



## بررسی و رفع منابع خطا در محاسبه پارامترهای محیط متخلخل برای راکتور تهران

روزبه، وادی؛ کامران، سپانلو

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

### چکیده:

نسبت های ابعادی تند هندسی باعث لزوم استفاده از روش های عددی پیشرفته با چگالی مش بندی بالادر مدل سازی ترموهیدرولیک دقیق مجتمع سوخت راکتور هسته ای می شود. این امر شبیه سازی مستقیم کل قلب راکتور را از لحاظ محاسباتی بسیار هزینه زا می کند. راه حل این مسئله استفاده از مدل محیط متخلخل است. در این مطالعه با استفاده از نرم افزار *Fluent* مدل بسیار دقیقی از مجتمع سوخت راکتور تهران ارائه می شود. این مدل بعد از صحت سنجی برای حالت کارکرد طبیعی، جهت استخراج پارامترهای محیط متخلخل در حالت جابه جایی آزاد بکار می رود. منابع خطا در این محاسبات جستجو و رفع شده بطوریکه امکان کاهش خطا در محاسبات به زیر یک درصد فراهم شده است.

کلمات کلیدی: مدل سازی *CFD* مجتمع سوخت، مدل محیط متخلخل، انتقال حرارت جابجایی آزاد

### ۱. مقدمه:

روش محیط متخلخل در مدل سازی فیلترها، کاتالیزورها، بانک لوله و صفحه و بطور کلی هر کاربردی که با نسبت های ابعادی تند و غیر متعارف سروکار داشته باشد، کاربرد دارد. برای استفاده از این مدل باید ابتدا با ظرافت بخشی از فضای مورد حل را بعنوان محیط متخلخل انتخاب و سپس در این محیط تمامی پیچیدگی های هندسی حذف و بجای آن ضرایب افت ویسکوز ناشی از اصطکاک و افت اینرسی ناشی از انبساط یا انقباض مسیر عبور جریان را در نظر گرفت. واضح است که دقت استفاده از این مدل کاملاً وابسته به دقت تخمین پارامترهای آن است. روشهای مختلفی برای برآورد این پارامترها در محیط تعیین شده وجود دارد [۱]. در مورد راکتور این محیط مجتمع سوخت آن می باشد که امکان شبیه سازی دقیق عددی آن بطور مجزا وجود دارد. این امر در مرجع [۲] برای راکتور تحقیقاتی *opal* [۳] که از نوع استخری  $20\text{Mw}$  است، طبق دستورالعمل مرجع [۴] انجام شده است. سطح مقطع مجتمع سوخت این راکتور که سازنده مشترکی با راکتور تهران دارد، بسیار شبیه راکتور تهران است، اما تعداد صفحات آن ۲۱ و ارتفاع آن در حدود ۲۵ درصد بلندتر است. میزان افت فشار در این مجتمع سوخت در حالت کارکرد طبیعی حدود  $24\text{kpa}$  گزارش شده است [۳]. در حالیکه مرجع [۲] این افت فشار را حدود  $18\text{kpa}$  محاسبه می کند. با وجود خطای حدود ۲۵ درصد، همین مدل برای تولید پارامترهای محیط متخلخل در حالت جابجایی آزاد بکار رفته است. در بخش ۲ این مقاله ضمن ارائه مدلی بسیار دقیقتر برای راکتور تهران، ریشه های این خطا بررسی و رفع می شود. بخش سوم الگوی اصلاح شده ای برای تولید دقیقتر پارامترهای محیط متخلخل ارائه و کاربرد عملی آنرا در کاهش



خطای محاسبات در مورد راکتور تهران به کمتر از یک درصد نشان می دهد. بخش آخر این مقاله شامل خلاصه ای از نتایج حاصله است.

