

## تحلیل ترموهیدرولیک مدار خنک کننده یک راکتور تحقیقاتی پیشرفته ۲۰ مگاواتی با جریان خنک کننده بالارونده در قلب

ابراهیم عابدی، امین داوری، سید محمد میروکیلی، افشین هدایت

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

### چکیده

یکی مهمترین پارامترها در طراحی و تحلیل ایمنی راکتورهای تحقیقاتی با چگالی توان بالا، تعیین مقادیر دبی و دمای بهینه سیال خنک کننده ورودی به قلب راکتور می باشد. در این مقاله این مقادیر برای یک راکتور ۲۰ مگاواتی پیشرفته با یک قلب فشرده و چگالی توان بالا با استفاده از محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیک مانند  $DNBR$  و  $ONB$  در جریان‌ها و دماهای مختلف و با در نظر گرفتن محدودیت های ایجاد شده در اثر افت فشار شدید و بارهای هیدرودینامیکی وارد شده بر ساختار قلب بررسی و بهترین مقادیر انتخاب شده است.

واژه‌های کلیدی: راکتورهای تحقیقاتی پیشرفته، تحلیل ترموهیدرولیک، جریان بالارونده،  $DNBR$ ،  $ONB$

### ۱- مقدمه

امروزه بیش از ۲۴۰ راکتور تحقیقاتی فعال در بیش از ۵۶ کشور جهان وجود دارد [۱]. دسته‌ای از راکتورهای تحقیقاتی که در آن‌ها آب سبک نقش کندکننده و خنک کننده را دارد، از سوخت های صفحه‌ای استفاده کرده و در اصطلاح راکتورهای تست مواد<sup>۱</sup> یا  $MTR$  نامیده می شوند بیشترین تعداد راکتورهای تحقیقاتی را در بر می‌گیرد. [۲]. بسته‌ی سوختی در این راکتورهای تحقیقاتی آلیاژ یکی از ترکیبات اورانیوم (اکسید، سلیساید یا مولیبدناید) و اغلب از غلاف با جنس آلومینیوم است؛ [۳]. سطح بیشتر انتقال حرارت به ازای واحد جرم سوخت در سوخت صفحه‌ای نسبت به سوخت‌های میله‌ای و در نتیجه امکان دستیابی به شار نوترونی بالاتر با سوخت صفحه‌ای، دلیل اصلی علاقه به استفاده از سوخت صفحه‌ای در راکتورهای تحقیقاتی است. همچنین از آنجایی که دمای کاری سیکل خنک کننده به طور معمول در راکتورهای تحقیقاتی بسیار پایین تر از راکتورهای قدرت است، می‌توان از فلز آلومینیوم که هدایت حرارتی بالا و جذب نوترونی پایین تری نسبت به زیرکونیوم و فولاد دارد به عنوان ساختار نگهدارنده قلب و بسته سوخت استفاده کرد.

در این پژوهش پارامترهای ترموهیدرولیک سیستم خنک کننده یک راکتور تحقیقاتی با توان حرارتی ۲۰ مگاوات و از نوع استخری که بسته های سوخت آن در با استفاده از یک صفحه مشبک<sup>۲</sup> آلومینیومی کنار هم ثابت می شوند، طراحی و تحلیل می‌گردد. بسته سوخت دارای آرایش موازی از صفحات سوختی مسطح

<sup>1</sup> Materials Testing Reactor (MTR)

