



ارزیابی مقایسه ای و حل عددی جریان آشسته نانو سیال $Al_2O_3/Water$ در

راکتور VVER-1000 به روش تک فازی و دو فازی

کمال حداد، عارف رحیمیان - محمد رضا نعمت الهی

دانشگاه شیراز، مهندسی هسته ای، دانشکده مهندسی مکانیک

چکیده

در این مقاله رفتار نانوسیال به عنوان خنک کننده در یک راکتور VVER-1000 به لحاظ افزایش ضریب انتقال حرارت خنک کننده و به عنوان نانوسیال در خنک کننده راکتور مورد بررسی قرار گرفته است. در مطالعات قبلی رفتار نوترونیکی نانو ذرات در قلب یک راکتور VVER-1000 ارائه گردیده [1]. رفتار ترموهیدرولیک نانو سیال قلب یک راکتور VVER-1000 مورد بررسی قرار داده شده است. که یک FA در راکتور VVER-1000 مدل شده و محاسبات بر روی آن به وسیله دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) انجام گردیده است و در نهایت نتایج ضریب انتقال حرارت افت فشار و همچنین اختلافات دما مشخص گردیدند. محاسبات عددی در دو بخش تک فازی و دو فازی در این مورد انجام شده است. نتایج بدست آمده از حل در بخش مجزای فوق نشان می دهد که حل بوسیله ی مدل دو فازی بهتر از حل تک فازی بوده و این عامل به دلیل قرار گرفتن 15 ردیف Spacer Grid در مدل اصلی می باشد که باعث افزایش توربولنسی و حرکت تصادفی ذرات می شود و این عامل سبب Tracking بیشتر و در نهایت برداشت بیشتر حرارت می شود.

کلمات کلیدی: راکتور VVER-1000، نانو سیال، جریان تک فازی، جریان دو فازی، CFD

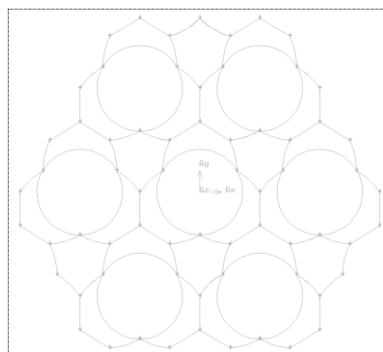
مقدمه

بازده بالای خنک کننده ها از مهمترین اهداف در صنعت می باشد. مقدار خیلی کم نانو ذرات، زمانی که به صورت یکنواخت و پایدار در یک سیال توزیع شود می تواند تاثیرات شگفت آوری در رفتار ترموهیدرولیک سیالات داشته باشد. نانوسیال به واسطه معلق شدن نانو ذرات با اندازه متوسط زیر 100nm در سیالاتی مثل آب، روغن یا اتیلن گلیکول ایجاد می شود [1]. Choi (1995) اولین کسی بود که این نوع سیالات را به عنوان نانو سیال معرفی کرد و شاخه تازه ای در نانو تکنولوژی را ایجاد نمود. به تازگی انتقال حرارت جوشش استخری در مورد نانو سیالات برای بدست آوردن شار بحرانی (CHF) مورد مطالعه قرار گرفته است. مدل های به کار گرفته در این مورد برای خنک کننده راکتورهای هسته ای که یک مقدار کم از نانو ذرات که عموماً زیر 1٪ حجمی می باشد می تواند CHF را به 20٪ افزایش دهد [2]. توانایی استفاده از نانو سیال برای بهبود (In- Vessel Retention) IVR در راکتورهای LWR در طول یک Sever Accident Scenario مورد مطالعه قرار گرفته است [3] که در آن نانو سیال توانایی بهبود برداشت حرارت تولیدی در حاشیه CHF را دارا می باشد. در این مقاله، انتقال حرارت به صورت همرفتی اجباری (Force Convection) برای نانو سیال ($Al_2O_3/Water$) در یک FA از راکتور VVER با شار حرارتی

