



بیست و یکمین کنفرانس هسته ای ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

کاربرد روش فضای متخلخل در شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی راکتور مینیاتوری چشمه نوترونی

یاسر عباسی، جمشید خورسندی، اسماعیل قهرمانی

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

چکیده:

در این پژوهش استفاده از روش فضای متخلخل در شبیه سازی رفتار ترموهیدرولیکی راکتور MNSR مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور قلب راکتور شامل میله های سوخت و خنک کننده به عنوان فضای متخلخل در نظر گرفته می شود. شبیه سازی به روش فضای متخلخل در دو مرحله صورت می پذیرد. ابتدا پارامترهای مورد نیاز برای در نظر گرفتن قلب به عنوان فضای متخلخل محاسبه می شود. سپس در مرحله بعد، قلب به عنوان فضای متخلخل در نظر گرفته شده و جابجایی آزاد درون راکتور (شامل قلب و مخزن) مورد تحلیل قرار می گیرد. مقایسه نتایج بدست آمده با روش های عددی دیگر و داده های تجربی خطای استفاده از روش فضای متخلخل را تعیین می کند.

کلمات کلیدی:

فضای متخلخل، جابجایی طبیعی، راکتور چشمه نوترونی، روش عددی

۱- مقدمه:

پایه ور و همکاران [۱] جریان سیال در راکتورهایی با سوخت کروی را با استفاده از روش فضای متخلخل مدل کرده اند. ظریفی و همکاران [۲] استفاده از نانوسیال در قلب راکتور بوشهر را بوسیله روش فضای متخلخل بررسی کرده اند. آن ها در این پژوهش هر مجتمع سوخت را به صورت یک ناحیه با خواص فضای متخلخل در نظر گرفته و ویژگی های انتگرالی جریان را محاسبه نموده اند. چاهلاfi و همکاران [۳] کاربردی از روش فضای متخلخل در شبیه سازی سیستم آبرسانی در راکتورهای هسته ای را بررسی کرده اند. اوکیل و همکاران [۴] روش فضای متخلخل را بر روی راکتور PBMR اعمال نموده اند. فوزیماوا و همکاران [۵] نقش تخلخل را در ترموهیدرولیک راکتور-UHT GC را بررسی کرده اند. چندسریز [۶] و همکاران با استفاده از مدل اغتشاشات در فضای متخلخل جریان در لوله ها، کانال ها و دسته لوله ها را مورد بررسی قرار داده اند. ریکاردی [۷] و همکاران با استفاده از مدل فضای متخلخل قلب یک راکتور PWR را از نظر ترموهیدرولیکی بررسی کرده اند. یان ئیژو [۸] روش فضای متخلخل را برای شبیه سازی راکتورهای هسته ای بکار برده است.



بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

در این پژوهش با استفاده از روش فضای متخلخل رفتار ترموهیدرولیکی راکتور MNSR مورد بررسی قرار می-گیرد. برای این منظور قلب راکتور شامل میله های سوخت و خنک کننده به عنوان فضای متخلخل در نظر گرفته می شود. شبیه سازی به روش فضای متخلخل در دو مرحله صورت می پذیرد. ابتدا پارامترهای مورد نیاز برای در نظر گرفتن قلب به عنوان فضای متخلخل محاسبه می شود. این مرحله "مدل سازی هندسه پیچیده" نامیده می شود. در مرحله بعد قلب به عنوان فضای متخلخل در نظر گرفته شده و جابجایی آزاد درون راکتور (شامل قلب و مخزن) مورد تحلیل قرار می گیرد. این مرحله "مدل سازی هندسه کلی" نامیده می شود.

