



شبیه سازی ترموهیدرولیکی مجموعه سوخت کروی راکتور PBMR به روش CFD

محمد نظیفی فرد^{۱*}

منوچهر روشن ضمیر

محمد رضا نعمت الهی

دانشجوی دکتری، دانشگاه شیراز

استادیار، دانشگاه شهید بهشتی

استادیار، دانشگاه شیراز

چکیده

در این مطالعه مجموعه سوخت کروی یک راکتور نوعی PBMR با استفاده از کد ترموهیدرولیکی Fluent به صورت سه بعدی شبیه سازی شد. در این نوع راکتورها از گاز هلیوم به عنوان سیال خنک کننده در دمای بالا (حدود 1170 K) استفاده می شود. به علت دمای بالای سیال کاری در این نوع راکتورها، بازده حرارتی آنها نسبت به سایر راکتورها نظیر راکتورهای آب سبک، بالاتر (حدود ۴۸٪ در مقابل ۳۲٪) است اما در مقابل توان حرارتی پایینی در مقابل راکتورهای آب سبک دارند. نتایج شبیه سازی عددی سه بعدی قسمتی از قلب این راکتور نشان داد، تماس سیال خنک کننده در بالاترین ($0 \rightarrow \theta$) و پایین ترین ($180 \rightarrow \theta$) سطح کره با کره سوخت حداقل است و دمای این سطوح حدود ۶۳ درصد از مقدار متوسط دمای سطح کره بالاتر است و از آنجا که کره های سوخت به صورت ثابت در کنار هم قرار گرفته اند، احتمال بروز نقطه داغ در این قسمتها بیشتر است.

کلمات کلیدی: راکتور PBMR، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، کد ترموهیدرولیکی Fluent، مجموعه سوخت کروی، مدل K-E استاندارد.

۱- مقدمه

در راکتورهای هسته ای دما بالا خنک شونده با گاز^۲ از گاز هلیوم به عنوان سیال خنک کننده و از گرافیت به عنوان کندکننده استفاده می شود. در نوع خاصی از این راکتورها به نام PBMR^۳ سوخت هسته ای در یک کره گرافیتی به ضخامت ۵ میلی متر و قطر بیرونی ۶ سانتی متر قرار دارد. کره ها درون قلب در کنار یکدیگر ثابت قرار می گیرند و گاز هلیوم تحت فشار ۸/۵ مگاپاسکال با دمای 500 C° از بالای قلب وارد می شود و پس از عبور از میان ۳۸۰۰۰۰ کره سوخت با دمای 900 C° از قلب راکتور خارج می گردد. شکل ۱ کره سوخت و سیکل کاری یک راکتور PBMR را نمایش می دهد.

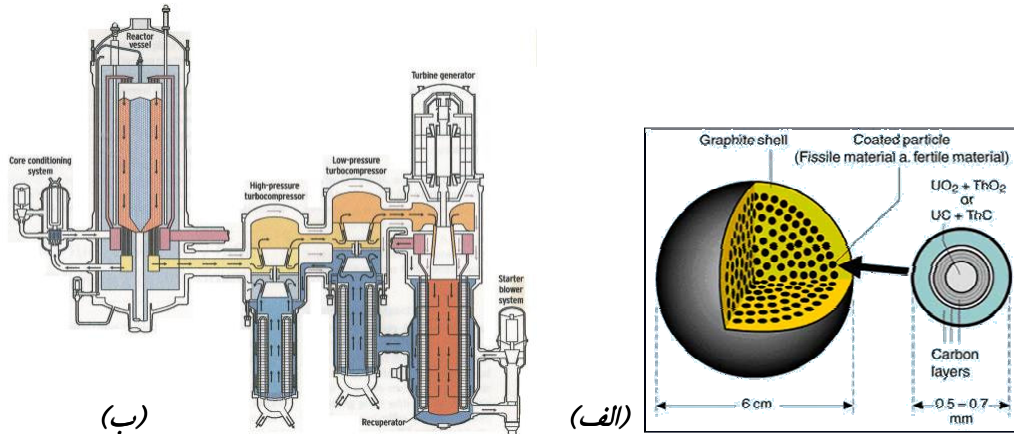
از آنجا که دمای سیال کاری در این راکتور بالاست، بازده حرارتی بالاتری نسبت به سایر راکتورها نظیر راکتورهای آب سبک دارند و ذاتا ایمنتر از راکتورهای آب سبک می باشند اما در مقابل توان حرارتی پایینی نسبت به راکتورهای آب سبک (250 MW_{th} در مقابل 3000 MW_{th}) دارند و دسترسی به توانهای حرارتی بالاتر در این راکتورها، هزینه های مربوط به ساخت راکتور را افزایش می دهد. در سوخت این نوع راکتورها امکان