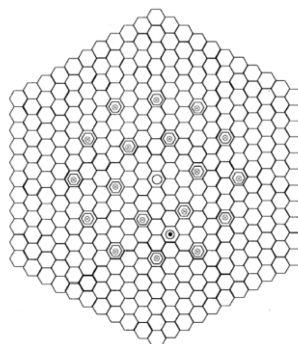
ثابت و یکنواخت بر روی دیواره سوخت می باشد به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده که ضریب انتقال حرارت برای نانو سیال از سیال پایه بیشتر بوده و این نسبت با افزایش عدد رینولدز و غلظت حجمی نانو ذرات بیشتر می شود. انجام این مطالعه دو هدف را مد نظر دارد، اولاً امکان بررسی نقش فاز سیال و ذرات جامد در انتقال حرارت بررسی گردد و ثانیاً به این نتیجه برسیم که مدل کردن دو فازی سیال به سیستم واقعی به واسطه گرانش، اصطکاک بین ذرات نیروهای براونی (Brownian forces)، نفوذ براونی، ته نشینی و پخش ذرات در نانو سیال اصلی نزدیکتر است و این بدان معنی است که slip velocity بین سیال و ذرات صفر نمی باشد [۴]. با این فرضیات مدل کردن نانو سیال به صورت دو فازی به حالت واقعی نزدیک تر می باشد. در محاسبات دو فازی ما از معادله Miller و Gidapow [۵] برای محاسبه ویسکوزیته فاز جامد استفاده نمودیم. نتایج این معادله ویسکوزیته بالای نانوسیال در حالت دو فازی را ایجاد می نماید. برای اثبات صحت مدل و حل آن نتایج بدست آمده را با نتایج حاصل از مطالعات تجربی مقایسه نموده و مشاهده گردید که نتایج با داده های تجربی همخوانی خوبی دارد.

توضیح و مدل مسئله

یک مجتمع سوخت (FA) در قلب را برای محاسبات عددی مدل نمودیم (شکل ۱) بواسطه دسته بندی متقارن میله های سوخت در یک مجتمع سوخت مدل هندسی به صورت ۷ میله سوخت کافی می باشد (شکل ۲). میله های سوخت دارای قطر ۹/۱mm و در فاصله ۱۲/۷۵mm از مرکز یکدیگر به صورت مثلثی قرار دارند. طول مجتمع سوخت ۳۵۵۰mm می باشد و شار حرارتی در طول آن وارد می شود. عدد رینولدز بیشتر از ۲۵۰۰ می باشد که نشان دهنده حالت کاملاً آشفته سیال در مجتمع سوخت می باشد. میله های سوخت به واسطه ۱۵ ردیف spacer grid نگه داشته شده است که ضخامت آنها ۰/۸mm می باشد (شکل ۲).



شکل ۲. مدل هندسی مورد بررسی



شکل ۱. یک مجتمع سوخت

خواص ترموفیزیکی

خواص ترموفیزیکی خنک کننده در حالت کارکرد راکتور برای سیال پایه از کتاب های راهنمای مهندسی هسته ای استخراج شده [۶] و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. خواص ترموفیزیکی در حالت کارکرد راکتور

	ρ (kg/m ³)	Cp (j/kg-K)	K (w/m-k)	μ (kg/m-s)
Water	۶۹۶,۹	۵۶۵۰	۰,۵۱	۰,۰۰۰۰۹۶۲
Al ₂ O ₃	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	—
zircolly	۶۴۶۹,۸	۳۳۰	۱۸	—

شرایط مرزی

در مورد مجتمع سوخت سرعت محوری یکنواخت و دما در ورودی $T_i = ۵۶۴$ می باشد. شدت آشفتنی ثابت و معادل ۵٪ در نظر گرفته شده، در خروجی حالت جریان کامل توسعه یافته فرض شده است. در دیواره سوخت حالت بدون لغزش در نظر گرفته شده و شار انتقال حرارت در طول میله سوخت ثابت فرض شده است. در طول کارکرد راکتور فشار ۱۵/۵ مگا پاسکال در نظر گرفته شده و بر روی دیواره سوخت شرایط غیر لغزشی فرض شده است.

