شبیه‌سازی عددی برداشت طبیعی حرارت از قلب راکتور تحقیقاتی تهران در عملکرد عادی بدون حضور پمپ

مسجدی، فاطمه* [(۱)] – صفری، محمدجواد[(۱)] – عباسی دوانی، فریدون[(۲)]

[(۱)] دانشگاه صنعتی امیرکبیر ، دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک

[(۲)] دانشگاه شهید بهشتی ، دانشکده مهندسی هسته‌ای ، گروه کاربرد پرتو

چکیده

در این مطالعه، به بررسی و شبیه‌سازی جریان جابجایی طبیعی[۱] در قلب راکتور تحقیقاتی تهران تحت عملکرد عادی، بدون حضور پمپ پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی نوترونی قلب و محاسبه‌ی توزیع توان تولیدی در آن، با استفاده از نرم‌افزار MCNPX صورت گرفت. سپس نتایج حاصل، جهت انجام محاسبات مورد نیاز به یک نرم‌افزار دینامیک سیالات محاسباتی(فلوئنت[۲]) که بر پایه‌ی روش حجم محدود کار می‌کند، انتقال یافت. جریان برای حالت پایا[۳] و دوبعدی در مجموعه‌ی سوختی که بیشترین سهم از توان کل را داراست، مدل گردید و توان ۳۰۰ کیلووات به عنوان بیشترین توانی که تحت جابجایی طبیعی و بدون دو فاز شدن جریان قابل دست‌یابی بود ،برآورد شد.

کلمات کلیدی: *جابجایی طبیعی، راکتور تحقیقاتی تهران، عملکرد عادی، ام‌سی‌ان‌پی، فلوئنت*

Numerical simulation of natural heat removal from the core of Tehran research reactor in normal operation without pump

Masjedi, Fatemeh[1]; Safari, Mohammad Javad[2]; Abbasi Davani, Fereydoun[3]

[1,2]Amirkabir University of Technology, Faculty of Energy Engineering and Physics

[3]Shahid Beheshti University, Faculty of Nuclear Engineering, Department of Radiations Application

In this study, with the ultimate goal of showing the effective role of natural convection in normal operation of a nuclear reactor without pump; we have analyzed the situation in the case of Tehran research reactor. A Monte Carlo simulation of the reactor neutronics, specifically focusing the evaluation of power production and its spatial distribution, was performed by the MCNPX code. The power distribution was directly transferred to the CFD software (here FLUENT), which is able to solve the thermal-hydraulic set of equations based on the finite volume method and estimate the heat transfer and fluid natural convection properties. In this study, the assembly with highest contribution in the total power of the reactor has been assumed as a representative of the harshest thermal-hydraulic conditions. The simulations were based on a 2D model of the reactor/assembly in steady-state conditions. This study, directly resulted in the estimation of maximum power (300 kw) that could be approached, solely based on natural fluid flow/heat removal without tow phase flow.

Key words: Natural convection, Tehran research reactor, normal operation, MCNP, FLUENT

[1] Natural convection
[2] Fluent
[3] Steady state

مقدمه

یکی از مهمترین عوامل محدودکننده در اخذ توان از راکتورهای تحقیقاتی، اطمینان از خنک‌کنندگی مناسب در کلیه‌ی شرایط می‌باشد. نقش جریان طبیعی سیال در خنک‌سازی قلب، حتی در صورت حضور پمپ، حائز اهمیت است. پدیده‌ی جابجایی طبیعی در اثر اختلاف چگالی حاصل از گرادیان دما، پدید می‌آید. این پدیده در برداشت گرمای قلب راکتورهای قدرت، بعد از خاموش‌سازی، کاربرد فراوان دارد. یان[1] و همکاران (۲۰۰۵)[1] از فلوئنت برای شبیه‌سازی شرایط گردش طبیعی در طراحی یک راکتور تحقیقاتی استفاده کرده‌اند. این شبیه‌سازی با فرض محیط متخلخل و برای زمان پس از خاموشی صورت گرفته است. آزونی[2] و همکاران (۲۰۱۰)[2] آنالیز ایمنی راکتور تحقیقاتی NUR که برای مدت طولانی تحت جابجایی طبیعی کار کرده است را انجام دادند. شبیه‌سازی آن‌ها با کد ریلپ[3] برای توان ۱۰۰ کیلووات، با در نظر گرفتن مدل سینتیک نوترونی نقطه‌ای[4] و مشخصات ترموهیدرولیکی و هندسی واقعی سیستم صورت گرفته است.