1-Nazifi@Gmail.com

2- High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)

3- Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)

دسترسی به میزان مصرف سوخت بالاتر وجود دارد و در عین حال نشت مواد رادیواکتیو از سوخت به سیال بسیار ناچیز است. در جدول ۱ پارامترهای مختلف یک راکتور PBMR آورده شده است. [۱]



شکل ۱. الف) ابعاد کره سوخت و جزئیات آن ب) سیکل کاری راکتور PBMR [۱]

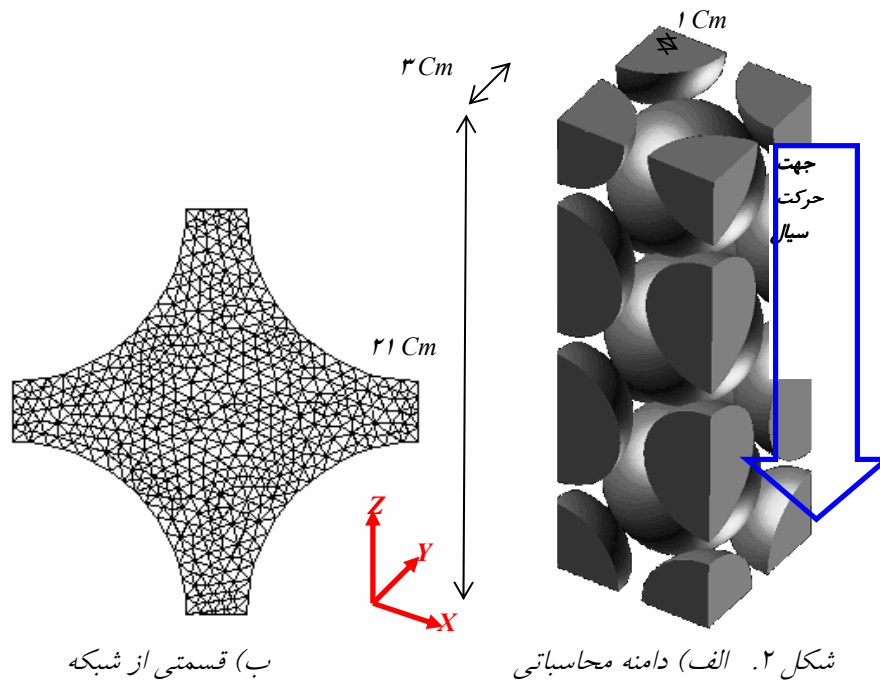
تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با خواص ترموهیدرولیکی سیال در اطراف یک کره تنها صورت گرفته است [۲ و ۳ و ۴ و ۵ و ۶]. Lee در سال ۲۰۰۰ و Bachiard و همکارش Balachandar در سال ۲۰۰۲ الگوی سیال را در اطراف یک کره تنها به صورت عددی شبیه سازی نمودند [۷ و ۸]. همچنین Gashchin و همکارانش در سال ۲۰۰۲ پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال خنک کننده در اطراف یک استوانه و یک کره با فلاکس حرارتی ثابت را عملاً مورد آزمایش قرار دادند و با مدلسازی عددی، پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال را مورد بررسی قرار دادند [۹]. اما تا بحال تحقیقات کمی در رابطه با یک مجموعه سوخت کروی در کنار هم، صورت گرفته است. Calis و همکارانش در سال ۲۰۰۱ افت فشار و الگوی جریان را برای یک مجموعه کره های غوطه ور در سیال برای یک راکتور شیمیایی به صورت عددی محاسبه نمودند [۱۰]. شکل ۲ ابعاد کره سوخت و سیکل کاری راکتور PBMR را نمایش می دهد.

