



بررسی جابجایی طبیعی سیال با خواص متغیر در راکتور مینیاتوری چشمه نوترون اصفهان

اسماعیل، قهرمانی، جمشید، خورسندی*؛ مسعود، احمدی؛ جواد، عبادتی اصفهانی

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

چکیده:

جابجایی طبیعی پدیده اصلی و غالب در انتقال حرارت راکتور مینیاتوری می‌باشد. در این مطالعه، جابجایی طبیعی در راکتور مینیاتوری اصفهان با نرم‌افزار فلونت شبیه‌سازی شده و مورد بررسی قرار گرفته است. خواص سیال متناسب با دما و شار حرارتی قلب راکتور متناسب با شار نوترونی کانال خشک و ثابت با زمان در نظر گرفته شده است. نرخ جریان جرمی سیال در شبیه‌سازی با استفاده از سیال با خواص متغیر، تقریباً ۱۵ درصد بیشتر از نرخ آن با خواص سیال ثابت است و روند رو به افزایش دارد. تفاوت دمای سیال ورودی به قلب و خروجی از آن نشان می‌دهد که نتایج شبیه‌سازی سیال با خواص متغیر با دما با داده‌های تجربی تطابق دارد.

واژه‌های کلیدی: جابجایی طبیعی، انتقال حرارت، فلونت، راکتور مینیاتوری اصفهان

مقدمه

راکتور مینیاتوری چشمه نوترون اصفهان^۱، راکتور تحقیقاتی کم توان با غنای بالای اورانیوم به عنوان سوخت، آب سبک به عنوان کندکننده و خنک‌کننده و محافظ و برلیم به عنوان بازتابنده است (شکل ۱). در توان اسمی ۳۰ کیلو وات شار نوترونی در کانال تابش داخلی که در بازتابنده جانبی قرار دارد، حدود 10^{12} نوترون بر سانتیمتر مربع بر ثانیه است. راکتور توسط انستیتو انرژی اتمی چین ساخته شده است و کاربرد آن برای آنالیز به روش فعالسازی نوترونی، آموزش و تولید رادیویزوتوپ است [۱]. راکتور به گونه‌ای طراحی شده است که نسبت کندکننده (هیدروژن) به سوخت (اورانیوم) برابر با ۱۹۷ است. قلب راکتور زیرکندشونده^۲ است و به علت ضریب راکتیویته منفی دمایی، این راکتور به طور ذاتی ایمن است. علاوه بر آن گردش طبیعی سیال درون آن به ایمنی آن می‌افزاید. از این رو تحقیقات بسیاری در مورد انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون راکتور مینیاتوری صورت گرفته است [۲-۴].

^۱ MNSR

^۲ Under moderated



عبدل بسیط^۱ و همکاران [۳] معادلات ناویر استوکس را برای راکتور تحقیقاتی پاکستان (۲-PARR) را به دست آورده‌اند و جملات کم اهمیت را در معادلات حذف کردند. آنها نتایج شبیه‌سازی خود را با داده‌های راکتور در توان‌های مختلف مقایسه کردند. در این مطالعه همچنین نتایج دمای سطح غلاف و دمای مرکز سوخت در شار حرارتی مختلف نیز آورده شده است. عمر^۲ و همکاران [۵] با کد ریلپ^۳ رفتار ترموهیدرولیکی راکتور مینیاتوری سوریه را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی از قلب محاسبه شده و نتایج شبیه‌سازی با داده‌های راکتور و با نمودار حاصل از شبیه‌سازی با کد ATHLET مقایسه شده است. کد ترموهیدرولیکی ریلپ در مطالعات فراوانی در مورد راکتورهای تحقیقاتی استفاده شده است [۶-۸].

در این مطالعه، گردش طبیعی سیال در راکتور مینیاتوری اصفهان با استفاده از نرم‌افزار فلونت^۴ برای سیال با خواص متغیر با دما و ثابت با دما بررسی گردیده است. گمبیت^۵ نرم‌افزاری برای رسم هندسه جریان و شبکه‌بندی آن در دو و سه بعد است. این نرم‌افزار هندسه جریان را برای ورود به نرم‌افزار فلونت آماده می‌کند. از فلونت برای گسسته‌سازی معادلات ناویر-استوکس حاکم بر سیال استفاده می‌شود و پس از حل معادلات به روش‌های عددی، اطلاعات ترموهیدرولیکی برای کل قلب و محفظه راکتور به دست می‌آید.

