

تأثیر نانوسیال در بهبود پارامترهای انتقال حرارت یک مجموعه سوخت راکتور VVER

کمال حداد^(۱) - محمد رهگشای^(۲) - مصطفی مهدوی^(۳) - حسین مجیدی مرقی^(۴)*

۱- دانشگاه شیراز، دانشکده مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

۲- دانشگاه علوم و تحقیقات تهران، بخش مهندسی هسته ای

۳- دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک

۴- سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای

چکیده:

در این مقاله به بررسی اثرات انتقال حرارتی وجود نانو ذرات در سیال اب در فیول اسمبلی راکتور VVER-1000 پرداخته می شود که به سیال همگن حاصل اصطلاحاً نانوسیال گفته می شود. قسمتی از فیول اسمبلی بعنوان هندسه مدل انتخاب شده و معادلات جریان و حرارت با استفاده از کد سیالات محاسباتی حل می گردد. در این تحقیق، به اثرات سه نوع مختلف نانوسیال پرداخته می شود. نتایج نشان می دهد استفاده از نانو ذرات در سیال حامل باعث افزایش دمای خروجی فیول اسمبلی می شود در حالیکه روی ضریب انتقال حرارت جابجایی با توجه به شار گرمی مختلف، تا حدی تأثیری معکوس دارد.

کلمات کلیدی: فیول اسمبلی، نانوسیال، سیالات محاسباتی، ضریب انتقال حرارت

مقدمه:

در صنایعی که با انتقال حرارت درگیر هستند رسیدن به بهره وری بالا یکی از مهمترین اهداف است. نانو ذرات از جمله موادی هستند که در عین ناچیز بودن در مقابل جریان سیالی، قادرند تغییرات عمده ای را در میزان انتقال حرارت و در نتیجه افزایش کارایی سیستم ایجاد نمایند. از مهمترین محققینی که در استفاده از نانو ذرات پیشتاز بوده است، Choi می باشد [۱] که به ترکیب آن با سیال اصطلاحاً نانوسیال را برای ترکیب حاصله ارائه کرد. بمنظور استفاده از نانو ذرات در سردکننده راکتور هسته ای برخی مطالعات و مدلسازیهای انجام شده که نشان می دهد با اضافه کردن تنها ۱٪ حجمی نانو ذرات به سیال می توان انتقال حرارت بحرانی را تا ۲ برابر افزایش داد [۲]. با این وجود برخی مطالعات نشان می دهد که میزان افزایش کارایی تا حدی بستگی به مقدار انتقال حرارت بحرانی دارد [۳]. در این تحقیق، به بررسی اثرات ۳ نانو ذره Al_2O_3 , CuO , ZrO_2 در سیال آب با جریان مغشوش در یک فیول اسمبلی VVER-1000 با استفاده از حل عددی پرداخته می شود. همچنین، اثرات تغییر شار گرمی روی ضریب انتقال حرارت جابجایی مورد بررسی قرار می گیرد.

روش کار

مدل سازی ریاضی: برای مدل سازی جریان در قلب راکتور، جریان سیال در یک فیول اسمبلی بصورت عددی حل گردید. شکل ۱، سطح مقطع یک فیول اسمبلی و هندسه مدل را نشان می دهد. قطر هر میله سوخت ۹ میلی متر و فاصله بین مرکز تا مرکز میله های سوخت، ۱۲٫۶ میلی متر می باشد. ارتفاع کل یک فیول اسمبلی ۴۵۷۰ میلی متر می باشد که طول مجرای جریان است و ارتفاع میله سوخت ۳۷۷۵ میلی متر است و ورود شار حرارتی به جریان تنها در این فاصله صورت می گیرد. جریان سیال از بالا وارد می شود و فاصله میله سوخت از ورودی جریان ۷۹۵ میلی متر و از خروجی جریان ۲۴۵ میلی متر است.



شکل ۱- سطح مقطع یک فیول اسمبلی و هندسه مدل

با توجه به سطح مقطع و تعریف قطر معادل، عدد رینولز Re بصورت زیر تعریف می شود:

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \quad D_h = \frac{4A}{P}$$

ρ چگالی، μ لزجت دینامیکی، D_h قطر هیدرولیکی، A سطح مقطع جریان و P محیط ترشده بوسیله جریان روی میله سوخت است. در مساله حاضر، محدوده عدد رینولز در $Re > 2000$ بوده و جریان مغشوش می باشد. پس بمنظور حل عددی نیاز به حل مدل های توربولنسی می باشد.