جدول شماره ۱. پارامترهای مختلف یک راکتور نوعی PBMR [۱]

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار |
|-----------------|---------------|--------------------|------------|
| توان حرارتی | $MW_{th} 250$ | دبی جرمی سیال | $kg/s 120$ |
| توان الکتریکی | $MW_e 120$ | قطر کره سوخت | $mm 60$ |
| بازده حرارتی | ٪۴۸ | تعداد کره های سوخت | ۳۸۰۰۰۰ |
| فشار کاری | $MPa ۸۵$ | قطر قلب | $m ۳۷$ |
| دمای خروجی سیال | $C^\circ 900$ | ارتفاع قلب | $m 9$ |

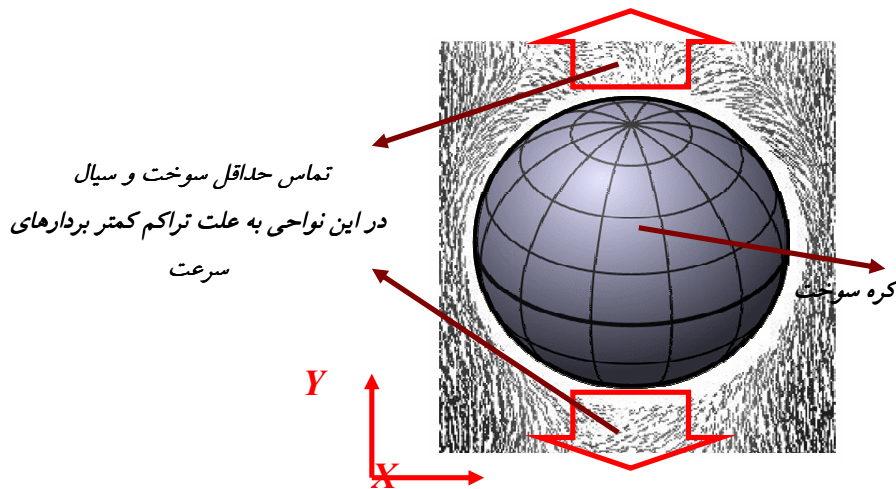
۲- روش انجام کار

به علت وجود تقارن در قلب راکتور PBMR، ۲۱ سانتی متر از کل ارتفاع قلب مدل شد. با استفاده از نرم افزار پیش پردازنده Gambit از تمام ویژگیهای هندسه از جمله تقارن بهره گرفته شد تا با حداقل حجم محاسبات، مدل محاسباتی تا حد امکان به نمونه واقعی نزدیک گردد. برای آنالیز جریان از نرم افزار Fluent استفاده شده است. ابعاد مدل محاسباتی در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. معادلات حاکم بر سیال به روش حجم محدود حل شده اند و الگوریتم Simple برای جریان سیال انتخاب شده است. شبکه عددی مناسب برای جریان غیر یکنواخت سیال در نزدیکی کره ها که تغییر سرعت سیال و انحراف آن بیشتر است، ریزتر شده است. مشهای مثلثی دو بعدی برای مدلسازی سطح کره های سوخت بکار رفت و از یک شبکه غیر ساخت یافته جهت مدلسازی حجمها استفاده شد. شکل (۱-ب) قسمتی از شبکه را نمایش می دهد. با توجه به توان حرارتی راکتور (250 MW_{th}) و تعداد کره های سوخت (۳۸۰۰۰۰ عدد)، فلاکس حرارتی سطحی کره سوخت معادل 58194 W/m^2 و رینولدز جریان سیال معادل با ۸۵۰۰۰ قابل محاسبه می باشد. با توجه به دما و سرعت بالای سیال از مدل K-ε استاندارد استفاده شد. کامپیوتر مورد استفاده جهت حل عددی، یک کامپیوتر رومیزی با پردازشگر 3.2GHz همراه با دو گیگا بایت حافظه اصلی بود و خطای قابل قبول برای هر مدل کوچکتر از 10^{-6} بود. تعداد کره ها در مش حجمی معادل ۹۱۴۷۵۲ کره بود.