## ۲. مدل سازی مجتمع سوخت و بحث روی نتایج حاصله از حالت کارکرد طبیعی

جهت برآورد دقیق پارامترهای محیط متخلخل باید شبیه سازی مجتمع سوخت بنحوی انجام شود که تغییرات دما و فشار جریان عبوری از آن با بالاترین دقت ممکن محاسبه شود. برای این منظور هندسه نشان داده شده در شکل ۱ در نظر گرفته شده است. این هندسه پیچیده برای در نظر گرفتن حداکثر جزئیات لازم از ۵ بخش مجزا تشکیل شده است که بطور جداگانه در نرم افزار Inventor تولید و در نرم افزار Gambit شبکه بندی شده و نهایتاً در نرم افزار Fluent به یکدیگر متصل و حل شده اند. این ۵ بخش شامل: ۱. بخش مرکزی، ۲. بخش جانبی، ۳. اتصال انتهایی، ۴. بخش بالایی و ۵. بخش پایینی هستند. بخش جانبی در حقیقت فضای عبوری جریان جهت خنککاری سمت خارجی صفحات جانبی را دربر می گیرد. همانطور که دیده می شود، این ناحیه تا انتهای مجاری ایجاد شده در صفحه نگهدارنده ادامه دارد. قسمت های بالا و پایین جهت در نظر گرفته شدن اثر ترکیب و مجزا شدن جریان حیاتی هستند و به این سؤال پاسخ می دهند که اساساً تقسیم بندی جریان بین مجاری مرکزی و جانبی چگونه است. ۴. مرز مشترک این ۵ بخش بصورت مرز مش مجزا تعریف شده اند. این بدان معنی است که شبکه بندی استفاده شده در ۲ طرف این مرز یکی نبوده و در حین حل با استفاده از روشهای پیشرفته میانمایی، تمامی متغیرهای مورد حل بین دو ناحیه مبادله می شوند. این امر در شکل ۲ نشان داده شده است. با این وجود این هندسه در مجموع حدود ۴,۶ میلیون مش دریافت کرده است. این هندسه شامل مدل سازس انتقال حرارت در سوخت از جنس  $U_2O_8-Al$  و غلاف و سایر بخش های ساختاری از جنس  $Al-6061$  می شود که خصوصیات این مواد از مرجع [۵] برگرفته شده که در این میان تعریف ضریب هدایت حرارتی سوخت از رابطه زیر که در آن دما برحسب درجه کلوین است، از اهمیت برخوردار است.

$$K=180,26-2,29E-2 \times T \text{ [W/ (m .K)]} \quad (1)$$

برای تعریف شار حرارتی حجمی تولیدی در سوخت، در تک تک ۱۹ صفحه با استفاده از یک برنامه الحاقی به نرم افزار با زبان برنامه نویسی C، شار حرارتی در دو راستای محوری و موازی با صفحات بصورت کسینوسی و در راستای عمود به آنها ثابت در نظر گرفته شده است. جهت تعریف دقیق خصوصیات خنک کننده از جدول بخار در فشار کارکردی ۱,۷۱ bar، هر چهار خصوصیت چگالی، ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی، ظرفیت حرارتی ویژه در محدوده  $303,15^\circ K$  تا  $388,48^\circ K$  استخراج، به نرم افزار Matlab منتقل و تابعی چند جمله ای به این داده ها منطبق شده است. روابط بدست آمده که اعمال آنها برای محاسبه چگالی و ویسکوزیته از اهمیت بالایی برخوردار است، بدین صورت می باشد.

$$\rho=848,13+1,3181 \times T-0,00274 \times T^2 \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad (2)$$



$$\mu = 0,14667 - 0,0015481 \times T + 6,1935E-6 \times T^2 - 1,089E-8 \times T^3 + 7,4813E-12 \times T^4 \text{ [pa.s]}$$