معادلات حاکم

برای حل جریان حاوی ذرات نانو از مدل تک فاز استفاده شده است. در مدل تکفاز خواص سیال و جریان بر اساس سیال جدیدی که حاوی ذرات نانو است نوشته می شود. معادلات حاکم بر جریان شامل معادلات زیر است:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنتوم سه بعدی:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right] \quad (2)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [U_i(\rho e + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(K + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

معادلات با فرض پایا بودن و تراکم ناپذیری جریان بیان شده و از ترم تلفات حرارتی لزجت صرف نظر شده است. جریان ورودی با سرعت یکنواخت u_0 و دمای $T_0 = 473 \text{ K}$ می باشد. در خروج نیز جریان توسعه یافته می باشد. دیواره خارجی میله سوخت که در تماس با جریان سیال است دارای شرط شار حرارتی ثابت است. در شرایط واقعی در قلب راکتور فشار ورودی سیال 10 Mpa است و با اعمال این شرط در مدل سازی و بیان خواص سیال بر اساس این شرایط، جوشش اتفاق نمی افتد. مدل استاندارد ϵ - k ساده ترین مدل دو معادله ای می باشد که توسط [۴] ارائه شده است و در این تحقیق بمنظور حل میدان جریان توربولنسی بکار گرفته می شود. این مدل که یک مدل شبه تجربی می باشد به علت کم بودن هزینه محاسباتی و دقت بالا در همگرایی در اکثر مسائل همواره مورد توجه محققان قرار گرفته است بدلیل شکل پیچیده مقطع جریان، بمنظور شبکه بندی مدل در صفحه مقطع عرضی از شبکه غیر یکنواخت بدون سازمان استفاده شد و در راستای طولی جریان شبکه یکنواخت بکار برده شد.

خواص نانوسیال

بدلیل آنکه مدل تکفاز در حل عددی مورد استفاده قرار گرفته است بمنظور بدست آوردن خواص سیال حاوی نانو، از روابط تجربی که در این زمینه ارائه شده، استفاده گردید. بمنظور بررسی انتقال حرارت نانو سیالات در قلب راکتور از ۳ نانو ذره ZrO_2 ، CuO ، Al_2O_3 با درصد حجمهای مختلف استفاده گردید. خواص نانو سیال از روابط زیر محاسبه گردید.

طبق مدل های مخلوط، چگالی نانوسیالها بر اساس میانگین حجمی عبارت است از:

$$\rho_{nf} = \varphi \rho_p + (1 - \varphi) \rho_f \quad (4)$$

گرمای مخصوص نانوسیالها نیز بر اساس میانگین حجمی عبارت است از:

$$C_{p,nf} = \varphi C_{p,p} + (1 - \varphi) C_{p,f} \quad (5)$$

لزجت نانو سیال [۵]:

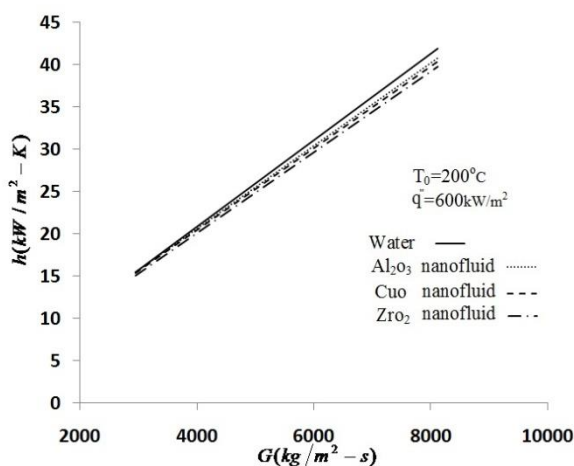
$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \left(1 - \frac{\varphi}{0.605} \right)^{-1.5125} \quad (6)$$

ضریب هدایت حرارتی نانو سیال با فرض کروی بودن ذرات [۶]:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\varphi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\varphi} \quad (7)$$