۲- روش فضای متخلخل و معادلات حاکم

فضای متخلخل یا به اصطلاح پروس مدیا به صورت کلی به ماده ای که شامل زمینه جامد با حفره های به هم متصل باشد، اطلاق می شود. در مدل پروس مدیا میدان جریان در هر نقطه در مقیاس میکروسکوپی حل نمی شود و به جای آن میدان جریان متوسط گیری شده فضایی تعیین می شود. اثر پروس مدیا بر روی جریان متوسط به وسیله ترم های اضافی تحت عنوان مقاومت جریان در معادله مومنتوم اثر داده می شود. این ترم ها با استفاده از مدل های فیزیکی تعمیم یافته دارسی بصورت زیر محاسبه می شوند [۹]:

(۱)

این رابطه سرعت متوسط و افت فشار را به هم ربط می دهد تا فضای متخلخل را مدل کند. عبارت نفوذ پذیری K_{ij} تانسور مرتبه دومی است که تنها به هندسه محیط متخلخل بستگی دارد و C_f ثابت بی بعد مربوط به ضریب دراگ است. مدل سازی فضای متخلخل با استفاده از چشمه مومنتوم در معادلات ناویر استوکس انجام می شود:

(۲)

که در این رابطه S_i عبارت مربوط به چشمه است. عبارات D_{ij} و C_{ij} بترتیب، فاکتور مقاومت ویسکوز و فاکتور مقاومت اینرسی نامیده می شوند. انتقال حرارت در ناحیه متخلخل به صورت زیر مدل می شود:

(۳)

که در این رابطه E_f انرژی کل سیال، E_s انرژی کل فضای جامد، γ میزان تخلخل پروس مدیا، k_{eff} رسانندگی حرارتی مؤثر محیط، S_f^h عبارت مربوط به چشمه آنتالپی است. رسانندگی حرارتی مؤثر در پروس مدیا، k_{eff} ، به صورت متوسط حجمی رسانندگی حرارتی سیال و رسانندگی حرارتی جامد به صورت زیر محاسبه می گردد:

(۴)

در این رابطه γ میزان تخلخل محیط، k_f رسانندگی حرارتی فاز سیال و k_s رسانندگی حرارتی فاز جامد است.

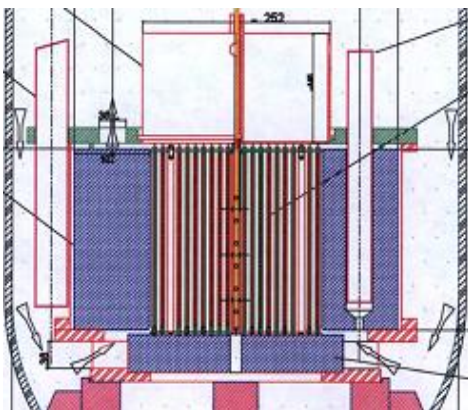


بیست و یکمین کنفرانس هشتای ایران

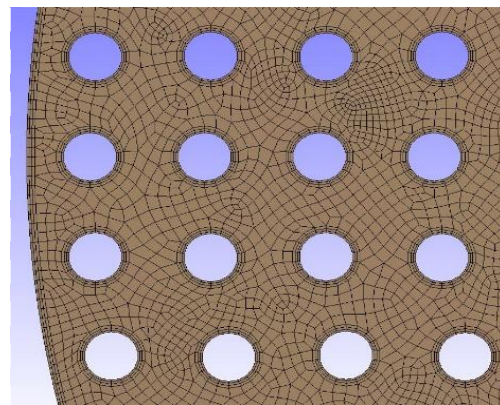
۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۲-۱- شبیه سازی مرحله اول

شکل های ۱ و ۲ بترتیب شماتیکی از هندسه راکتور *MNSR* و جزئیات شبکه بندی قلب آن نشان داده شده است. شبکه بندی برای مش های با اندازه های ریز تر نیز انجام شد که تاثیری در همگرایی نداشت. تورم در نزدیکی مرزها به خوبی اعمال شده است تا اثر دیواره مورد بررسی قرار گیرد. تعداد مش ها برای هندسه قلب (شامل ۳۵۵ میله سوخت) نزدیک به دو میلیون سلول می باشد.