۳- نتایج

برای بررسی صحت مدل‌سازی، سعی شده است دامنه محاسبات به اندازه کافی بزرگ باشد و شبکه‌ها به اندازه کافی کوچک انتخاب گردد. لذا محاسبات عددی صورت گرفته مستقل از دامنه محاسباتی و شبکه بندی می باشد. نتایج بدست آمده شامل بردارهای سرعت، پروفیل دما و پروفیل فشار در مدل محاسباتی در نظر گرفته شده (شکل ۲- الف) می باشد. از آنجا که کره های سوخت در این راکتور به طور ثابت در کنار هم قرار گرفته اند، لذا احتمال بروز لکه های داغ^۴ بر روی سوخت وجود دارد. اصولاً لکه های داغ در محل هایی از سوخت تشکیل می شوند که دمای سطح سوخت از سایر نواحی بالاتر است. بروز لکه های داغ بر روی سوخت موجب آسیب دیدن تدریجی سوخت و نشت مواد رادیواکتیو به درون سیال خنک کننده می گردد. با بررسی بردارهای سرعت و بدست آوردن پروفیل دما بر روی سطح کره می توان محل بروز این نقاط را بر روی سطح سوخت پیشبینی نمود.

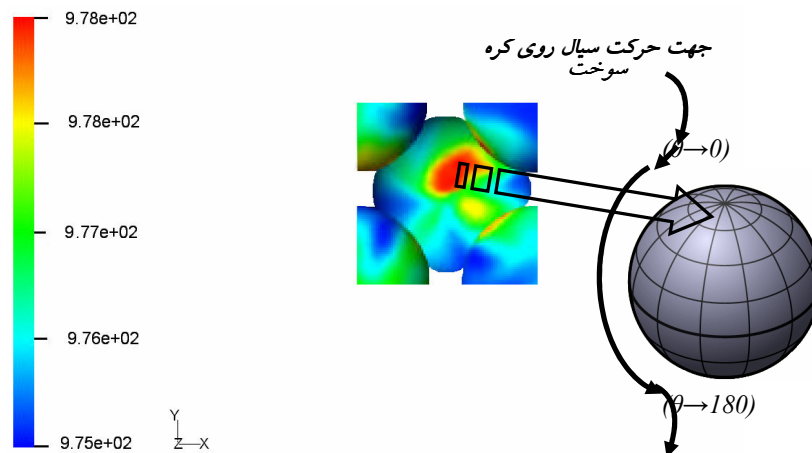


شکل ۳. نمودار بردارهای سرعت اطراف کره سوخت در صفحه X-Y

در شکل ۳ توزیع خطوط جریان سیال در صفحه میانی از مدل محاسباتی نمایش داده شده است. تراکم این خطوط در هر نقطه نشان دهنده بالا بودن میزان اختلاط سیال و میزان خنک کنندگی سیال می باشد. همانطور که مشاهده می شود در ناحیه های مشخص شده در شکل با علامت فلش به سمت بالا و پایین، تماس سیال خنک کننده با سطح کره نسبت به سایر نواحی حداقل است. در سایر نواحی سطح کره، بردارهای سرعت

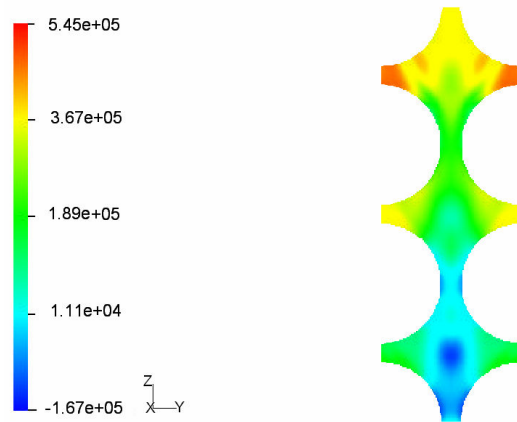
تراکم بیشتری دارند و سیال در تماس بیشتری با سوخت قرار دارد. با توجه به شکل ۳ علت این مساله آن است که گاز خنک کننده از میان سوخت کوتاه ترین مسیر به سمت پایین قلب را طی می کند و مطابق شکل بردارهایی که در راستای عمودی قرار گرفته اند تراکم بیشتری دارند.

شکل ۴ پروفیل دما در صفحه خروجی مدل محاسباتی را نمایش می دهد. همانطور که انتظار می رفت دمای سطح کره در بالاترین و پایتترین سطح آن مقدار بالاتری نسبت به سایر نواحی سطح کره دارد و احتمال بروز لکه داغ در این سطوح بیشتر است. نتایج شبیه سازی نشان داد دمای این نواحی به طور متوسط حدود ۶/۳ درصد از دمای متوسط سطح کره بالاتر است.