آردانه[5] و زعفرانلوئی[6] (۲۰۱۲)[3] حل تحلیلی یک بعدی‌ای برای آنالیز رفتار ترموهیدرولیکی یک راکتور تحقیقاتی MTR تحت شرایط جابجایی طبیعی و حالت پایا ارائه کردند. آن‌ها از داده‌های راکتور تحقیقاتی تهران و SILOE برای صحت‌سنجی و از نرم‌افزار CONVEC V3.40 برای تخمین نتایج استفاده نمودند. فرهادی[7] (۲۰۱۲)[4] با استفاده از مدل‌سازی ریاضی، تخمین نرخ برداشت حرارت با جابجایی طبیعی پس از خاموشی راکتور تحقیقاتی تهران را بررسی نمود. این مطالعه، برای دو حالت تقریب بوزینسک[8] و غیربوزینسک در شارحرارتی یکنواخت و غیریکنواخت کسینوسی انجام گرفته است. قهرمانی و همکاران (۲۰۱۲)[۵]، جابجایی طبیعی سیال آب و نانوسیال[9] در یک مدل دوبعدی ساده‌سازی شده از راکتور تهران، برای زمان پس از خاموشی را، توسط فلوئنت مورد بررسی قرار داده‌اند. این بررسی نشان می‌دهد که با افزودن نانو ذرات به سیال پایه آب، دمای صفحه سوخت[10] در مقایسه با حالتی که با آب خنک می‌شد، کاهش می‌یابد و با افزودن غلظت نانو ذرات، دمای سوخت به مقدار بیشتری کاهش خواهد یافت. قیصری و همکاران (۱۳۹۴)[۶] جریان جابجایی طبیعی در قلب راکتور تهران را به روش عددی با استفاده از نرم‌افزار فلوئنت مورد بررسی قرار دادند و الگوی جریان در حالت خاموشی راکتور را ارائه کردند. در این مطالعه از

[1] Yan
[2] Azzoune
[3] RELAP
[4] Point neutronic kinetic
[5] Ardaneh
[6] Zaferanlouei
[7] Farhadi
[8] Boussinesq approximation
[9] Nanofluid
[10] Plate fuel

روش محیط متخلخل جهت کاهش حجم محاسبات، استفاده شده است. ژانگ[1] و همکاران (۲۰۱۵)[7] ظرفیت[2] خنک‌کنندگی[3] گردش طبیعی راکتور تحقیقاتی دانشگاه کیوتو[4](KUR) را به طور آزمایشی به وسیله‌ی اندازه‌گیری دمای ورودی و خروجی قلب در توان‌های گرمایی مختلف بین ۱۰ تا ۱۰۰ کیلووات و در حالت خاموشی، مورد بررسی قرار دادند.

اغلب مطالعات انجام شده بر زمان پس از خاموشی متمرکز می‌باشند و به اهمیت برداشت حرارت در زمان عملکرد عادی راکتور تحت جابجایی طبیعی و توانایی آن در کاهش هزینه‌ها، کمتر پرداخته شده‌است. در کارهای صورت گرفته، اغلب ساده‌سازی‌های بسیار و مش‌بندی‌های نه‌چندان دقیقی لحاظ شده و همچنین شار حرارتی صفحات سوخت به‌صورت دقیق و واقعی اعمال نشده‌است، که این موارد متعاقبا کاهش دقت در نتایج را به همراه خواهد داشت.

روش کار

ابتدا شبیه‌سازی نوترونی قلب برای چیدمان نشان داده‌شده در شکل ۱ توسط نرم‌افزار ام‌سی‌ان‌پی، انجام گرفت.

GB	GB	A3	A4	A5	A6	A7	A8	IR
GB	GB	A12	A13	A14	AS15	A16	AS17	GB
GB	IR	A21	AS22	A23	**A24**	A25	A26	GB
GB	GB	IR	A31	A32	IR	A34	A35	GB
GB	GB	A39	A40	AS41	A42	AS43	A44	IR
GB	GB	IR	A49	A50	A51	A52	A53	GB