<sup>2</sup> Grid Plate

می‌باشد (شکل ۱-الف). تعداد مجاز و نحوه آرایش بسته‌های سوختی در قلب بستگی به ضرایب ایمنی نوترونیک و همچنین محدودیت‌های عملکردی ترموهیدرولیک دارد. یکی از جنبه‌های مهم طراحی ترموهیدرولیک قلب راکتورهای هسته‌ای، تعیین میزان بهینه توزیع جریان و افت فشار عبوری از قلب راکتور می‌باشد. به عبارت دیگر، نرخ جریان خنک کننده بالاتر منجر به انتقال حرارت بهتر و بهبود آستانه‌ی مجاز شار حرارتی بحرانی<sup>۱</sup> می‌شود. از طرف دیگر سرعت خنک کننده بالاتر باعث افزایش افت فشار عبوری از قلب راکتور می‌گردد و در نتیجه توان مورد نیاز پمپ و نیروهای هیدرودینامیکی وارد شده بر روی قطعات افزایش می‌دهد. بنابراین، بررسی هیدرودینامیک و ترموهیدرولیک جریان قلب در یافتن شرایط مناسب عملکردی راکتور از نظر ایمنی و همچنین صرفه اقتصادی آن، نقش بسیار مهمی را در طراحی ایفا می‌نماید. در اینجا قلب راکتور با استفاده از سوخت صفحه‌ای از جنس سیلیساید اورانیوم که در ادامه مشخصات آن تشریح می‌شود، بارگذاری گردیده و محاسبات ترموهیدرولیکی قلب راکتور در نرخ جریان‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد تا تأثیر آن بر روی پارامترهای مختلف ایمنی از دیدگاه ترموهیدرولیک از جمله نقطه شروع جوشش هسته‌ای<sup>۲</sup> (ONB) مشخص و در نهایت جریان مناسب برای آرایش قلب مورد نظر تعیین گردد.

## ۲- معرفی سوخت صفحه‌ای سیلیساید اورانیوم

سوخت سیلیساید به علت دارا بودن ماکزیمم چگالی اورانیوم و خواص عالی حفظ استحکام و یکپارچگی آن تحت شرایط بهره‌برداری در شار نوترونی بالا، در سالیان اخیر به طور گسترده‌ای برای استفاده در راکتورهای تحقیقاتی مورد توجه قرار گرفته است. این سوخت برای اولین بار در سال ۱۹۹۸ توسط در آمریکا برای راکتورهای تحقیقاتی به کار برده شد [۴] و تاکنون در بیش از بیست راکتور پیشرفته در سراسر جهان مورد استفاده قرار گرفته است [۵]. یکی از این راکتورها راکتور در استرالیا می‌باشد که با توان ۲۰ مگاوات و شار نوترونی ماکزیمم  $4e14$  یکی از کارآمدترین و پیشرفته‌ترین راکتورهای تحقیقاتی دنیا می‌باشد. لایه‌ی مرکزی صفحه‌ی سوخت به نام رایج Meat، از آلیاژی که ترکیبی از سیلیساید اورانیوم و آلومینیوم ( $U_3Si_2-Al$ ) است تشکیل شده و توسط دو لایه غلاف نازک آلومینیومی در دو سمت ساندویچ شده است (شکل ۱-ب). خواص فیزیکی و مشخصات هندسی این بسته‌ی سوخت در جدول ۱ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Critical Heat Flux (CHF)

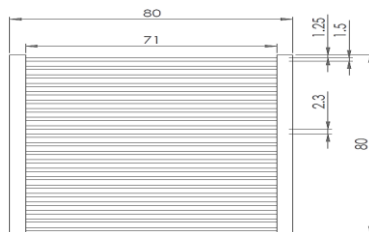
<sup>2</sup> Onset of Nucleate Boiling (ONB)

### ۳- طراحی پایه

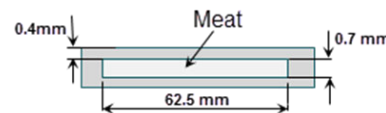
به منظور تأمین حدود مجاز پارامترهای ایمنی در شرایط بهره برداری پایا<sup>۱</sup> و تأمین ایمنی در حوادث و شرایط گذرا<sup>۲</sup>، محدودیت هایی در طراحی ترموهیدرولیک قلب به کار گرفته می شود که دارای حاشیه خوبی نسبت به آستانه ای ایمنی باشند (جدول ۲).