برای حالت کارکرد طبیعی ورودی در بالا و دما و سرعت متوسط برای آن  $303,15^\circ\text{K}$  و  $1,37\text{m/s}$  در نظر گرفته شده است. جدول ۱ نتایج بدست آمده برای تغییرات فشار و دما برای اعمال فرضیات و مدل‌های عددی مختلف را نشان می‌دهد. اولین نکته اساسی در مورد نتایج این مدل سازی مربوط به شرایطی است که با صرف نظر از جریان عبوری از قسمت جانبی، این قسمت به همراه دو بخش بالایی و پایینی که در واقع بخش هایی از فضای استخر و پلنیوم هستند از هندسه مورد حل حذف شوند. بدین ترتیب برای در نظر گرفتن اثر تولید حرارت در صفحات جانبی از منبع حرارتی سطحی که از طریق برنامه نویسی ولی این بار به صورت شرایط مرزی تعریف می‌شود، استفاده شده است. این ساده سازی که تنها بخش مرکزی و اتصال انتهایی را باقی می‌گذارد، دقیقاً همان فرضی است که مرجع [۲] برای مدل سازی مجتمع سوخت راکتور opal بکار برده است. حال اگر نتایج این حالت با شرایط هندسه کامل در حالتی که سایر شرایط همسان هستند مقایسه شود درصد تغییر نتایج افت فشار، بسیار نزدیک به درصد خطایی است که برای محاسبات مرجع [۲] در مقدمه این مقاله به آن اشاره شد. این نتیجه علاوه بر تأیید صحت مدل هندسه کامل، گواهی نیز بر اهمیت بالای در نظر گرفتن اثر ترکیب و جدایش جریان در ابتدا و انتهای مجتمع سوخت روی صحت محاسبات بخصوص میدان توزیع فشار است. مسئله بعدی استفاده از مدل‌های عددی پیشرفته تر بجای نمونه استاندارد آنها بویژه در مجاورت دیواره است. جدول ۱ اثر قابل توجه استفاده از مدل اغتشاش RKE به همراه Enhanced wall treatment بجای SKE همراه Standard wall treatment نشان می‌دهد [۶]. نکته دیگر قابل توجه در نتایج، مربوط به سهم جریان عبوری از مجرای جانبی است. از دبی کل ورودی یعنی  $8,521 \text{ kg/s}$  تنها  $0,0107 \text{ kg/s}$  آن از این مجرا عبور می‌کند که سهمی معادل  $0,126$  درصد را نشان می‌دهد. این میزان که در محاسبات بخش بعدی هم حفظ می‌شود،  $27$  درصد کمتر از مقدار  $0,172$  درصدی است که از نسبت مساحت این دو مجرا بدست می‌آید. به همین دلیل همواره افت فشار و افزایش درجه حرارت در مجرای جانبی بالاتر از مجرای مرکزی است. در نتیجه قطر مجرای جانبی مناسب انتخاب نشده است.

### ۳. مدل سازی معکوس شدن جریان و تولید و صحت سنجی پارامترهای محیط متخلخل برای آن

در حالت انتقال حرارت جابجایی آزاد، جهت جریان معکوس می‌شود و ورودی در پایین قرار می‌گیرد. برای تولید پارامترهای محیط متخلخل از الگوریتم نشان داده شده در شکل ۳ استفاده شده است. درجه حرارت ورودی در این حالت برای تمامی سرعتها  $310,95^\circ\text{K}$  است. نتایج محاسبات به همراه خطای استفاده از مدل بوزینسک در جدول ۲ نمایش داده شده است. داده های ستون دوم این جدول مطابق شکل ۴ روی نمودار برده شده، تابعی درجه دو به آن منطبق می‌شود، از دو ضریب حاصله طبق روابط زیر ضرایب افت ویسکوز  $D_z$  و اینرسی  $C_z$  بدست می‌آیند [۶].

$$\Delta P = A \times T^2 + B \times T$$



$$A = 0.5 \times C_z \times \rho \times \Delta H \quad \Delta H = \text{طول مجتمع سوخت} \quad (3)$$