روش کار

رسم هندسه جریان و شبکه‌بندی آن با نرم‌افزار گمبیت

شکل ۱ هندسه جریان سیال درون مخزن و قلب راکتور مینیاتوری اصفهان را نشان می‌دهد. به‌علت تقارن تقریبی مخزن راکتور، یک‌چهارم از مخزن راکتور با نرم‌افزار گمبیت رسم شده است و شبکه‌بندی گردیده است. برای دقت بیشتر اریفیس ورودی و خروجی جریان، گریدپلیت^۶، میله‌های سوخت و ورودی و خروجی جریان با دقت رسم شده و از شبکه‌های ریزتری برای مش بندی قسمت‌های کلیدی استفاده شده است.

^۱ Abdul Basit

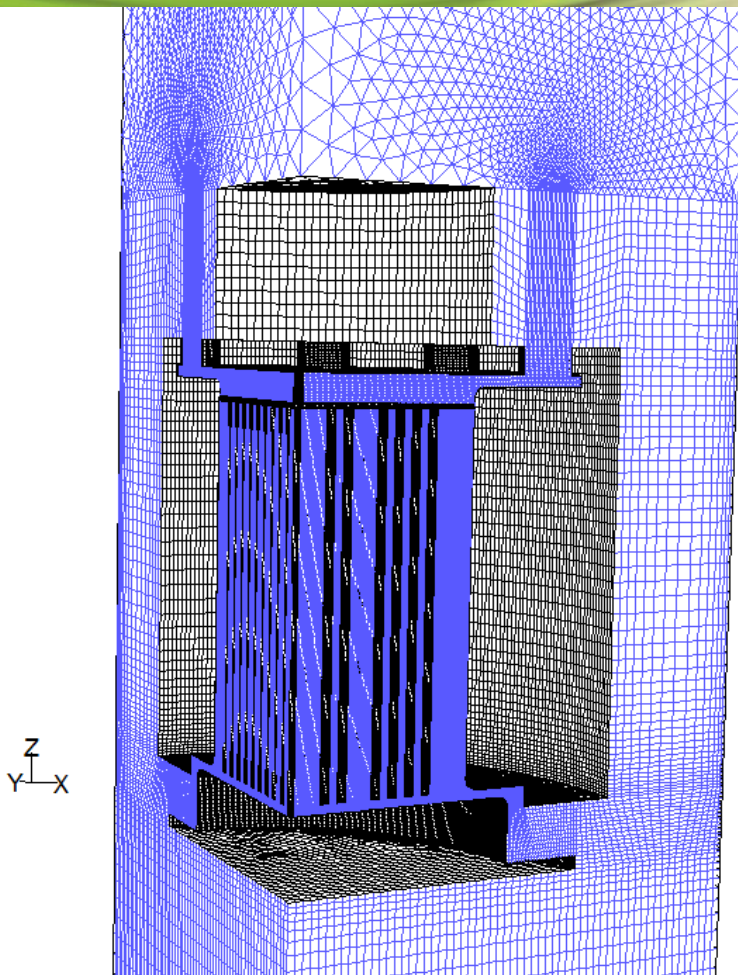
^۲ Omar

^۳ RELAP^۵

^۴ FLUENT

^۵ GAMBIT

^۶ Grid Plate



شکل ۱: هندسه یک چهارم راکتور مینیاتوری و شبکه‌بندی آن

شار حرارتی میله‌های سوخت

میله‌های سوخت به ۱۴ قسمت تقسیم شدند تا قابلیت شار حرارتی غیر یکسان داشته باشند. شار نسبی حرارتی میله‌های سوخت در راستای عمود متناسب با شار نسبی نوترونی در کانال خشک راکتور مینیاتوری که به صورت تجربی به دست آمده است، در نظر گرفته شده است.