جدول ۱- خواص فیزیکی و مشخصات هندسی مجتمع سوخت  $U_3Si_2 - Al$

مشخصات هندسی		خواص فیزیکی	
مقدار	متغیر	مقدار	متغیر
۲۱	تعداد صفحات سوخت	$۲۷ g/cm^3$	چگالی آلومینیوم
$۰/۱۵ cm$	ضخامت کل صفحه سوخت	$۱۲/۲ g/cm^3$	چگالی سیلیساید
$۰/۰۷ cm$	ضخامت Meat	$۴/۸ g/cm^3$	چگالی اورانیوم در داخل Meat
$۰/۰۴ cm$	ضخامت Clad	$۶/۵ g/cm^3$	چگالی Meat
$۰/۲۳ cm$	ضخامت کانال عبور آب	$۰/۳ W/cm.C$	ضریب هدایت حرارتی Meat
$۷/۱ cm$	پهنای کانال جریان	$۱/۸ W/cm.C$	ضریب هدایت حرارتی Clad
		AL 6061	جنس Clad



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمایی از بسته سوخت  $U_3Si_2 - Al$ ؛ (الف) برش عرضی و ابعاد مجتمع سوخت (ب) ابعاد یک صفحه سوخت

جدول ۲- مقادیر پارامترهای عملکردی و ایمنی در نظر گرفته شده برای راکتور جهت طراحی ترموهیدرولیک جریان خنک کننده [۶]

ضریب بیشینه توان <sup>۳</sup>	نسبت سرعت ماکزیمم به سرعت بحرانی	ضریب ایمنی ONB	ضریب ایمنی DNBR <sup>۴</sup>	ماکزیمم دمای clad (C)
$۳ \geq$	$۰/۶۶ \geq$	$۱/۳ \leq$	$۲ \leq$	۱۰۵

### ۴- توصیف هندسی قلب راکتور

آرایش یا چیدمان قلب<sup>۵</sup> با چینش مناسب بسته های سوخت براساس محاسبات نوترونیک با هدف تأمین شار نوترونی مناسب و استفاده اقتصادی بهینه از محتوی سوخت مشخص می گردد. در اینجا آرایش نهایی قلب راکتور ۲۰ مگاواتی در شکل ۲ نشان داده می شود. همانطور که از شکل ۲ مشخص است، این چیدمان با

<sup>۱</sup> Steady State Operation

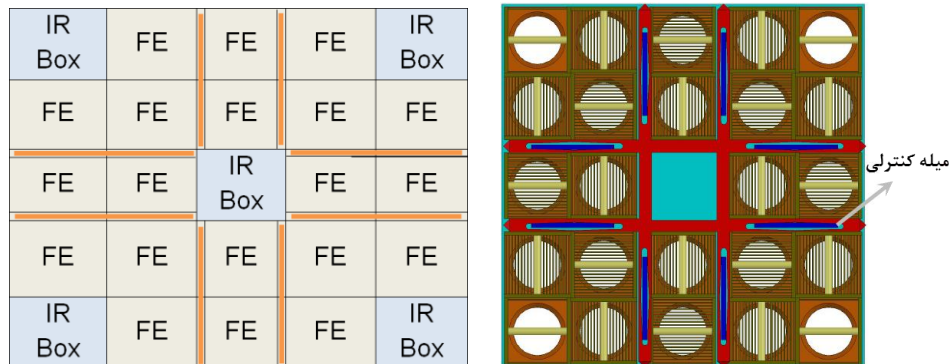
<sup>۲</sup> Transient

<sup>۳</sup> Power Peaking Factor (PPF)

<sup>۴</sup> Departure from Nucleate Boiling ratio (DNBR)

<sup>۵</sup> Core Configuration

استفاده از تنها ۲۰ بسته سوخت برای تولید ۲۰ مگاوات طراحی شده که یک قلب بسیار فشرده بوده و شرایط برداشت حرارت و خنک‌کنندگی پیشرفته‌ای را طلب می‌کند. همچنین ۸ تیغه جاذب به عنوان میله‌های کنترل در میان بسته‌های سوخت وارد می‌شود.