شکل ۲- جزئیات هندسه قلب راکتور



شکل ۱- جزئیات شبکه بندی در اطراف میله

های سوخت

۲-۲- چگونگی محاسبه پارامترهای فضای متخلخل

خواص فضای متخلخل توسط ترم چشمه اضافی به معادلات بقای مومنتوم اعمال می شود. این ترم اضافی توسط معادله ۲ محاسبه می گردد. اغتشاشات القایی از پروس مدیا در مدل پروس مدیا در نظر گرفته نشده است. این ساده سازی ممکن است منجر به انرژی جنبشی و ویسکوزیته اغتشاشات پایین تر شود زیرا معادله مربوط به انرژی جنبشی پروس مدیا در مدل اغتشاشات $k - \epsilon$ استاندارد شامل ترمی مربوط به اغتشاشات القایی از پروس مدیا نمی شود. بنابراین، نتایج بدست آمده در این قسمت، ممکن است آهنگ جابجایی جریان بالاتری را ارائه کند و در نتیجه اختلاف دما کاهش یابد.

۲-۳- مرحله دوم شبیه سازی

در این مرحله با توجه به شرایط مرزی مناسب انتقال حرارت جابجایی آزاد شبیه سازی می شود. دیواره های محفظه راکتور به عنوان مرزهایی با ضریب انتقال حرارت جابجایی انتخاب شده اند. ضریب انتقال حرارت مناسب با توجه به نوع رژیم جریان با استفاده از رابطه زیر محاسبه شده است:

(۶)

که در آن عدد رایلی عبارتست از:



بیست و یکمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۷ و ۶ اسفند ماه ۱۳۹۳، دانشگاه اصفهان

(۷)

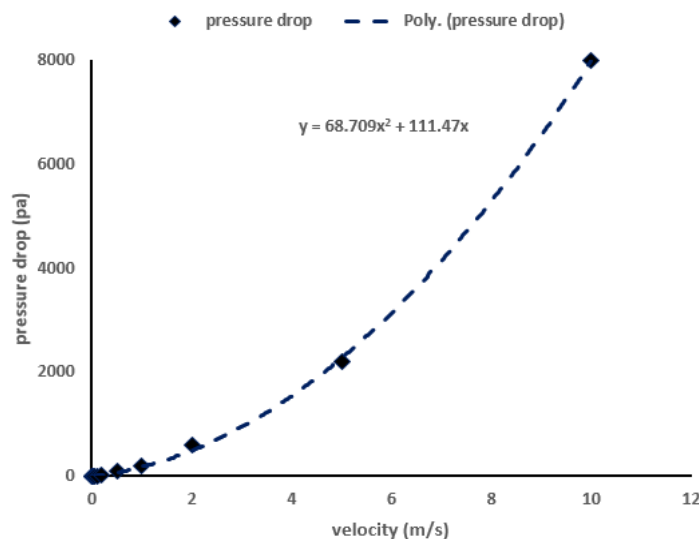
و سایر پارامترهای مربوط به خواص خنک کننده برای دمای کاری راکتور برابرند با [۹]:

(۸)

با اعمال شرایط مرزی و تقریب بوزینسک شبیه سازی گذرای راکتور انجام شده است.