بارگذاری خواص متغیر سیال

به علت گستره دمایی بالا خواص سیال با دما متغیر است. خاصیت ویسکوزیته سیال متناسب با دمای سیال است. رابطه ۱ تابعیت دمایی ویسکوزیته را با دما بیان می‌کند:



$$\mu = 0.001(1.6179 - 0.38117T + 0.00042112T^2 - 1.7619 \times 10^{-6}T^3) \quad (1)$$

که در این رابطه دما بر حسب سلسیوس است. تابع دستی برای تعریف ویسکوزیته سیال با زبان برنامه سی برای نرم افزار فلونت تعریف شده است. به علت اینکه نمی توان ضریب انبساط دمایی سیال را به صورت تابع دستی تعریف کرد، خاصیت چگالی سیال به صورت دستی تنظیم می شود. رابطه چگالی با دما به صورت رابطه ۲ است:

$$\beta = -1/\rho \times \frac{d\rho}{dT} \quad (2)$$

که در این رابطه β ضریب انبساط حرارتی و ρ چگالی سیال است. تابع ضریب انبساط حرارتی با دما متناسب است با:

$$\beta = -0.429091 + 0.14691T - 0.0012192T^2 + 0.35460 \times 10^{-6}T^3 \quad (3)$$

با گرفتن انتگرال از رابطه ۲ و قرار دادن ضریب انبساط حرارتی متناسب با دما، و قرار دادن دمای مبنا (T_0) ۱۵ درجه سلسیوس رابطه ۴ که تغییرات چگالی را با دما نشان می دهد، به دست می آید:

$$\rho = 999.8 e^{-0.0001(-8.79 - 0.429091T + 0.073455T^2 - 0.000464T^3 + 1.23816 \times 10^{-6}T^4)} \quad (4)$$

حل معادلات به صورت گذرا می باشد و در هر گام زمانی، تکرارها تا خطای نسبی ۰/۰۰۲ ادامه می یابد.

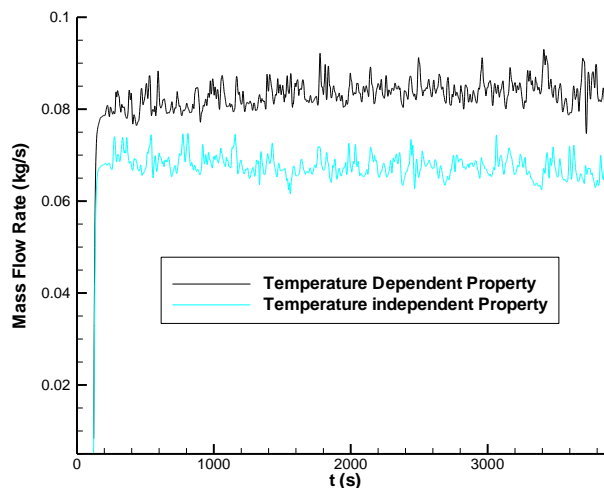
یافته ها و بحث

در نرم افزار فلونت، سطح بیرونی مخزن به صورت همدمای متناسب با افزایش دمای استخر با گذشت زمان در نظر گرفته شده است. انتقال حرارت جابجایی فقط در پوسته مخزن منظور شده و در سایر قسمت های راکتور این پارامتر نادیده گرفته شده است. قدرت اسمی راکتور تقریباً بین ۲۷ تا ۲۸ کیلووات است. در این شبیه سازی شار حرارتی در توان اسمی ۲۷/۵ کیلووات منظور شده است.

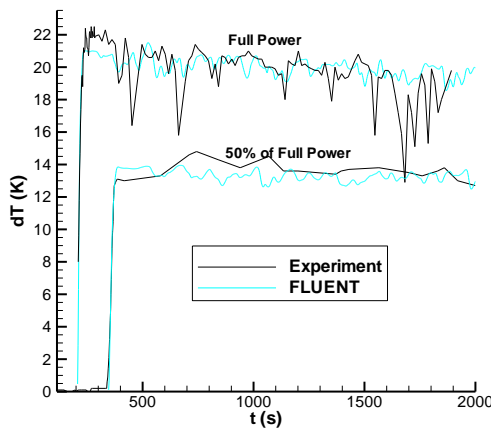
شکل ۳ مقایسه دبی جرمی جریان سیال از قلب را برای راکتور مینیاتوری در توان اسمی آن در حالتی که خواص سیال ثابت و متغیر است مقایسه شده است. مشاهده می شود با گذشت زمان، در شبیه سازی با خواص متغیر با دمای سیال، دبی عبوری سیال از قلب تقریباً ۱۵ درصد بیشتر از نتایج با خواص ثابت سیال روند رو به افزایش دارد. برای مقایسه نتایج شبیه سازی با نرم افزار فلونت با داده های تجربی، اختلاف دمای سیال ورودی به قلب و خروجی از آن با داده های تجربی مربوط به راکتور در توان اسمی و ۵۰ درصد توان اسمی مقایسه شده است (شکل ۴). همان طور که از شکل ۴ آشکار است نتایج شبیه سازی با داده های تجربی تطابق قابل قبولی دارد. در نمودارهای تجربی