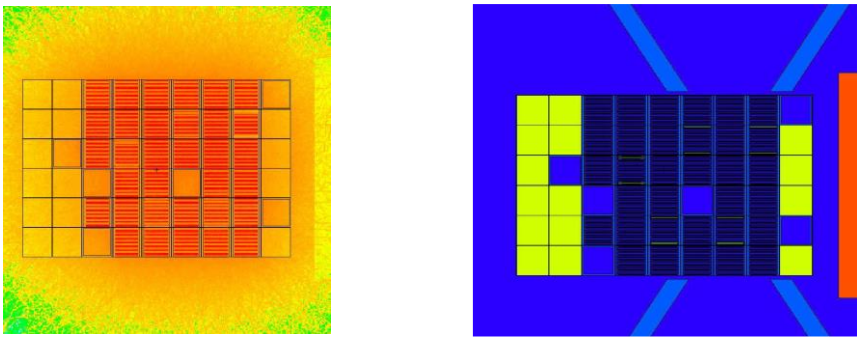
شکل ۱: چیدمانی از قلب راکتور تهران

نمائی از هندسه مدل شده و توزیع انرژی در قلب، حاصل از شبیه‌سازی نوترونی، در شکل ۲، مشاهده می‌شود. در شکل ۲–ب، رنگ قرمز نشان دهنده‌ی بیشترین توان و انرژی در قلب می‌باشد.

با توجه به حجم بالای محاسبات در شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی کل قلب، یک مجموعه‌ی سوخت به نمایندگی از کل قلب، مدل می‌گردد. بنابراین باید اطلاعات مربوط به توزیع توان در سراسر قلب و سهم هر مجموعه‌ی سوخت، به‌منظور انتخاب مجموعه‌ای با بالاترین سهم از توان و حرارت کل، به‌دست آید. با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نوترونی، الگویی برای توزیع توان در کل قلب، مطابق شکل ۳، حاصل گردید.

[1] Zhang
[2] Capacity
[3] Cooling
[4] Kyoto

مجموعه‌های سوخت ۲۴ و ۴۳، به‌ترتیب دارای بیشترین و کمترین سهم از توان کل می‌باشند. پس از یافتن مجموعه‌ی دارای بیشترین توان، توزیع توان در هریک از صفحات سوخت این مجموعه نیز محاسبه گردید.



(ب) (الف)

شکل ۲: الف) هندسه قلب. ب) توزیع انرژی در قلب.

		2.8%	3.3%	3.6%	3.2%	3.4%	3.0%	
		2.9%	3.1%	3.7%	2.1%	3.8%	2.5%	
		3.3%	1.9%	4.0%	4.5%	4.3%	3.9%	
			3.2%	3.8%		4.0%	3.5%	
		3.0%	2.8%	1.6%	3.4%	1.6%	2.7%	
			2.4%	2.2%	2.9%	2.1%	2.1%	

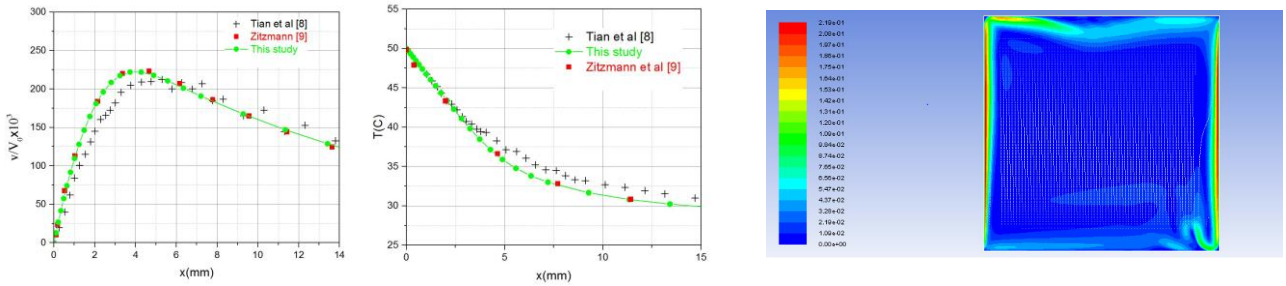
شکل ۳: الگوی توزیع توان در قلب راکتور تهران

پس از انجام شبیه‌سازی نوترونی، شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی انجام گرفت. با توجه به در دسترس نبودن نتایج تجربی جهت مقایسه با نتایج شبیه‌سازی و اطمینان از مناسب بودن پارامترهای در نظر گرفته‌شده در شبیه‌سازی با نرم‌افزار فلوئنت، در این مطالعه برای صحت‌سنجی روش‌های عددی به‌کار رفته، از یک معیار استفاده گردیده‌است. این معیار شامل جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه‌ی بسته‌ی پرشده از هوا می‌باشد. نتایج به‌دست آمده پیرامون سرعت و دما با نتایج آزمایش تیان[1] و همکاران[8] (۲۰۰۰) و نتایج شبیه‌سازی عددی زیتزمن[2] و همکارانش (۲۰۰۵)[9] مقایسه و صحت مدل‌سازی بررسی شد. در شکل ۴-الف کانتور سرعت، شکل ۴-ب، تغییرات دما و در شکل ۴-ج، تغییرات سرعت در مقطع y=۰٫۵ به نمایش درآمده است.

