



## طراحی و تحلیل ترموهیدرولیکی محفظه ویژه پرتودهی صفحات سوخت مینیاتوری

### در راکتور تحقیقاتی تهران

ابراهیم، عابدی\*؛ سیدمحمد، میروکیلی؛ امین، داوری؛ حسین، خلفی

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور

#### چکیده:

جهت انجام تست‌های *PIE*، یک محفظه جهت پرتودهی صفحات سوخت مینیاتوری در راکتور تهران طراحی و تحلیل شده است. این محفظه امکان تست صفحات سوخت مختلف بصورت مستقل و در برناپ‌های مختلف را میسر می‌سازد. در این تحقیق، با استفاده از بسته نرم‌افزاری *MTR-PC* محاسبات هیدرولیک از جمله دبی عبوری و افت فشار و سپس از روش *CFD* و با کمک نرم‌افزار *ANSYS-Fluent* مدل‌سازی و محاسبات انتقال حرارت و توزیع دما انجام شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در صورت تأمین دبی نامی مدار اولیه برابر با  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  و در نظر گرفتن توان  $5\text{MW}$ ، پارامترهای ایمنی برای هندسه طراحی شده برای محفظه مورد نظر بخوبی تأمین می‌گردد.

کلیدواژه: صفحات سوخت مینیاتوری (Miniplate)، ترموهیدرولیک، *CFD*، *PIE*.

#### ۱- مقدمه:

به منظور اطمینان یافتن از کارایی و دوام سوخت‌های تولید شده در هر مجتمع تولید سوخت هسته‌ای و تضمین کیفیت آنها، تست‌های مختلفی بر روی سوخت‌ها می‌بایست انجام گیرد [۱]. تست‌های پس از پرتودهی یا *PIE* (Post Irradiation Examination) گستره وسیعی از تست‌ها و آزمایشات مخرب و غیر مخرب را در بر می‌گیرد که پس از قراردادن سوخت در یک شرایط مشابه و حتی سخت‌تر از شرایط بهره‌برداری استاندارد آن، و پرتودهی سوخت تا یک برناپ مشخص و اندازه‌گیری پارامترهای مورد نظر انجام می‌پذیرد. [۲] در همین راستا برای سوخت‌های صفحه‌ای *MTR* از جنس  $\text{U}_2\text{O}_8/\text{Al}$  که در شرکت سوره و برای بهره‌برداری در راکتور تحقیقاتی تهران طراحی و تولید شده است قلب راکتور تحقیقاتی تهران جهت پرتودهی و انجام آزمایشات *PIE* انتخاب گردیده است.

از طرف دیگر، صفحات مینیاتوری سوخت (*Miniplate*) به دلیل داشتن مزیت‌های متعدد از جمله امکان قرارگیری کل صفحه در ناحیه ماکزیمم شار قلب و رسیدن به برناپ بالاتر در یک بازه زمانی کمتر، پرتودهی کمتر پتانسیل در زمان انجام تست‌های پس از پرتودهی، صرفه اقتصادی به جهت مصرف مواد اولیه

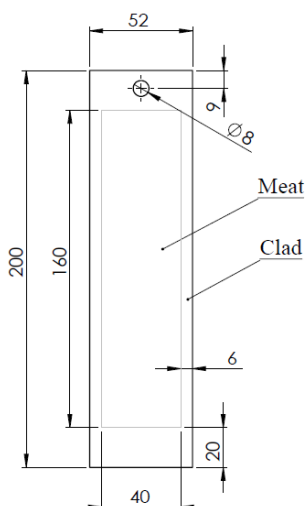


کمتر و نهایتاً تولید پسمان کمتر، امروزه در نقاط مختلف جهان برای تست گرم یا تست های مخرب و غیر مخرب پس از پرتو دهی مورد توجه قرار دارند[۳].

## ۲- روش انجام کار:

### ۲-۱- فرضیات طراحی:

طراحی یک مجتمع پرتو دهی جدید با مشخصات و هندسه متفاوت از مجتمع های استاندارد قلب نیازمند انجام محاسبات و مدل سازهای دقیق برای اطمینان از مقادیر رضایت بخش پارامترهای ایمنی در قلب است. به همین دلیل، در پروسه طراحی و ساخت مجتمع ویژه پرتو دهی صفحات مینیاتوری سوخت، پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیک برای این مجتمع می بایست محاسبه گردد. به همین منظور طراحی صورت گرفته در چیدمان قلب شماره ۵۶ تهران [۴] که در شکل ۱ نشان داده شده است، قرار داده شده و محاسبات هیدرولیکی و ترموهیدرولیک برای آن انجام شده است.



