض شار نوترون، مورد تست و بررسی دقیق قرار گیرد. در این مقاله به منظور امکان سنجی تابش دهی این نوع مجتمع سوخت میله ای در راکتور تهران از نقطه نظر ترموهیدرولیکی، معیارهای ترموهیدرولیکی ایمنی قلب راکتور در صورت قرارگیری این مجتمع در قلب محاسبه و با مقادیر استاندارد مقایسه شده است. نتایج محاسبات بیانگر این واقعیت است که با بارگذاری این سوخت در قلب راکتور تهران معیارهای ترموهیدرولیکی ایمنی از گستره مجاز فراتر نخواهند رفت.

**کلید واژه:** تست سوخت، مجتمع سوخت میله ای، ترموهیدرولیک، DNBR، راکتور تهران

### ۱. مقدمه

انجام تستهای در حین تابش دهی و پس از آن، بر روی سوختههای تولید شده در داخل کشور برای حصول اطمینان از عملکرد ایمن این سوختها در معرض شار نوترون درون قلب راکتور، بسیار ضروری بوده و جایگاه ویژه ای در تکمیل موفقیت آمیز چرخه سوخت هسته ای و پروسه تولید سوخت هسته ای در داخل کشور خواهد داشت. بررسی مدارک و مقالات موجود در زمینه تست سوخت در کشورهای دارای این تکنولوژی، حاکی از این واقعیت است که راکتورهای تحقیقاتی ابزار بسیار ارزشمندی برای دستیابی به اطلاعاتی پیرامون نحوه عملکرد سوخت در شرایط کاری داخل راکتور (اعم از شرایط کارکرد عادی و شرایط حادثه) محسوب می شوند. از این رو ضروری است تا با بهره گیری از پتانسیل راکتور تحقیقاتی تهران به عنوان تنها راکتور تحقیقاتی در حال کار در کشور، امکان تابشدهی و تست سوختههای تولیدی در قلب راکتور تهران فراهم گردد. نخستین گام در این فرایند، آنالیز ایمنی قلب راکتور و محاسبه پارامترهای مرتبط با آن در صورت بارگذاری سوخت مورد آزمایش در قلب راکتور می باشد. اهمیت این مسئله از آن رو است که سوختههای تولید شده بسته به نوع راکتوری که برای آن طراحی و ساخته می شوند از نظر مواد و ابعاد با سوختههای مورد استفاده در راکتور تهران تفاوت دارند. در نتیجه ضروری است تا محاسباتی برای اطمینان از عدم نقض معیارهای ایمنی



قلب راکتور در هنگام تابشدهی این سوخت ها انجام پذیرد. در این مقاله به بررسی معیار های ترموهیدرولیکی ایمنی ( شامل دمای سطح غلاف، دمای مرکز سوخت، <sup>1</sup>ONB و <sup>2</sup>DNBR) در صورت تابشدهی مجتمع سوخت میله ای حاوی قرصهای  $UO_2$  با غنای طبیعی در قلب راکتور تهران پرداخته شده است.

## ۲. روش انجام کار

### ۲،۱ آنالیز ترموهیدرولیک قلب راکتور

در این پروژه به منظور انجام محاسبات ترموهیدرولیکی مربوط به مجتمع های سوخت راکتور تهران از کدهای ۳،۶ CAUDVAP و ۴،۱ TERMIC مجموعه ۳،۰ MTR-PC برای محاسبات ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت میله ای از کد COBRA-EN که قابلیت انجام آنالیز زیر کانال (subchannel analysis) را داراست، استفاده شده است. کد CAUDVAP قادر است توزیع جریان خنک کننده را در کانالهای مختلف موجود در قلب یک راکتور از نوع MTR محاسبه نموده و در خروجی، سرعت و آهنگ عبور جریان از هر یک از کانالها، افت فشار در کل قلب و نیز مولفه های افت فشار در هر یک از کانالهای قلب را ارائه نماید [۱]. 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 کانالهای 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 و ناپایداری جریان به صورت تابعی از سرعت خنک کننده محاسبه می نماید [۲].

در شکل ۱ چیدمان قلب مورد نظر برای تابشدهی مجتمع سوخت میله ای حاوی قرصهای  $UO_2$  با غنای طبیعی نشان داده شده است. لازم به ذکر است به دلیل برخی محدودیتهای ابعادی امکان بارگذاری این مجتمع در قسمتهای مرکزی قلب وجود ندارد. به منظور انجام آنالیز ترموهیدرولیکی در این قلب، ابتدا تمامی مجتمع های سوخت و محفظه های تابش دهی موجود، توسط کد CAUDVAP و با فرض دبی خنک کننده  $m^3/hr$  ۵۰۰ در ورودی قلب، مدل سازی شده است. 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. بدین ترتیب، کسر آهنگ عبور جریان و سرعت عبور جریان از هر بخش کانال ها که بر اساس تغییرات سطح مقطع عبور جریان در طول کانال از ورودی تا خروجی تقسیم بندی شده اند و نیز مولفه های