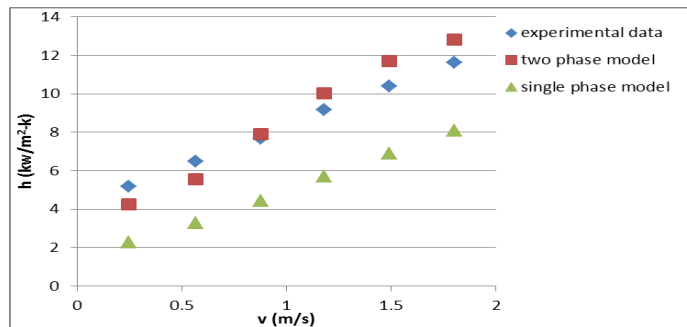
اعتبار سنجی و حل عددی

یک کد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD code) بر حل مسئله بکار رفته است. برای حالت تک فازی و دو فاز مسئله به صورت تقریب حجم محدود حل گردیده که معادلات بقای جرم، ممنتوم و بقای انرژی به روش حجم محدود برای شکل هندسی سه بعدی به کار رفته، حل شدند. در جدول ۲ شبکه های مختلف امتحان گردیده و ضریب انتقال حرارت را در برای آنها بدست آورده شده، که در نهایت تعداد مش ۲۲۴۱۰۰۰ بهترین شبکه را نشان می دهد.

جدول ۲. اندازه گیری ضریب انتقال حرارت با مشهای مختلف در $q'' = ۶۰۰$ kw

N	grid	h (w/m ² -k)	Error
۱	۶۷۵ × ۸۶۰	۱۴,۲۵۰	۱۷,۴۱ %
۲	۱۳۵۰ × ۱۶۶۰	۱۷,۲۶۵	-
۳	۲۷۰۰ × ۳۲۶۰	۱۷,۳۱۵	۰,۲۹ %

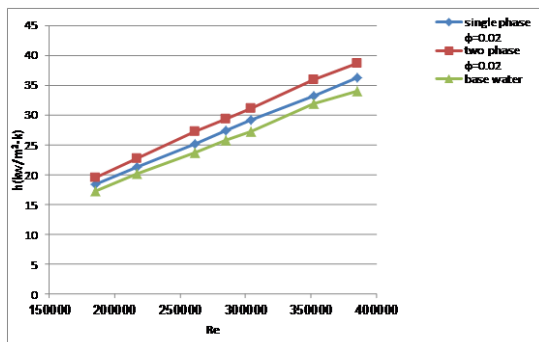
و سپس برای اعتبار مدل های مورد استفاده از داده های تجربی [۷] استفاده نموده که نتایج به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است.



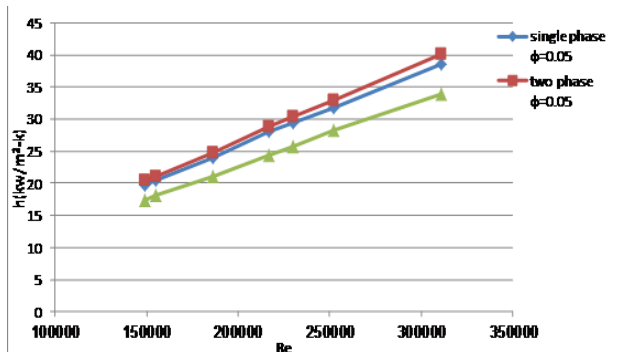
شکل ۳. تغییرات ضریب انتقال حرارت با سرعت ورودی

نتایج

جریان سیال و خواص انتقال حرارت برای یک مجتمع سوخت با نانوسیال و بدون نانوسیال به صورت عددی حل شد و نتایج به صورت زیر داده شده است. در شکل ۴ افزایش ضریب انتقال حرارت به واسطه افزایش Re را نشان می دهد. دیده می شود که ضریب انتقال حرارت به سرعت با Re افزایش می یابد همچنین مدل تک فازی و دو فازی اثراتشان خیلی به بهم شبیه می باشد. شکل های ۴الف و ۴ب غلظت ۲٪ و ۵٪ را نشان می دهند و دیده می شود که با افزایش درصد حجمی ضریب انتقال حرارت از حالت سیال پایه فاصله گرفته است.