شکل ۲- ابعاد صفحه مینیاتوری طراحی شده

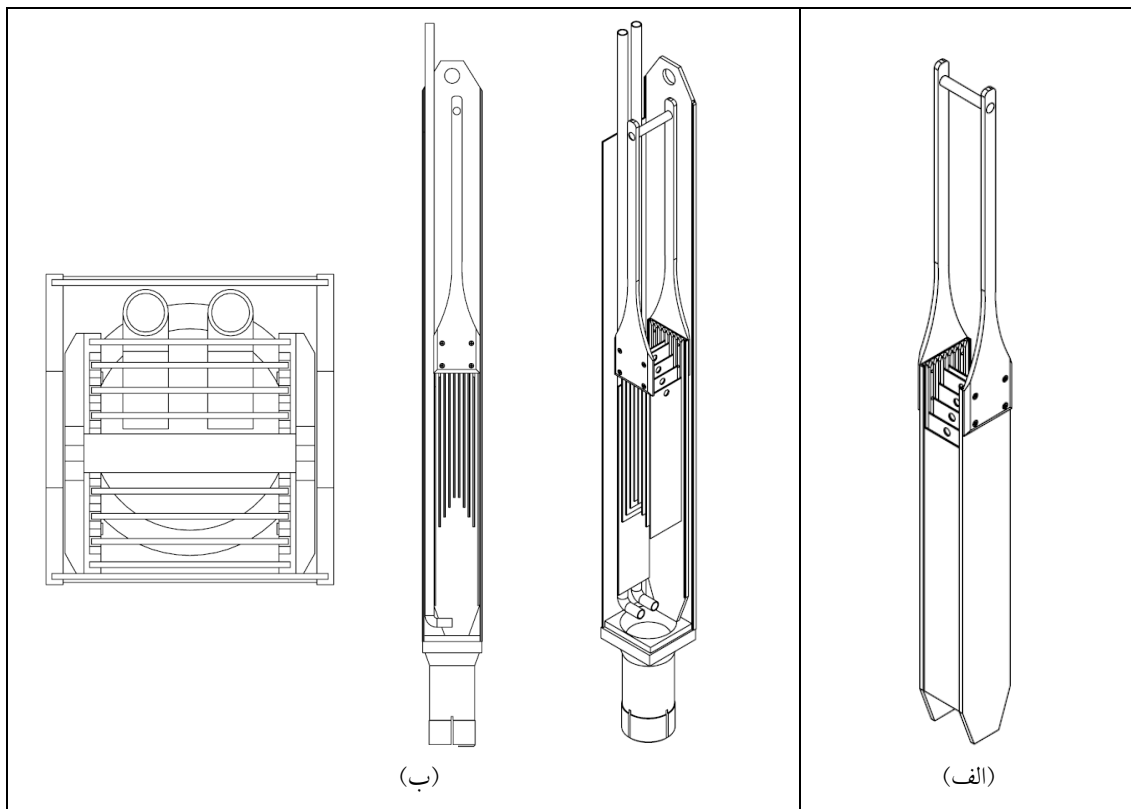
۹	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	GR-BOX
۸	SFE	CFE	SFE	SFE	SFE	SFE
۷	SFE	SFE	SFE	SFE	CFE	SFE
۶	SFE	CFE	SFE	IR-BOX	SFE	SFE
۵	SFE	SFE	SFE	SFE	CFE	SFE
۴	SFE	SFE	CFE	SFE	SFE	SFE
۳	SFE	SFE	SFE	IR-BOX	SFE	IR-BOX
۲	GR-BOX	GR-BOX	IR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
۱	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX	GR-BOX
	A	B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

شکل ۱- چیدمان قلب شماره ۵۶ راکتور تحقیقاتی تهران

### ۲-۲- توصیف مجتمع ویژه:

جهت بارگذاری ۸ عدد صفحه سوخت مینیاتوری به ابعاد هر یک  $200 \times 52 \times 1.5$  mm هشت شیار در داخل یک محفظه کوچک (Hoslter) ایجاد گردیده است. عرض شیارها جهت آسان تر شدن قرارگیری و بیرون کشیدن صفحات با لقی قابل ملاحظه ای نسبت به ضخامت صفحات مینیاتوری  $2/5$  میلی متر است و فاصله مرکز به مرکز شیارها  $6/5$  میلی متر در نظر گرفته شده است که در نتیجه فاصله متوسطی برابر  $5$  میلی متر بین صفحات سوخت ایجاد خواهد کرد که در واقع عرض کانال خنک کننده این مجتمع است. ابعاد سوخت (Meat) صفحات برابر  $160 \times 40 \times 0.7$  mm است و بنابراین یک حاشیه  $2$  سانتیمتری در بالا و پایین