۳- نتایج

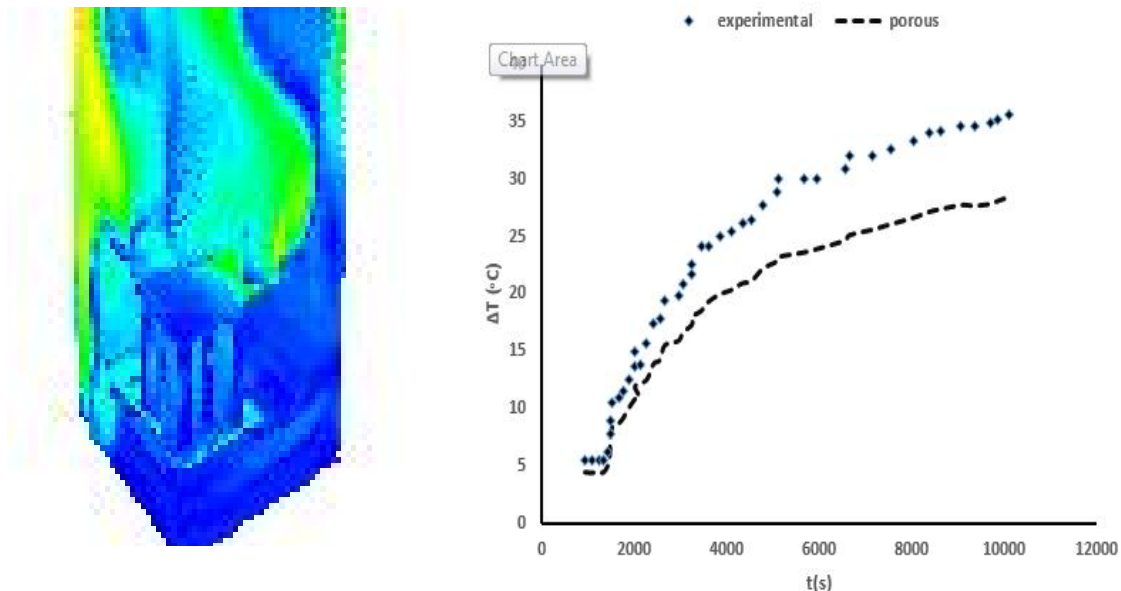
هدف شبیه‌سازی مجتمع سوخت با جزئیات کامل ساختاری، تعیین افت فشار برای دبی‌های ورودی مختلف، و سپس تخمین پارامترهای پروس مدیا که منجر به همان مقدار افت فشار می‌شوند (میزان افت شاری که اگر مجتمع با استفاده از پروس مدیا مدل می‌شد رخ می‌دهد)، می‌باشد. در این مرحله از شبیه‌سازی، افت فشار محلی در ورودی و خروجی کانال‌های خنک کننده مورد توجه است. برای سرعت‌ها ورودی بین ۰/۰۰۱ تا ۱۰ متر بر ثانیه تابع مرتبه دوم برای فیت کردن داده‌ها بکار رفته است تا افت فشار ناشی از صفحات سوخت را با استفاده از جزئیات سازه‌ای کامل محاسبه کند. این تابع به عنوان منحنی فیت شده در شکل ۳ نشان داده شده است. افت فشارهای محاسبه شده با شبیه‌سازی مقیاس کامل همین راکتور تنها ۸ درصد خطا دارد.



شکل ۳- افت فشار در امتداد قلب برای سرعت‌های ورودی مختلف

با مقایسه معادله ۳ که در آن عبارت S_f به عنوان افت فشار ناشی از فضای متخلخل در نظر گرفته می‌شود، با تابع برازش درجه دوم که در شکل ۳ نشان داده شده است، مقدار پارامترهای مورد نیاز مدل تعیین می‌شوند. فاکتور مقاومت ویسکوز و فاکتور مقاومت درونی در جهت جریان بترتیب برابر با مقادیر $111 m^{-2}$ و $68 m^{-1}$ بدست آمده است.

در مرحله دوم دمای ورودی به قلب راکتور در بازه زمانی مشخص محاسبه شده است (شکل شماره ۴). شکل ۵ کانتور دما را در یک ساعت از روشن شدن راکتور نشان می‌دهد.



شکل ۴- دمای ورودی به قلب در زمان‌های مختلف
شکل ۵- کانتور سرعت پس از یک ساعت

محاسبات مرحله اول و دوم با استفاده از پردازنده دو هسته‌ای با سرعت 3.0 GHz با حافظه 2GB انجام شده است. محاسبات مرحله اول سی دقیقه بطول انجامیده است. محاسبات مرحله دوم در مقایسه با شبیه سازی بدون فضای متخلخل (با پردازنده 3.7 GHz و حافظه 8GB) در زمان بسیار کمتری انجام شده است.