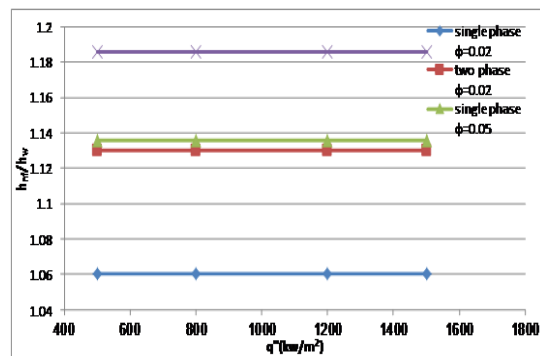
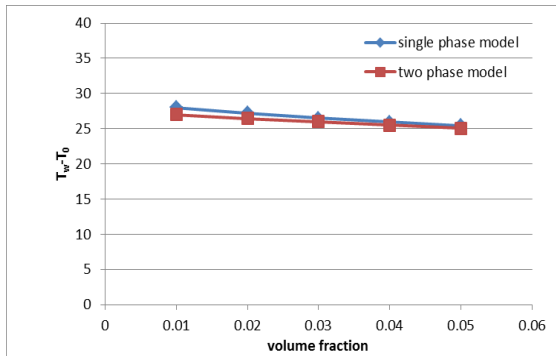
شکل ۴ ب. تغییرات ضریب انتقال حرارت با رینولدز در $\phi=0.02$



شکل ۴ الف. تغییرات ضریب انتقال حرارت با رینولدز در $\phi=0.05$

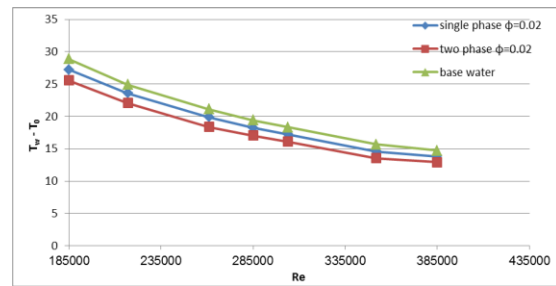
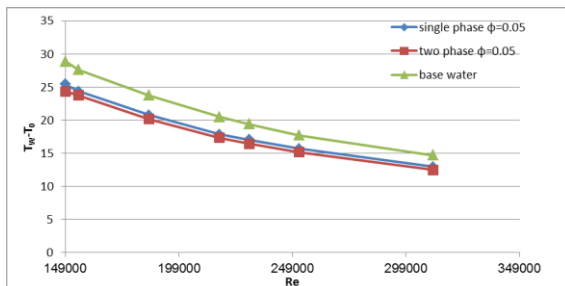
در شکل ۵ نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به سیال پایه در برابر تغییرات شار حرارتی رسم شده است که ملاحظه می شود که با تغییرات شار حرارتی این نسبت برای درصدهای حجمی مختلف فرقی نمی کند. در شکل ۶ تفاوت دمای میانگین دیواره ی میله سوخت و دمای مرجع (دمای ورودی) برای درصدهای حجمی مختلف رسم شده است.

19 th Iranian's Nuclear Conference



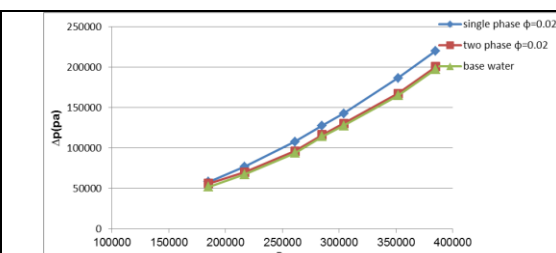
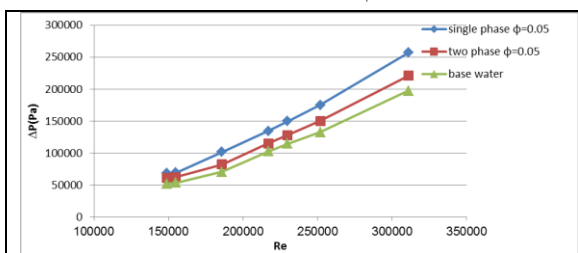
شکل ۵. نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به سیال پایه در برابر تغییرات شار حرارتی
شکل ۶. تفاوت دمای میانگین دیواره ی میله سوخت و دمای مرجع (دمای ورودی) در برابر درصدهای حجمی مختلف

در شکل ۷-الف و ۷-ب اختلاف دمای میله سوخت و دمای مرجع در رینولدزهای مختلف برای درصدهای حجمی ۰/۰۲ و ۰/۰۵ رسم شده است.