شکل ۲- چیدمان قلب راکتور ۲۰ مگاوات با ۲۰ بسته سوخت

## ۵- مدل ترموهیدرولیکی

محاسبات ترموهیدرولیک با استفاده از بسته MTR-PC [۷] انجام می‌شود که یک پکیج ویژه جهت انواع محاسبات نوترونیک، ترموهیدرولیک و شیلدینگ راکتورهای MTR و توسط شرکت INVAP آرژانتین طراحی و توسعه داده شده است. در این پژوهش از دو کد از بخش ترخوهیدرولیک این پکیج استفاده می‌گردد. قسمت اول شامل محاسبات هیدرولیکی با استفاده از کد CAUDVAP و در قسمت دوم از کد TERMIC جهت تحلیل پارامترهای ترموهیدرولیک بهره گرفته می‌شود. نرخ اتلاف حرارتی راکتور و نیروهای دینامیکی قلب و قسمت‌های داخلی آن، به شدت به رفتار جریان در سیستم وابسته است. محاسبات هیدرولیک با در نظر گرفتن مشخصات جدول ۳ برای قلب و جریان خنک‌کننده، در چند دبی مختلف انجام شده است.

جدول ۳- مقادیر ورودی پارامترهای جریان خنک‌کننده در محاسبات هیدرولیکی قلب راکتور

نرخ جریان (m <sup>3</sup> /h)	جهت جریان	تعداد بسته‌های سوخت	تعداد صفحات سوخت در هر بسته	دمای ورودی خنک‌کننده (°C)
۲۰۰۰-۲۲۰۰-۲۴۰۰	رو به بالا	۲۰	۲۱	۳۸-۴۰

جهت جریان در قلب راکتور مورد نظر رو به بالا<sup>۱</sup> است (شکل ۳) زیرا جهت جریان بالارونده در قلب باعث پدید آمدن پارامترهای ترموهیدرولیکی بهتر در مقایسه با جریان روبه پایین است. کد TERMIC دارای رفتاری آماری و افزایشنده از ضرایب عدم قطعیت می‌باشد. عدم قطعیت‌ها ممکن است به علت ساخت، اندازه‌گیری یا مربوط به محاسبات باشد. اطلاعات بیشتر این برنامه و نحوه محاسبات و ورود اطلاعات دمایی و هندسی را می‌توان در مرجع [۷] مشاهده نمود.

<sup>1</sup> Upward



شکل ۳- جهت جریان رو به بالا در عبور از کانال های مجتمع های سوختی راکتور ۲۰ مگاواتی مورد نظر

## ۶- بحث روی نتایج

نتایج این تحلیل در در جدول ۴ ارائه شده است. همانگونه که در جدول ۴ مشاهده می شود یک از پارامترهای مهم بر روی ایمنی دمای سیال ورودی به قلب است. تأثیر افزایش دو درجه‌ای دمای ورودی باعث کاهش ۳ درصدی در پارامتر ONB می گردد. با این وجود آستانه مجاز ۱/۳ برای ONB در این محاسبات حفظ شده است. دمای غلاف پارامتر مهم دیگری است که با توجه به تسریع نرخ خوردگی سطح غلاف در دماهای بالای ۱۱۰ درجه مشاهده می شود که برای دمای ورودی ۴۰ درجه و دبی سیال ۲۰۰۰ مترمکعب بر ساعت بسیار به شرایط بحرانی نزدیک شده است.

بنابراین با بررسی نتایج می توان حداقل دبی ۲۲۰۰ مترمکعب بر ساعت را برای ارضای تمامی حدود ایمنی قلب در این طرح در نظر گرفت با این وجود در صورت انتخاب دبی ۲۴۰۰ مترمکعب بر ساعت حاشیه ایمنی بیشتری در شرایط گذرا وجود خواهد داشت.

از طرف دیگر با توجه به مقادیر افت فشار در جدول ۴ مشاهده می شود که با افزایش دبی میزان افت فشار به شدت افزایش یافته و علاوه بر نیاز توان پمپ قوی تر نیروی هیدرودینامیک وارد بر ساختار قلب و بسته های سوخت را به همین میزان افزایش می دهد. در نهایت با در نظر گرفتن تمام پارامترها می توان گفت دبی ۲۲۰۰ به دبی بهینه برای خنک کاری این قلب فشرده نزدیکترین مقدار است.

## ۷- جمع بندی

در این مقاله طراحی مفهومی سیستم های اصلی یک راکتور تحقیقاتی ۲۰ مگاواتی توضیح داده شد و تحلیل ترموهیدرولیکی قلب راکتور به کمک مجموعه‌ی MTR-PC صورت پذیرفت. یک جنبه مهم طراحی قلب راکتور تعیین میزان توزیع بهینه جریان خنک کننده و افت فشار عبوری از قلب می باشد. نتایج بدست آمده

در دبی های متفاوت نشان داد که از بین مقادیر در نظر گرفته شده دبی ۲۲۰۰ مترمکعب بر ساعت و دمای ورودی ۳۸ درجه سانتیگراد مناسب ترین مقادیر برای جریان سیال خنک کننده قلب فشرده این راکتور است.