$$B = \mu \times D_z \times \Delta H$$

نتایج حاصله در جدول ۲ دیده می شود. اصلاحی که در الگوریتم اعمالی نسبت به مراجع [۲] و [۴] انجام شده است، مربوط به اثر اضافه کردن حل معادله بقای انرژی و در نظر گرفتن تأثیر توزیع دمای حاصل از آن در تعیین دقیق خصوصیات مادی در مدل اصلی و همچنین استخراج مقدار متوسط حجمی چگالی و ویسکوزیته از این مدل علاوه بر اختلاف فشار در محاسبه پارامترها می باشد. بدین ترتیب بر خلاف این ۲ مرجع بجای بدست آوردن تنها یک سری ضریب برای تمامی سرعتها، برای هر سرعت طبق توزیع دمای واقعی حاصله ضرایب منحصر بفردی بدست می آید. با این وجود اگر ضرایب اولیه برای افت فشار در محدوده سرعت خاصی تولید شوند، اما برای سرعتی خارج این محدوده استفاده شوند منجر به نتایج نامناسبی خواهند شد. برای نمونه با بکاربردن ضرایب تولید شده برای محدوده ۰.۰۱ تا ۰.۱ برای سرعت های ۰.۵ و ۱.۰ با واحد متر بر ثانیه منجر به خطایی به ترتیب ۳.۱ و ۸.۵ بر حسب درصد می شود. دیده می شود که هر چقدر از محدوده سرعت اولیه دور شویم خطا بیشتر می شود. شکل ۴ کانتور توزیع دما و فشار را روی سطوح خارجی بخش مرکزی و اتصال انتهایی را نشان می دهد. قسمت آبی تیره در بخش فوقانی نشاندهنده محل تشکیل چشمه ممتوم است که در سرعت های بالاتر دیده نمی شود، در نتیجه سرعت واقعی عبوری در شرایط جابجایی آزاد بین ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ متر بر ثانیه تخمین زده می شود.

#### ۴. نتایج

نتایج حاصله از تحلیل عددی مجتمع سوخت راکتور تهران در حالت کارکرد طبیعی، منابع خطا در این محاسبه را طبق ترتیب اهمیت زیر حاصل می کند. ۱. در نظر نگرفتن اثر ترکیب و جدایش جریان در ابتدا و انتهای مجتمع سوخت با حذف هندسه بخش جانبی، بالایی و پایینی. ۲. عدم استفاده از مدل های عددی پیشرفته در شبیه سازی اغتشاش در هسته مرکزی جریان و بویژه در نزدیکی دیواره ها برای مجاری باریک بین صفحات سوخت. ۳. اثر حذف مجاری کوچکی که هرچند سهم کمی از نرخ جریان کل را دریافت می کنند اما سهم غیر قابل صرفنظری در کاهش دمای خروجی و افزایش افت فشار کلی دارند. ۴. در نظر نگرفتن اثر انتقال حرارت روی میدان توزیع فشار بخصوص از طریق تعیین دقیق خصوصیات مادی خنک کننده در اثر میدان توزیع دما. ۵. استفاده از مدل بوزینسک در محاسبه انتقال حرارت جابجایی آزاد. درحالتی که جهت جریان معکوس شده و انتقال حرارت جابجایی آزاد برقرار است با کاهش سرعت متوسط، خطای القایی در اثر استفاده از مدل بوزینسک از اثر ۵ بتدریج به اثر ۲ در سرعت ورودی  $0.01 [m/s]$  ارتقا می یابد. سایر منابع خطا در این حالت عبارتند از اعمال چشمه تولید حرارت به شکل و در محل نادرست، در نظر نگرفتن توزیع دما در تعیین مقدار متوسط چگالی و ویسکوزیته اعمالی در محاسبه پارامترهای محیط متخلخل و استفاده از تابع درجه دوم انطباقی بی کیفیت یا اعمال آن در محل نادرست در محاسبه پارامترها. تمامی این

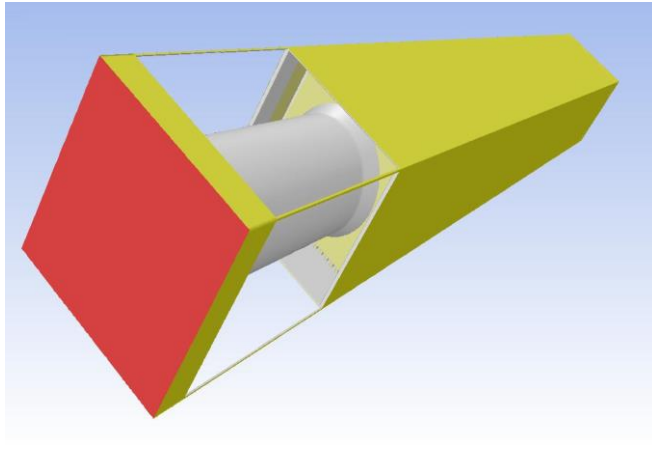


منابع خطا در این مقاله مورد بحث قرار گرفته و رفع شده اند بطوریکه خطای استفاده از مدل محیط متخلخل در تمامی سرعت های مورد بررسی به کمتر از یک درصد کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این مطالعه جاری نتایج قابل توجهی از تحلیل میدان جریان در مورد نحوه تقسیم جریان بین مجاری مرکزی و جانبی و نقطه تشکیل در اصطلاح چشمه مومتوم روی صفحات سوخت در حالت برقراری جابجایی آزاد دارد.