صفحه و ۶ میلیمتری در طرفین از غلاف پر شده است. در حاشیه بالایی صفحه، در وسط و به فاصله ۹ میلیمتر از لبه بالایی یک سوراخ به قطر ۸ میلیمتر ایجاد شده تا بتوان از آن برای گذاشتن و برداشتن و حمل صفحه استفاده کرد. صفحات مینیاتوری سوخت به گونه ای طراحی شده اند که تمام مشخصات عملکردی و ساخت آن ها با صفحات استاندارد سوخت MTR یکسان باشند. شکل ۲ یک صفحه سوخت مینیاتوری را نشان داده است.



شکل ۳- الف) محفظه کوچک ویژه پرتودهی صفحات مینیاتوری ب) نحوه قرار گیری قرارگیری محفظه کوچک در محفظه پرتودهی استاندارد در نماهای مختلف

صفحات سوخت مینیاتوری به صورت کشویی و پلکانی به گونه ای که در شکل ۳- الف) نشان داده شده است، در داخل محفظه کوچک قرار گرفته اند. فاصله ارتفاعی هر یک از پله ها ۱۳mm است. این نوع قرارگیری نیز به جهت سهولت در جایگذاری و برداشتن سوخت ها در نظر گرفته شده است. مجتمع سوخت کوچک برای قرارگیری در داخل قلب، داخل یک محفظه بزرگتر قرار می گیرد که ابعاد داخلی و خارجی آن کاملاً مشابه محفظه های استاندارد پرتودهی نمونه قلب راکتور است. تنها تفاوت آن دو لوله هریک به قطر ۱۰ mm است که در داخل محفظه و در کنار یک ضلع جانبی آن نصب شده و برای نمونه گیری آنلاین از سیال خروجی از محفظه ویژه و همچنین فرستادن ابزار اندازه گیری مانند ترموکوپل استفاده می شود. شکل ۳- ب) نحوه قرارگیری مجتمع کوچک در محفظه و لوله های نصب شده در داخل آن را در نماهای مختلف نشان می



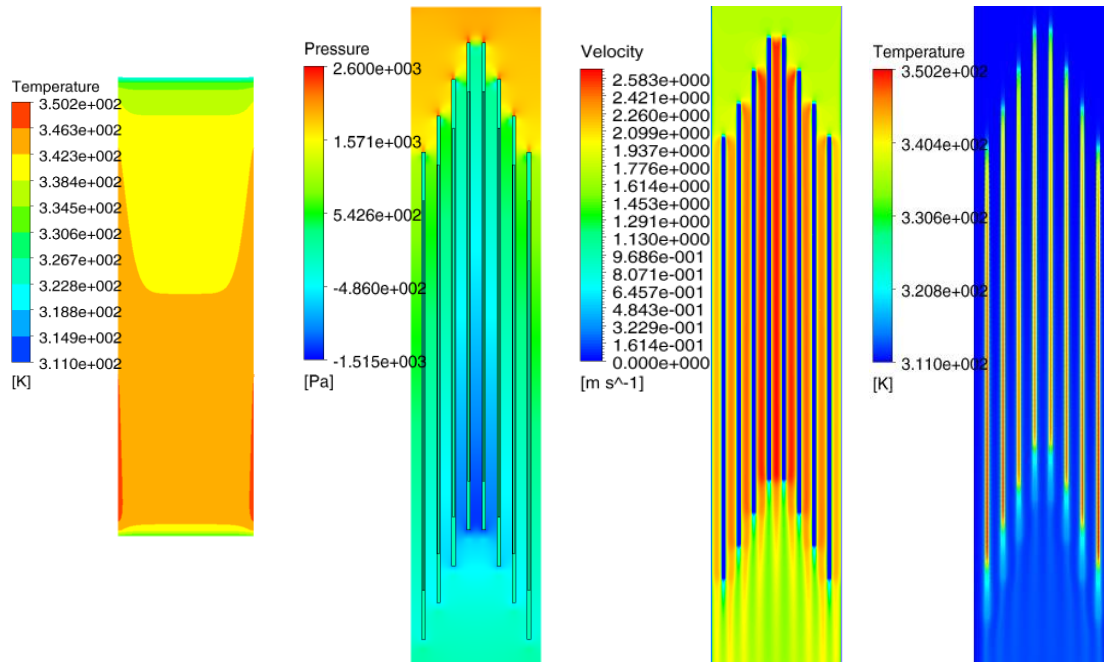
دهد و ارتفاع محفظه کوچک و ارتفاع قرارگیری صفحات مینیاتوری در داخل آن طوری محاسبه شده که بعد از نشستن مجتمع کوچک در داخل محفظه بزرگ فاصله پایین ترین نقطه صفحات تا کف محفظه بزرگ برابر ۱۶۸mm بوده و در واقع صفحات مینیاتوری در محدوده شار ماکزیمم کانال D۶ قرار گیرند.