پس از اطمینان از صحت روش مدل‌سازی، به شبیه‌سازی نوترونی قلب پرداخته‌شد. همانطور که مشاهده شد، مجموعه‌ی۲۴ دارای بالاترین توان و در این مجموعه نیز تنها تعدادی از کانال‌ها دارای توان بالا و در نتیجه

[1] Tian
[2] Zitzmann

دمای بالا می‌باشند، پس اگر در این کانال‌ها شرایط بحرانی و جوشش رخ ندهد قطعاً در باقی کانال‌ها شرایط مناسب خواهد بود، بنابراین می‌توان تنها این مجموعه را مدل‌سازی کرده و نیاز به بررسی کل قلب برای شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی نیست. همچنین با توجه به هندسه و نوع جریان، می‌توان شبیه‌سازی را به صورت دو بعدی انجام داد.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۴: الف) کانتور سرعت. ب) نمودار مولفه‌ی عمودی دما در y=۰٫۵. ج) نمودار مولفه‌ی عمودی سرعت در y=۰٫۵

هندسه و مش‌ریزی در نرم‌افزار گمبیت[1] و تحلیل و شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی در نرم‌افزار فلوئنت صورت گرفت.. برای مش‌بندی داخل کانال‌ها، با توجه به اهمیت ویژه‌ی لایه‌مرزی و دقت بیشتر در این نواحی، از مش لایه‌مرزی استفاده شده‌است. علت اصلی استفاده از گمبیت نیز قابلیت مناسب آن در مش‌بندی لایه‌مرزی دوبعدی، می‌باشد. ضخامت مش لایه‌ی مرزی دیوار کانال در حدود ۰٫۸۳ میلی‌متر، ضخامت اولین لایه ۰٫۰۵ میلی‌متر و ضریب رشد برابر ۱٫۰۴ است. با توجه به نتایج دقیق‌تر مش چهارگوش، در داخل کانال و نواحی اطراف آن از مش چهارگوش و در نواحی دورتر از مش مثلثی استفاده گردیده است. تعداد المان‌های به‌کار رفته در مجموع حدود ۱۰۰۲۶۹۶ می‌باشد. حل‌گر بر پایه‌ی فشار و با استفاده از فرمول‌بندی روش صریح انجام پذیرفته است. جریان به‌صورت پایا، دو بعدی، تراکم‌ناپذیر و خواص به‌جز دانسیته در تقریب بوزینسکی، ثابت فرض شده‌اند. شناوری با استفاده از تقریب بوزینسکی در رابطه‌ی تکانه مدل گردید.

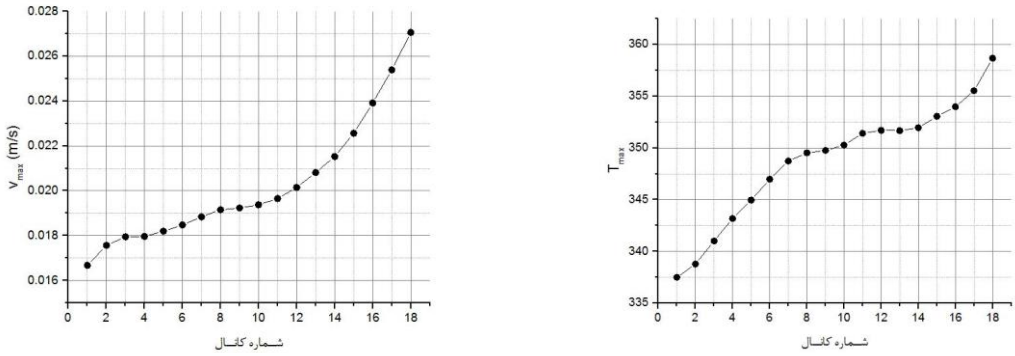
با توجه به آشفته بودن جریان، از مدل جریان آشفته و از روش k-w که مزیت آن در مسئله‌ی صحت‌سنجی بررسی شد، استفاده می‌شود. در قسمت شرایط مرزی[2]، شرط مرزی شار حرارتی به صفحات سوخت اعمال می‌گردد. با توجه به اینکه شار حرارتی صفحات مقدار ثابتی ندارد و نسبت به مکان تغییر می‌کند و نرم‌افزار به طور پیش فرض قابلیت اعمال آن را ندارد، لذا برای وارد کردن آن در نرم‌افزار، باید از قابلیت یودی‌اف[3] استفاده شود.