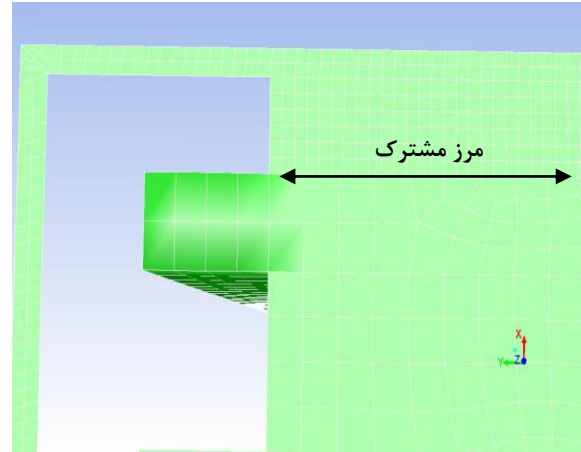
جدول ۱: تغییرات فشار و دمای خروجی در حالت کارکرد عادی

فرضیات و مدل های عددی	مدل ساده شده هندسی	با معادلات اغتشاش استاندارد	بدون فواصل آبی انتهایی صفحات	با خصوصیات مواد ثابت و میانگین	بدون حل معادله انرژی*	با مدل بوزینسک	مدل کامل
$\Delta p$ [pa]	16603.653	18722.886	20881.961	21320.45	21013.189	21907.747	21962.504
$T_{out}$ [°K]	309.523	309.144	309.042	308.215	-----	308.147	308.180

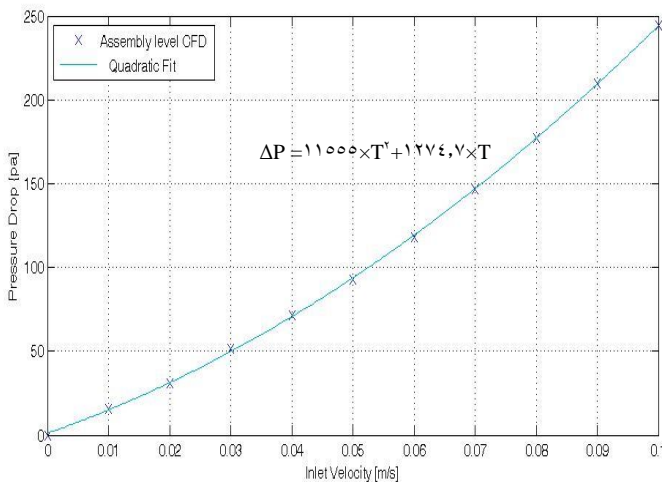
\* با چگالی و ویسکوزیته ای حل شده است که از میانگین حجمی مقادیر این دو متغییر از مدل کامل بدست آمده است.