### ۲-۳- مشخصات قلب مرجع:

همانگونه که شکل ۲ نشان می‌دهد قلب شماره ۵۶ تهران که به عنوان قلب میزبان مجتمع ویژه پرتودهی انتخاب شده است و پارامترهای نوترونیک و هیدرولیک آن برای محاسبات استفاده شده است از ۲۸ مجتمع سوخت استاندارد (SFE) و ۵ مجتمع سوخت کنترل (CFE) تشکیل شده است. این قلب همچنین دارای ۵ موقعیت پرتودهی است که موقعیت پرتودهی D<sup>۶</sup> به دلیل داشتن بیشترین شار نوترون برای قرارگیری مجتمع ویژه در نظر گرفته شده است. دبی کل خنک کننده عبوری از قلب برابر  $500 \text{ m}^3/\text{h}$  و دبی نامی مدار اولیه TRR در نظر گرفته شده است. قدرت راکتور برابر ۵ MW و ضرایب قله قدرت شعاعی محوری. کل نیز به ترتیب ۱/۷، ۱/۳، ۲/۸ در نظر گرفته شده است. دمای خنک کننده ورودی به مجتمع ویژه براساس داده‌های مرجع SAR تهران ۳۸/۷ درجه سانتیگراد فرض شده است [۵].

### ۲-۴- کدهای محاسباتی:

برای انجام محاسبات هیدرولیک، از کد Caudvap v۴۰ از بسته نرم‌افزاری MTR-PC استفاده شده است [۶]. کد Caudvap جهت انجام محاسبات افت فشار، دبی و سرعت در داخل قلب راکتورهای تحقیقاتی کاربرد دارد که با حل معادله‌های برنولی و دارسی در کانال‌های موازی به تعیین پارامترهای هیدرولیک در قلب می‌پردازد. محاسبات ترموهیدرولیک نیز با استفاده از دو نرم افزار صورت می‌گیرد. کد Termic از مجموعه نرم‌افزاری MTR-PC [۷] و همچنین نرم افزار ۱۴,۰ ANSYS-Fluent [۸] به تعیین پارامترهای دما و توزیع آن در مجتمع ویژه سوخت‌های مینیاتوری می‌پردازد. کد Termic یک کد محاسباتی تک بعدی است که معادلات انرژی و مومنتوم را در یک کانال حل می‌نماید. از آنجایی که Termic به طور ویژه برای محاسبه پارامترهای ایمنی ترموهیدرولیکی مهم چون ONB، DNB و OFI در قلب راکتورهای تحقیقاتی طراحی و توسعه یافته است، به منظور تعیین این پارامترها در کانال‌های مجتمع‌های ویژه صفحات مینیاتوری استفاده شده است. از طرف دیگر، کد Termic توزیع دما در یک کانال خاص را می‌دهد و از حل دقیق و سه بعدی کل مجتمع ناتوان است. از این رو، جهت اطمینان از صحت نتایج و داشتن یک مدل سه بعدی دقیق از توزیع جریان و دما در کل کانال‌های مجتمع از نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS-Fluent استفاده گردیده است. در کد Termic مقدار شار ماکزیمم در کانال برابر  $33/8 \text{ W/cm}^2$  و در نرم افزار ANSYS با فرض شار یکسان در کل طول صفحات مینیاتوری سوخت شار حرارتی حجمی ثابت  $928 \text{ W/cm}^3$  برای کل حجم اورانیوم دار صفحات در نظر گرفته شده است.