۳-۱- اعتبار سنجی داده‌ها

برای اعتبار سنجی داده های مرحله اول، افت فشارهای بدست آمده با شبیه سازی کل هندسه بدون استفاده از روش فضای متخلخل مقایسه شده است. نتایج در حدود ۸ درصد خطا دارد. این امر بدلیل انتخاب شرایط مرزی ساده تر در شبیه سازی مرحله اول می‌باشد؛ زیرا فرض شده است که جریان از ابتدا به صورت موازی با میله های سوخت حرکت می‌کند، این در حالی است که در واقعیت جریان از کناره ها وارد شده و سپس در جهت میله های سوخت امتداد می‌یابد. شبیه سازی مرحله دوم نیز دماهای خروجی را کمتر از حالت آزمایش پیشبینی می‌کند (شکل ۴ را ببینید). این امر بدلیل صرف نظر کردن از ترم های اغتشاشی در فرمول بندی جریان پروس مدیا و همچنین پیشبینی افت فشار کمتر در شبیه سازی مرحله اول، طبیعی است. همانطور که در قسمت های قبلی اشاره شد با صرف نظر از ترم های اغتشاشی آهنگ جریان بالاتری پیش بینی می‌شود.



بیست و یکمین کنفرانس هشتاد و یکم ایران

۶ و ۷ اسفند ماه ۱۳۹۳ دانشگاه اصفهان

۴- بحث و نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل فضای متخلخل موجود در نرم افزار فلوئنت، جابجایی طبیعی در محفظه راکتور MNSR مدل شده است. شبیه سازی در دو مرحله انجام شده است. در مرحله اول پارامترهای مورد نیاز برای در نظر گرفتن قلب راکتور به عنوان فضای متخلخل محاسبه شده است. در مرحله دوم کل محفظه راکتور به همراه قلب (که به عنوان یک فضای متخلخل در نظر گرفته شده است) مدل می شود. نتایج به صورت خلاصه عبارتند از:

- روش فضای متخلخل با در صد قابل قبولی رفتار جریان طبیعی را در محفظه راکتور، پیش بینی کرده است.
- استفاده از فضای متخلخل حجم شبکه بندی و در نتیجه زمان محاسبات کامپوتری را کاهش می دهد.
- برای کاهش خطا بهتر است پارامترهای اغتشاشی القایی فضای متخلخل نیز لحاظ شود.

۵- مراجع

- [1]. Pilehvar, A.F., et al., *Evaluation of compressible flow in spherical fueled reactors using the porous media model*. Annals of Nuclear Energy 2013. **57** p. 185–194.
- [2]. Zarifi, E., G. Jahanfarnia, and F. Veysi, *Thermal-hydraulic modeling of nanofluids as the coolant in VVER-1000 reactor core by the porous media approach*. Annals of Nuclear Energy 2013. **51** p. 203–212.
- [3]. Chahlafia, M., et al., *Radiative transfer within non Beerian porous media with semitransparent and opaque phases in non equilibrium: Application to reflooding of a nuclear reactor*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**: p. 3666–3676.
- [4]. Oukil, K., et al., *Porous Media Applied to Pebble Bed Modular Reactor Thermal-hydraulics*. Journal of Science Research, 2013. **6**: p. 19-23.
- [5]. FUMIZAWA, M., Y. KANEKO, and M. IZUMI, *Porosity Effect in the Core Thermal Hydraulics for Ultra High Temperature Gas-cooled Reactor SYSTEMICS, CYBERNETICS AND INFORMATICS* 2007. **6**(6): p. 86-92.
- [6]. Chandesrisa, M., G. Serre, and P. Sagaut, *A macroscopic turbulence model for flow in porous media suited for channel, pipe and rod bundle flows*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006. **49**: p. 2739-2750.
- [7]. Ricciardi, G., et al., *Modelling Pressurized Water Reactor cores in terms of porous media*. Journal of Fluids and Structures, 2009. **25**: p. 112–133.
- [9]. Yizhou Yan, Rizwan-uddin, and Nahil Sobh, "CFD SIMULATION OF A RESEARCH REACTOR", American Nuclear Society Topical Meeting in Mathematics & Computations, Avignon, France, (2005).
- [10]. Bejan, Adrain, 'Convective heat transfer', 2013, taylor and francis.