[1] Gambit
[2] Boundary condition
[3] UDF

نتایج

مدل پیاده‌سازی شده با جزئیات مذکور در بخش قبل، امکان محاسبه‌ی کمیت‌ها و روابط مختلفی را فراهم می‌کند. جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی میزان افزایش دما در کانال، دما و سرعت بیشینه‌ی کانال ۱۸ که دارای بیشترین سهم از توان مجموعه ۲۴ می‌باشد، است. در توان ۳۰۰ کیلووات، آب خنک‌کننده در کانال ۱۸، در آستانه‌ی جوشش قرار می‌گیرد.

تغییرات سرعت در کانال‌های مختلف بررسی گردید و نمودار سرعت و دمای بیشینه در کانال‌های مختلف مطابق شکل ۵ حاصل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تنها تعداد محدودی از کانال‌ها در آستانه شرایط بحرانی قرار می‌گیرند. در نتیجه می‌توان گفت که کانال دارای بیشترین سهم از توان کل قلب (کانال ۱۸)، بحرانی‌ترین شرایط را داراست.



الف ب

شکل ۵: (الف) دمای بیشینه و (ب) سرعت بیشینه در کانال‌های مختلف برای توان ۲۰۰ کیلو وات.

بحث ونتیجه‌گیری

در این مطالعه، مجموعه‌ی سوخت دارای بیشترین توان در شرایط عملکرد عادی و تحت جابجایی طبیعی و بدون حضور پمپ، مدل گردید. مشاهده شد که بیشترین توانی که بدون دو فاز شدن جریان، توسط جابجایی طبیعی قابل دست‌یابی است، توان ۳۰۰ کیلووات می‌باشد. البته لازم به ذکر است که طبق نتایج به‌دست آمده، تنها تعداد انگشت شماری از کانال‌های موجود در قلب باعث محدود شدن توان قابل دست‌یابی در شرایط ذکر شده، می‌باشند. و برای افزایش توان قابل دست‌یابی، می‌توان تنها به بهینه‌سازی همین تعداد کانال اندک، بسنده کرد.

جدول۱: تغییرات دما، دما و سرعت بیشینه در توان‌های مختلف برای کانال ۱۸

توان کل(kW)	توان کانال۱۸ (kW)	افزایش دما (K)	دمای بیشینه (K)	سرعت بیشینه (m/s)
۱۰۰	۰٫۳۶	۳۹٫۷۷	۳۳۸٫۲۳	۰٫۰۲۰

۲۰۰	۰٫۷۲	۶۱٫۵۴	۳۶۰٫۳۹	۰٫۰۲۷
۳۰۰	۱٫۰۸	۷۲٫۱۹	۳۷۱٫۳۵	۰٫۰۳۶

مراجع

[1] Yan, Y., R. Uddin, and N. Sobh, CFD simulation of a research reactor, in Reactor Physics and Nuclear and Biological Applications. 2005: Palais des Papes, Avignon, France.

[2] Azzoune, M., et al., NUR research reactor safety analysis study for long time natural convection (NC) operation mode. Nuclear Engineering and Design, 2010. 240: p. 9.

[3] Ardaneh, K. and S. Zaferanlouei, An analytical solution for thermal–hydraulic analysis and safety margins in MTR-type research reactors cooled by natural convection. Annals of Nuclear Energy, 2012. 51: p. 7.

[4] Farhadi, K., Estimating decay heat removal rate by natural convection for Tehran Research Reactor. Progress in Nuclear Energy, 2012. 54: p. 5.

[۵] قهرمانی، اسماعیل؛ اسفندیاری، محسن؛ قنادی مراغه، محمد؛ بررسی جابجایی طبیعی نانوسیال در راکتور تحقیقاتی تهران؛ هجدهمین کنفرانس هسته‌ای ایران. ۱۳۹۰: پژوهشکده کاربرد پرتوها(یزد)

[۶] قیصری، فرید؛ آقایی، مهدی؛ ذوالفقاری، احمد؛ کرمی، ایمانه؛ مدل‌سازی گردش طبیعی جریان در راکتور تهران به روش محیط متخلخل؛ بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران. ۱۳۹۳.

[7] Zhahg, J. and X. Shen, Experimental study on the safety of Kyoto University Research Reactor at natural circulation cooling mode. Annals of Nuclear Energy, 2015. **76**: p. 410-420.

[8] Tian, Y.S. and T.G. Karayiannis, Low turbulence natural convection in an air filled square cavity. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2000. 43: p. 849-866.

[9] Zitzmann, T. and M. Cook, Simulation of steady-state natural convection using CFD, in Ninth International IBPSA Conference. 2005: Montreal, Canada.