شکل ۴. پروفیل دما در صفحه $Y-X$ (بر حسب کلوین)

شکل ۵ پروفیل فشار را نمایش می دهد. افت فشار متوسط بوجود آمده در طول مدل محاسباتی معادل 346 KPa می باشد که با مدل واقعی نیز مطابقت دارد. پروفیل فشار در راستای محور افقی تقارن دارد. لازم به ذکر است ارتفاع اکتیو قلب (ارتفاع مجموعه سوخت کروی) حدود ۱۹ برابر بزرگتر از ارتفاع مدل محاسباتی در نظر گرفته شده در این مطالعه می باشد و افت فشار کل قلب بر اساس پارامترهای محاسبه شده در مدل محاسباتی قابل تخمین است. میزان افت فشار در مدل محاسباتی Lee معادل 427 KPa که اختلاف موجود به علت اختلاف در کد محاسباتی بکار رفته می باشد [۷].



شکل ۵. پروفیل فشار در صفحه Z-Y (بر حسب پاسکال)

۴- بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه پارامترهای ترموهیدرولیکی مهم سیال خنک کننده و سوخت نظیر بردارهای سرعت، پروفیل دمای سطح سوخت و پروفیل فشار برای یک راکتور PBMR نوعی به صورت عددی بکارگیری روش CFD و به کمک کد محاسباتی *Fluent* مدل‌سازی و محاسبه شد. با توجه توزیع خطوط جریان و پروفیل دمای سطح سوخت، مشاهده شد تماس سیال با سطح سوخت در بالاترین (معادل $\theta \rightarrow 0$ در مختصات کروی) و پایین ترین ($\theta \rightarrow 180$) نواحی سطح کره سوخت (بالاترین و پایین ترین سطح نسبت به کف قلب راکتور) حداقل می باشد و به علت کاهش ضریب انتقال حرارت موضعی در این قسمت‌ها، دمای این نواحی به طور متوسط حدود $2/3$ درجه کلوین ($6/3$ درصد بالاتر از مقدار متوسط دمای سطح کره سوخت) از سایر نواحی بالاتر است و احتمال بروز لکه های داغ در این سطوح بیشتر می باشد زیرا کره های سوخت در راکتورهای PBMR، درون قلب بصورت ثابت در کنار یکدیگر قرار دارند و گاز خنک کننده کوتاهترین مسیر را از میان کره های سوخت طی می کند و سیال تماس کمتری با سطوح ذکر شده دارد. افت فشار بوجود آمده در طول این مدل محاسباتی نیز معادل 346 KPa بود که با مدل واقعی نیز مطابقت دارد.

۵- مراجع

- [1] - PBMR Technical information <http://www.pbmr.com/>
- [2] - Chester W, Breach DR, Prudman I. "On the flow past a sphere at low Reynolds number". *J Fluid Mech*;37:751±60, (1969).
- [3] - Le Clair BP, Hamielec AE, Pruppacher HR. "A numerical study of the drag on a sphere at low and intermediate Reynolds numbers". *J Atmos Sci*;27:308±15, (1970).



- [4] - Pruppacher HR, Le Clair BP, Hamielec AE. "Some relations between drag and flow pattern of viscous flow past a sphere and a cylinder at low and intermediate Reynolds numbers". *J Fluid Mech*;44:781±99, (1970).
- [5] - Dennis SCR, Walker JDA. "Calculation of the steady flow past a sphere at low and moderate Reynolds numbers". *J Fluid Mech*;48:771±89, (1971).
- [6] - Kalro V, Tezduyar T. "3D computation of unsteady flow past a sphere with a parallel infinite element method". *Comp Methods in App Mech Eng*; 151:267±76, (1998).
- [7] - Lee S. "A numerical study of the unsteady wake behind a sphere in a uniform flow at moderate Reynolds numbers". *Computers & Fluids* 29:639-667, (2000).
- [8] - Bagchiand P., Balachandar S. "Steady planar straining flow past a rigid sphere at moderate Reynolds number". *Journal of Fluid Mechanics* 466:365-407, (2002).
- [9] - Gushchin V.A., Kostomarov A.V., Matyushin P.V. "Direct numerical simulation of the transitional separated fluid flows around a sphere and a circular cylinder". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90:341-358, (2002).
- [10] - Calis H.P.A., Nijenhuis J., Paikert B.C., Dautzenberg F.M., Van Den Bleek C.M. "CFD modeling and experimental validation of pressure drop and flow profile in a novel structured catalytic reactor packing". *Chemical Engineering Science* 56:1713 1720, (2001).