و شبیه سازی تفاوت دمای سیال ورودی به قلب و خروجی از آن کاهش می یابد که می توان آن را به افزایش ضریب انبساط حرارتی سیال با دما نسبت داد. با گرم شدن سیال ضریب انبساط حرارتی آب افزایش می یابد و از این رو نیروی شناوری نیز افزایش می یابد و سیال با دبی بیشتر از قلب عبور می کند و سبب کاهش اختلاف دمای ورودی سیال و خروجی سیال می شود.



شکل ۳: مقایسه دبی جرمی جریان سیال از قلب راکتور در توان اسمی راکتور در دو حالت سیال با خواص ثابت و سیال با خواص متغیر با دما



۴: مقایسه نتایج شبیه سازی سیال با خواص متغیر با دما با داده های کارکرد راکتور مینیاتوری در توان اسمی و ۵۰ درصد توان اسمی

نتیجه گیری

جابجایی طبیعی در راکتور مینیاتوری اصفهان با نرم افزار فلوئنت برای سیال با خواص متغیر با دما شبیه سازی شد و نتایج با داده های تجربی و نتایج سیال با خواص ثابت مقایسه شد. نتایج شبیه سازی سیال با خواص متغیر با دما تطابق قابل قبولی با



داده‌های تجربی داشتند و تقریباً ۱۵ درصد بیشتر از نتایج شبیه‌سازی با خواص ثابت است. با وجود افزایش آشفته‌گی سیال درون محفظه راکتور با گذشت زمان، افزایش ضریب انبساط حرارتی آب و همچنین کاهش ویسکوزیته سیال با افزایش دما نرخ جرمی جریان درون قلب افزایش و اختلاف دمای سیال ورودی به قلب و خروجی از آن کاهش می‌یابد.

مراجع

- [۱] CIAE, Safety Analysis Report (SAR) for the Esfahan Miniature Neutron Source Reactor, China, ۱۹۹۳.
- [۲] I.H. Bokhari, Steady-state thermal hydraulic and safety analyses of a proposed mixed fuel (HEU&LEU) core for Pakistan research reactor-۱, Annals of Nuclear Energy ۳۱ (۲۰۰۴) ۱۲۶۵-۱۲۷۳.
- [۳] M. Abdul Basit, M. Rafique, I. R. Chughtai, M. H. Inayat, Computer simulation of natural convection heat transfer from an assembly of vertical cylinders of PARR-۲, Applied Thermal Engineering ۲۷ (۲۰۰۷) ۱۹۴-۲۰۱.
- [۴] M. Albarhoum & S. Mohammed, A thermal-hydraulic code (THYD) for the miniature neutron source reactor thermal-hydraulic transients, Progress in Nuclear Energy ۵۱ (۲۰۰۹) ۴۷۰-۴۷۳.
- [۵] H. Omar, N. Ghazi, F. Alhabit & A. Hainoun, Thermal hydraulic analysis of Syrian MNSR research reactor using RELAP^۵/Mod^{۳,۲} code, Annals of Nuclear Energy ۳۷ (۲۰۱۰) ۵۷۲-۵۸۱.
- [۶] T. Hamidouche & E. Si-Ahmed, Analysis of loss of coolant accident in MTR pool type research reactor, Progress in Nuclear Energy ۵۳ (۲۰۱۱) ۲۸۵-۲۸۹.
- [۷] M. Azzounea, L. Mammou, M.H. Boulheouchat, T. Zidi, M.Y. Mokeddem, S. Belaid, A. Bousbia Salah, B. Meftah & A. Boumediene, NUR research reactor safety analysis study for long time natural convection (NC) operation mode, Nuclear Engineering and Design ۲۴۰ (۲۰۱۰) ۸۲۳-۸۳۱.
- [۸] A.L. R. Patrícia, L. C. Antonella, P. Cláubia, A.F. V. Maria, Z. M. Amir, V. S. Humberto & P. B. Graiciany de, Assessment of a RELAP^۵ model for the IPR-R^۱ TRIGA research reactor, Annals of Nuclear Energy ۳۷ (۲۰۱۰) ۱۳۴۱-۱۳۵۰.