جدول ۴. نتایج محاسبات ترموهیدرولیکی قلب برای توان ۲۰ مگاوات و استفاده از سوخت  $U_3Si_2 - Al$

متغیرها	آرایش قلب						
	۲۰ بسته سوخت						
میانگین شار حرارتی بر حسب ( $W/cm^2$ )	۶۱/۹						
ماکزیمم شار حرارتی ( $W/cm^2$ )	۱۸۵/۸۳						
جهت جریان	بالا						
دمای ورودی ( $^{\circ}C$ )	۳۸			۴۰			
نرخ جریان کل ( $m^3/hr$ )	۲۰۰۰	۲۲۰۰	۲۴۰۰	۲۰۰۰	۲۲۰۰	۲۴۰۰	
سرعت خنک کننده ( $m/s$ )	۷/۴۵۴	۸/۲	۸/۹۴۶	۷/۴۵۴	۸/۲	۸/۹۴۶	
افت فشار قلب ( $kPa$ )	۱۳۲/۷	۱۵۸/۱	۱۸۵/۶	۱۳۲/۷	۱۵۸/۱	۱۸۵/۶	
دمای خنک کننده در قسمت خروجی کانال ( $^{\circ}C$ )	۶۴/۷	۶۲/۳	۶۰/۴	۶۶/۷	۶۴/۳	۶۲/۴	
دمای ماکزیم ( $^{\circ}C$ )	clad	۱۰۹/۱	۱۰۴/۳	۱۰۰/۳	۱۱۰/۷	۱۰۵/۹	۱۰۱/۸
	meat	۱۲۴/۶	۱۱۹/۸	۱۱۵/۸	۱۲۶/۱	۱۲۱/۴	۱۱۷/۴
ضریب ONB	۱/۳۸	۱/۵۱	۱/۶۴	۱/۳۵	۱/۴۸	۱/۶۱	
ضریب DNB	MIRKSHARK	۲/۴۲۷	۲/۵۶۷	۲/۷۰۶	۲/۳۹۸	۲/۵۳۷	۲/۶۷۴
	BERNARTH	۲/۹۱۲	۳/۲۱۹	۳/۵۲۲	۲/۸۴۹	۳/۱۵۱	۳/۴۴۸
ضریب ایمنی Sudo	۲/۶۸۳	۲/۷۹۱	۲/۸۹۵	۲/۶۵۵	۲/۷۶۳	۲/۸۶۷	
ضریب OFI	۲/۳۰۵	۲/۵۲۲	۲/۷۳۱	۲/۲۴۲	۲/۴۵۴	۲/۶۵۶	

## ۸- مراجع

- [1] Erik Henriksen, "Thermal hydraulic feasibility of upgrading the JEEP II heavy water research reactor from 2 to 5 MW", Department of Mathematical Sciences and Technology, Master Thesis 30 credits 2013.
- [2] A. M. Saliba-Silva, E. F. Urano de Carvalho, H. G. Riella<sup>2</sup> and M. Durazzo, "Research Reactor Fuel Fabrication to Produce Radioisotopes", Nuclear Fuel Center of Nuclear and Energy Research Institute Brazilian Commission of Nuclear Energy, São Paulo.
- [3] G. M. Adamson, "Fabrication of research reactor fuel elements", Paper presented at the AEC Industry Meeting, Water Reactor Fuel Element Technology, 1968, Washington, D. C.
- [4] U. S. Nuclear Regulatory Commission, 1988.
- [5] RRR SAR, Chapter 5b, "Reactor fuel assemblies".
- [6] AEOI, "Tehran Research Reactor amendment to the safety report", 1989.
- [7] Eduardo Villarino, Carlos Lecot, "Reactor calculation code", INVAP S.E., Nuclear Engineering Division, Argentina, 2006.