<sup>1</sup>Onset of Nucleate Boiling

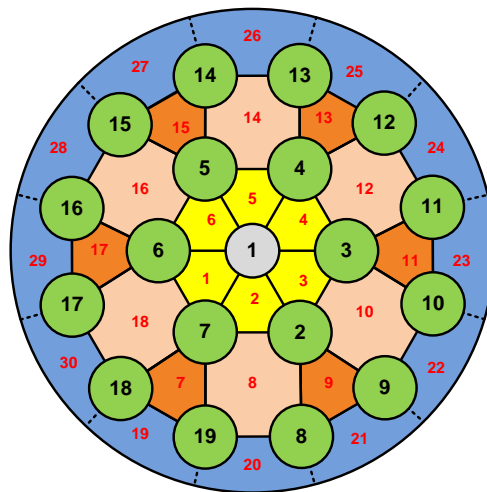
<sup>2</sup>Departure from Nucleate Boiling Ratio

افت فشار (برگشت ناپذیر ناشی از تغییر سطح مقطع، اصطکاکی و برگشت پذیر) برای هر بخش توسط کد CAUDVAP محاسبه می شوند.

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	
GR-BOX	Test Fuel	IR-BOX	SFE	SFE	SFE	SFE	SFE	IR-BOX	A
GR-BOX	IR-BOX	SFE	SFE	SFE	CFE-SR <sup>۱</sup>	SFE	CFE-RR	GR-BOX	B
GR-BOX	IR-BOX	SFE	CFE-SR <sup>۴</sup>	SFE	SFE	SFE	SFE	GR-BOX	C
GR-BOX	GR-BOX	SFE	SFE	SFE	IR-BOX	SFE	SFE	GR-BOX	D
GR-BOX	GR-BOX	SFE	SFE	CFE-SR <sup>۳</sup>	SFE	CFE-SR <sup>۲</sup>	SFE	IR-BOX	E
GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	SFE	SFE	SFE	SFE	SFE	GR-BOX	F

شکل ۱- چیدمان قلب مورد نظر برای تابشدهی مجتمع سوخت میله ای حاوی قرصهای  $UO_2$  با غنای طبیعی

میزان سرعت خنک کننده عبوری از مجاری مابین صفحات سوخت درون مجتمع های سوخت CFE و SFE راکتور تهران و نیز سرعت خنک کننده عبوری از مجاری مابین میله های سوخت در سوخت مورد آزمایش، به عنوان پارامتری در ورودی کدهای TERMIC و COBRA-EN مورد استفاده قرار می گیرد. برای بررسی این مسئله که آیا در مجتمع های سوخت CFE و SFE در قلب مورد نظر، 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 شوند یا خیر، مجتمع های سوخت راکتور تهران توسط کد TERMIC مدل سازی شده اند. برای محاسبه ONB از رابطه Bergles Rohsenow برای DNB از رابطه Mirshak و برای OFI از Whittle and Forgan استفاده شده است [۳]. از جمله موارد تاثیر گذار در نتایج مدل سازی توسط این کد سرعت عبور خنک کننده، حداکثر شار حرارتی در راستای محوری و فاکتورهای عدم قطعیت می باشند. فاکتورهای عدم قطعیت از SAR [۴] راکتور تهران استخراج شده اند. سرعت عبور خنک کننده با استفاده از کد CAUDVAP و حداکثر شار حرارتی در راستای محوری با استفاده از محاسبات نوترونیک توسط کد MCNP بدست آمده است. تحلیل حرارتی مجتمع سوخت میله ای تحت تست، توسط کد ترموهیدرولیکی COBRA-EN که قابلیت تحلیل یک مجتمع سوخت در قالب تحلیل زیرکانال را دارد، انجام شده است. در این آنالیز مجتمع سوخت میله ای با تمام جزئیات آن شامل کلیه میله های سوخت و میله مرکزی و نیز تمامی زیرکانال های موجود بین میله ها در کد مدل سازی شده است. شکل ۲ مقطع عرضی این مجتمع و نحوه مدل سازی و شماره گذاری میله ها و زیرکانال های آن در کد COBRA را نشان می دهد. توزیع نرخ خطی توان مربوط به تک تک میله های این مجتمع که در ورودی کد COBRA مورد نیاز است از محاسبات نوترونیک بدست آمده است. همچنین یک برنامه واسط توسط نرم افزار MATLAB برای محاسبه معیارهای ایمنی ONB و DNBR به ترتیب از روابط Bergles [۵] و Bernath [۲] در گستره عملیاتی راکتور تهران نوشته شده است.



شکل ۲- نحوه مدلسازی مجتمع سوخت میله ای و شماره گذاری میله ها و زیرکانال های آن

### ۳. نتایج آنالیز ترموهیدرولیک

نتایج محاسبه توزیع سرعت و جریان خنک کننده در کانالهای مابین سوختها در مجتمعهای سوخت راکتور تهران و نیز مجتمع تحت تست به همراه کسر جریان عبوری از هر یک، که توسط کد CAUDVAP بدست آمده است در جدول ۱ ارائه شده است. اختلاف جریان عبوری از این کانالها با جریان کل بیانگر جریان بای پس می باشد.