شکل ۷ الف. اختلاف دمای میله سوخت و دمای مرجع در رینولدزهای مختلف برای $\phi = 0.02$
شکل ۷ ب. اختلاف دمای میله سوخت و دمای مرجع در رینولدزهای مختلف برای $\phi = 0.05$

اثرات نانو سیال بر افت شار در یک مجتمع سوخت یک فاکتور مهم می باشد. شکل ۸ تغییرات افت فشار را در رینولدزهای مختلف با دو غلظت حجمی مختلف را نشان می دهد. دیده می شود که برای $\phi = 0.02$ و برای $\phi = 0.05$ $Re < 180000$ و $Re < 160000$ انحراف نانو سیال خیلی کم می شود.



شکل ۸-الف. تغییرات افت فشار را در رینولدزهای مختلف برای $\phi = 0.02$
شکل ۸-ب. تغییرات افت فشار را در رینولدزهای مختلف برای $\phi = 0.05$

بحث و نتیجه گیری

در این مقاله کاربرد نانو سیال $Al_2O_3/Water$ در یک راکتور هسته ای از نوع VVER-۱۰۰۰ به صورت عددی مورد بررسی قرار داده شد. ابتدا ویسکوزیته و ضریب انتقال حرارت با نتایج تجربی اعتبار سنجی شد و سپس مدل گسترش داده شد. در این مطالعه آثار ترموهیدرولیک تزریق نانو سیال مورد بررسی قرار داده شد و برای حل از روش حجم محدود استفاده گردید. و نتایج زیر بدست آمد.

- انتقال حرارت با دبی جرمی افزایش می یابد، در $Re < 180000$ برای $\phi = 0.05$ و $Re < 200000$ برای $\phi = 0.02$ تاثیر نانوسیال قابل اغماض است.
- افزایش شار حرارتی تاثیر چندانی بر روی نسبت ضریب انتقال حرارت ندارد.
- تزریق نانوسیال یا افزایش درصد حجمی آن می تواند دمای خروجی مجتمع سوخت را افزایش دهد.
- اختلاف دمای دیواره و دمای مرجع به واسطه افزایش Re به صورت یکنواخت کاهش می یابد.
- مقایسه تغییرات افت فشار با Re نشان می دهد که مدل تک فازی مقادیر بالاتری از تعداد واقعی را نشان می دهد. با مقایسه مدل تک فازی و دو فازی با نتایج تجربی مشاهده می کنیم که مدل دو فازی با داده های تجربی نزدیکتر می باشد.

در پایان می توان به این نتیجه رسید که قرار دادن ۱۵ ردیف Spacer Grid در مدل محاسباتی، که در حالت واقعی نیز به همین صورت می باشد، سبب میشود که اغتشاش بیشتر شده و Tracking ذرات بهتر صورت بگیرد و در نهایت مدل دو فازی کارایی بیشتری داشته باشد و بنابراین با به کار بردن این مدل دو فازی در راکتور به نتایج بهتری نسبت به تک فازی خواهیم رسید.

مراجع

- [۱] Nguena B., Taniousa F.A., Wilson W.D., (۲۰۰۷) Biosensor-surface plasmon resonance: quantitative analysis of small molecule-nucleic acid interactions. *Methods* ۴۲:۱۵۰-۱۶۱
- [۲] Kwok D.Y, Neumann A. W, (۲۰۰۰) " Contact angle interpretation in terms of solid surface tension"
- [۳] Buongiorno, J., Hu, L.W., Apostolakis, G., Hanninka, R., Lucasa, T. And Chupin, A., ۲۰۰۹. A feasibility assessment of the use of nanofluids to enhance the in-vessel retention capability in light-water reactors. *Nucl. Eng. Des.* ۲۳۹(۵), ۹۴۱-۹۴۸.
- [۴] Xuan Y., Li Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids." *Journal of Heat Transfer*, Vol. ۱۲۵, pp. ۱۵۱-۱۵۵, ۲۰۰۳.
- [۵] Mirmasoumi S. and Behzadmehr A., "Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube using two-phase mixture model," *Applied Thermal Engineering*, vol. ۲۸, no. ۷, pp. ۷۱۷-۷۲۷, ۲۰۰۸.
- [۶] Kirrilov, PL, "Thermophysical Prpperties of matreials for nuclear engineering" Obnisk Institute for Atomic Power, ۲۰۰۶
- [۷] Xuan Y., Li Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids." *Journal of Heat Transfer*, Vol. ۱۲۵, pp. ۱۵۱-۱۵۵, ۲۰۰۳.