شکل ۴- کانتورهای دما، فشار و سرعت حاصل از مدل‌سازی جریان در مجتمع ویژه پرتو دهی صفحات مینیاتوری

### ۳- نتایج محاسبات و شبیه سازی:

بر اساس محاسبات هیدرولیک میزان سرعت متوسط خنک‌کننده در ورودی مجتمع  $1/7 \text{ m/s}$  و در مقطع بین کانال‌ها  $2/18 \text{ m/s}$  است. جدول شماره ۱ مقادیر پارامترهای هیدرولیک و ترموهیدرولیک حاصل از کدهای Caudvap و Termic در مجتمع ویژه صفحات مینیاتوری و مقایسه آن با مجتمع استاندارد سوخت در همان چیدمان قلب را نشان می‌دهد. محاسبات در دو حالت با در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت و بدون در نظر گرفتن آنها محاسبه و همانگونه که دیده می‌شود در هر دو حالت پارامترهای ایمنی قلب بخوبی برآورده می‌گردد. شکل ۵ نیز نتایج ANSYS توزیع سرعت و دما و افت فشار در مجتمع طراحی شده نشان می‌دهد.

### ۴- بحث و نتیجه گیری:

نتایج حاصل از تحلیل ترموهیدرولیک مجتمع ویژه پرتو دهی صفحات مینیاتوری در نرم‌افزارهای مختلف که در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است نمایانگر این است که مجتمع طراحی شده قادر است با حفظ حاشیه‌های ایمنی با ضریب اطمینان خوبی به پرتو دهی صفحات مینیاتوری در شار ماکزیمم قلب راکتور تهران بپردازد.





جدول ۱- مقایسه پارامترهای ترموهیدرولیک صفحات سوخت مینیاتوری و استاندارد در قلب ۵۶ راکتور تهران.

حد پذیرش	مقادیر		پارامترها
	در مجتمع استاندارد	در مجتمع ویژه	
-	۳۳/۸	۳۳/۸	ماکزیم شار حرارتی ( $w/cm^2$ )
-	۱/۱۹	۲/۱۸	سرعت متوسط در کانال سوخت (m/s)
-	۴/۸۷	۴/۸۷	افت فشار متوسط قلب (kPa)
-	۵۱/۲	۳۹/۵	ماکزیم دمای خنک‌کننده بدون در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت) °C
۱۰۵>	۷۱/۴	۷۵/۶	ماکزیم دمای غلاف بدون در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت (°C)
۵۵۰>	۷۸/۰	۸۲/۶	ماکزیم دمای سوخت بدون در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت (°C)
-	۵۵/۰	۴۱/۲	ماکزیم دمای خنک‌کننده با در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت (°C)
۱۰۵>	۷۷/۷	۸۳/۳	ماکزیم دمای غلاف با در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت (°C)
۵۵۰>	۸۴/۲	۸۹/۹	ماکزیم دمای سوخت با در نظر گرفتن ضرایب عدم قطعیت (°C)
۱<	۱/۸۱	۱/۹۱	حاشیه دمای °C ۱۰۵ غلاف
۱/۳<	۲/۴	۲/۵۸	[Y]ONB
۲<	۱۰/۲	۱۰/۷	[Y]DNB رابطه Mirshak
	۵/۶	۱۲/۵	رابطه Bernarth
۲<	۳/۹۸	۹/۶	[Y]OFI

#### ۵- مراجع:

- [۱] Y.B. Chun, et al., "Underwater Fuel Inspection For Irradiated LWR Fuels In Korea".
- [۲] J. E. R. Silva, et al., "Application of Non-Destructive Methods for Qualification of High Density Duels In the IEA-R۱ Reactor", Brazil, ۲۰۱۰.
- [۳] J. E. R. Silva, D. B. Domingos, A. T. Silva, "Fuel Miniplate Thickness Measurement System For Dispersion Fuel Swelling Evaluation", International Nuclear Atlantic Conference-INAC, ۲۰۰۹.
- [۴] TRR Operation Division, "Logbook No. ۴۰", Atomic Energy Organization of Iran, ۲۰۱۰.
- [۵] AEOI, "Safety Analysis Report for Tehran research reactor", Nuclear Centre Research Reactor, ۲۰۰۹.
- [۶] Roup Teorico PMA, SOP, "CAUDVAP V۳,۶: a computer program for Flow Distribution calculations through different types of channels in MTR type cores", INVAP S.E., Nuclear Engineering Division, Argentina, ۲۰۰۳.
- [۷] P Abbate, " TERMIC MODE ۴.۱: A program for the calculus and thermal-hydraulic design of research reactor cores", INVAP S.E., Nuclear Engineering Division, Argentina, ۲۰۰۳.
- [۸] ANSYS, "ANSYS CFD-Solver Manager User's Guide" Release ۱۴,۰, ۲۰۱۲.