جدول ۱- توزیع سرعت و جریان خنک کننده در مجتمع های سوخت درون قلب

Channel Type	Coolant velocity between fuels (m/sec)	Total flow rate fraction	Total flow	
			(m <sup>3</sup> /hr)	(Kg/sec)
SFE(Standard Fuel Element)	۱,۱۳۵	۰,۷۴۹۸	۳۷۴,۹	۱,۰۳۴E+۰۲
CFE (Control Fuel Element)	۱,۱۴۱	۰,۰۸۶۱	۴۳,۰	۱,۱۸۷E+۰۱
Rod-Type fuel assembly	۱,۵۸۲	۰,۰۲۴۸	۱۲,۴	۳,۴۱۴E+۰۰

نتایج محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی ایمنی در مجتمع های سوخت راکتور تهران در حالتی که مجتمع میله ای تحت آزمایش در قلب قرار داشته است در جدول ۲ ارائه شده و با معیارهای ایمنی موجود در SAR



و OLC<sup>۱</sup> [۶] راکتور مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می شود کلیه پارامترهای محاسبه شده با حاشیه خوبی در گستره مجاز قرار گرفته اند.

جدول ۲- نتایج آنالیز ترموهیدرولیک در مجتمع های سوخت راکتور تهران

Parameter	Results		Safety Criteria [۴]&[۶]
	SFE	CFE	
Margin to ONB	۲,۲۳	۲,۲۴۲	>۱,۳
Margin to DNB	۱۳,۲۲	۱۳,۲۳	>۲
Peak cladding temp. (°C)	۷۹,۲	۷۹,۰۷	<۱۰۵
Peak fuel temp. (°C)	۹۱,۶۵	۹۱,۴۷	<۶۵۰
Margin to OFI	۳,۹۶۹	۴,۰۱۱	>۲
Margin to T <sub>wall</sub> =۱۰۵ °C	۱,۷۳۵	۱,۷۴۱	>۱

نتایج آنالیز زیر کانال در مجتمع میله ای تحت آزمایش توسط کد COBRA به همراه دو پارامتر ایمنی ONB و DNB حاصل از برنامه واسط نوشته شده در MATLAB در جدول زیر آورده شده است. در این مجتمع نیز پارامترهای ایمنی در گستره مجاز قرار دارند.

جدول ۳- نتایج آنالیز ترموهیدرولیک زیر کانال در مجتمع میله ای تحت آزمایش

Parameter	Value	Safety Criteria
Mean fuel enthalpy (kJ/kg)	۳۵,۷۷۹	-
Mean fuel temperature (K)	۴۳۸,۰۶	-
Maximum fuel center temperature (K)	۶۳۱,۵	< ۳۱۴۰
Maximum clad inner surface temperature (K)	۳۵۴,۱	-
Maximum clad outer surface temperature (K)	۳۴۰,۲	< ۲۱۲۵
Maximum coolant temperature (K)	۳۱۵,۵۳	-
Channel mean pressure drop (kPa)	۵,۳۷۸	-
MDNBR	۷,۵۱۶۲	> ۲
ONBR	۳,۰۴۱۱	> ۱,۳

<sup>۱</sup> Operational limits and conditions





## ۴. نتیجه گیری

آنالیز ترموهیدرولیکی انجام گرفته بر روی چیدمان قلب مورد نظر برای تابش دهی سوخت مورد آزمایش و نتایج حاصل از آن نیز بیانگر این واقعیت است که هیچ یک از پارامترهای ترموهیدرولیکی از محدوده های مجاز فراتر نرفته و همگی با معیارهای ایمنی مطرح شده در OLC راکتور و مدارک آژانس بین المللی انرژی اتمی از جمله مرجع [۷] سازگاری دارند. در نتیجه می توان این مجتمع سوخت میله ای با غنای طبیعی را در قلب راکتور تهران تابش داده و برای تستهای پس از تابش دهی آماده نمود.

## ۵. مراجع

- [۱] P. Abbate, "User's manual of CAUDVAP V ۳,۶۰".
- [۲] P. Abbate, "User's manual of TERMIC v۴,۱".
- [۳] Liaquat Ali Khan, "Study of reactor design parameters", PhD thesis, university of Punjab, Lahore", ۱۹۹۹.
- [۴] TRR Final Safety Assessment Report.
- [۵] Dong Liu, et.al, "Prediction of the onset of nucleate boiling in microchannel flow", ۲۰۰۵, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume ۴۸, pp. ۵۱۳۴-۵۱۴۹.
- [۶] Operational Limits and Conditions (OLC's) of TRR, ۲۰۱۰.
- [۷] IAEA Safety Standards, "Safety of Research Reactors", Safety Requirements No. NS-R-۴.