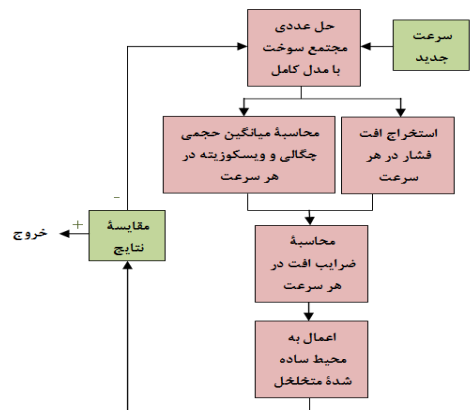
شکل ۱: هندسه کامل



شکل ۲: مش غیر پیوسته در مرز مشترک قسمت مرکزی و میانی



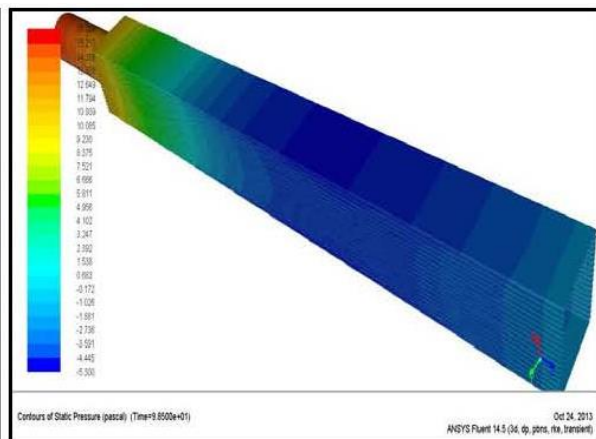
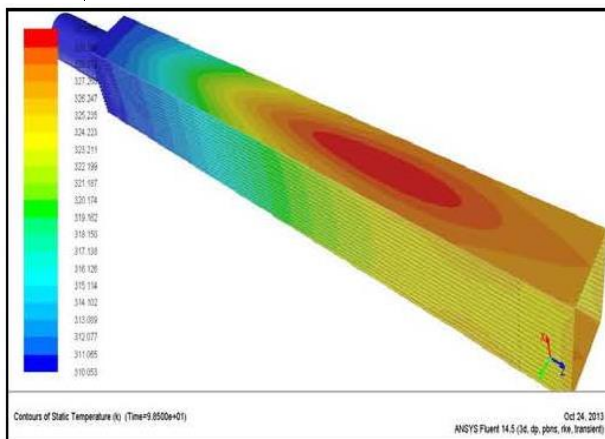
جدول ۱: تغییرات فشار با سرعت در حالت جابجایی آزاد و پارامترهای محیط متخلخل و صحت سنجی آن



شکل ۳: الگوریتم اصلاح شده محاسبات ضرایب افت



سرعت ورودی [m/s]	افت فشار واقعی [pa]	$\mu$ [pa.sec]	P [kg/m <sup>3</sup> ]	C <sub>z</sub> [1/m]	D <sub>z</sub> [1/m <sup>2</sup> ]	افت فشار محیط متخلخل [pa]	خطای استفاده از مدل پوز بنسک به درصد
0.01	15.954	0.00059848	990.015	26.361	2405299.826	15.468	10.3
0.02	31.123	0.00063575	991.553	26.321	2264298.399	30.822	7.4
0.03	51.368	0.00064986	992.056	26.307	2215115.314	49.279	6.4
0.04	71.217	0.00065736	992.309	26.301	2189844.678	70.024	5.6
0.05	92.834	0.00066190	992.457	26.297	2174825.359	93.124	4.8
0.06	118.107	0.00066495	992.554	26.294	2164848.410	118.559	4.1
0.07	146.557	0.00066715	992.624	26.292	2157732.694	146.316	3.5
0.08	177.315	0.00066880	992.675	26.291	2152395.062	176.391	3.0
0.09	209.925	0.00067010	992.715	26.290	2148241.208	208.780	2.7
0.10	244.294	0.00067113	992.748	26.289	2144912.839	243.478	2.2
0.50	3367.280	0.00067872	992.976	26.283	2120931.284	3365.679	0.9
1.00	11655.492	0.00067966	993.004	26.282	2117997.800	11657.001	0.034



شکل ۴: کانتورهای توزیع فشار (راست) و دما (چپ) از حل مدل کامل در سرعت ورودی  $0.01 \text{ [m/s]}$

منابع:

1. D. A. Nield and A. Bejan : Convection in Porous Media, Springer-Verlag, New York, ۱۹۹۲.
2. Yan Yizhou : Development of a Coupled CFD System-code Capabilty & its Applications to Simulate Current & Next Generation Reactors, PHD thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, ۲۰۱۱
3. ANSTO : Summary of the Preliminary Safety Analysis Report (PSAR) for the ANSTO Replacement Research Reactor Facility, Australian Nuclear Science and Technology Organization, ۲۰۰۱.
4. M. Chandresris, 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 & Mass Transfer, ۴۹:۲۷۳۹-۲۷۵۰, July ۲۰۰۶.
5. IAEA-TECDOC-۹۴۹: Thermo-physical properties of materials for water cooled reactors, IAEA, VIENNA, ۱۹۹۷
6. Fluent ۱۴,۵ documentation, Fluent Inc. Ansys Incorporated, September ۲۰۱۲