۳. نتایج

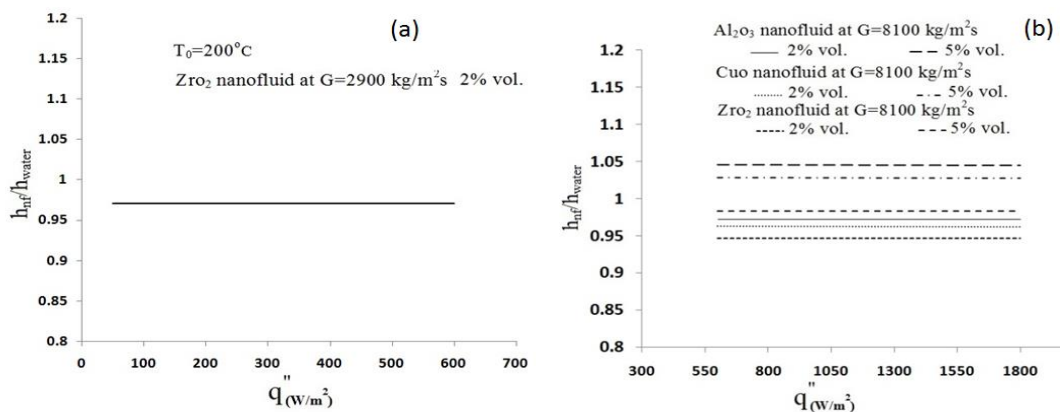
جریان سیال و انتقال حرارت با وجود نانو سیال و بدون نانوسیال در قلب راکتور بصورت عددی حل گردید. نتایج حل به صورت شکلهایی در این قسمت نشان داده شده است. شکل ۲ اثر افزایش شار گرمی را روی ضریب انتقال حرارت روی قسمتی از لوله که حاوی قرصهای سوخت است نشان می دهد. مشاهده می شود با افزایش شار گرمی ($G = \rho U$ که U سرعت است) ضریب انتقال حرارت روند صعودی شدیدی دارد که نشان می هد ضریب انتقال حرارت وابستگی زیادی به رژیم جریان و شار گرمی دارد. در شار گرمی کمتر از $4000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ اثر تزریق نانو در سیال روی ضریب انتقال حرارت ناچیز است. ولی با افزایش شار گرمی ($G > 4000 \text{ kg/m}^2\text{s}$) خطوط ضریب انتقال حرارت از هم فاصله گرفته است. مشاهده می شود با تزریق هرسه نوع نانو با درصد حجمی ۲٪، ضریب انتقال حرارت نسبت به حالت بدون نانو کمتر شده است. این بدین معنیست که در این شرایط، تزریق نانو سیال اثری منفی در ضریب انتقال حرارت دارد.



شکل ۲. اثر تغییر شار گرمی روی ضریب انتقال حرارت در نانوسیالهایی با ۲٪ vol.

شکل ۳a اثر تغییرات شار حرارتی روی نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به آب را در $G=2900 \text{ kg/m}^2\text{s}$ برای نانوسیال ZrO_2 نشان می دهد. این نانوسیال با درصد حجمی ۲٪ ضریب انتقال حرارتی کمتر از سیال آب دارد. همچنین محدوده تغییرات شار حرارتی که در شکل ۵ نشان بکار رفته نشان می دهد که تغییرات شار حرارتی روی ضریب انتقال حرارت تاثیر نداشته است. شکل ۳b اثر شار حرارتی روی نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به آب را در شرایط $G=8100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ و شارهای حرارتی بالاتر برای هرسه نوع نانو سیال با درصد حجمی مختلف نشان می دهد. مشاهده می شود در شرایط مختلف با ثابت ماندن رژیم جریان و شار گرمی، ضریب انتقال حرارت تابع بسیار ضعیفی از دما یا تغییر شار حرارتی می باشد و بیشترین تاثیر را از رژیم جریان می گیرد (شکل ۲). با افزایش درصد حجمی نانوسیالهای Al_2O_3 و CuO به ۵٪ ضریب انتقال حرارت از ضریب انتقال حرارت آب بیشتر شده است. با توجه به اینکه شار

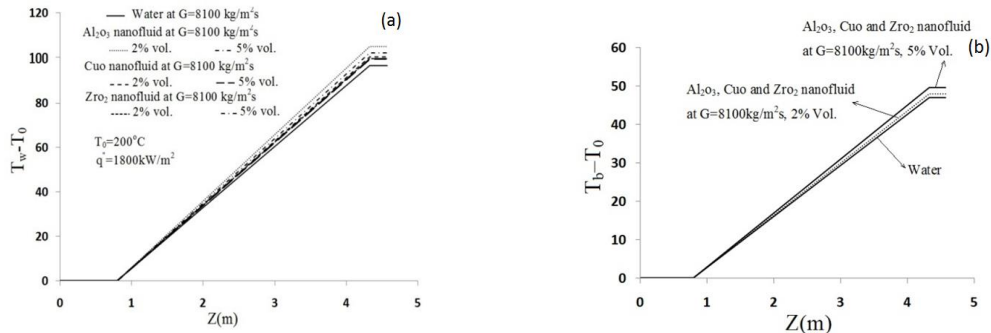
جرمی وابسته به چگالی و سرعت می باشد در شار جرمی ثابت، با تغییر نوع نانوسیال، چگالی تغییر کرده و سرعت نیز تغییر می کند که عاملی مهم در کاهش یا افزایش ضریب انتقال حرارت است. در ذرات نانو بررسی شده، نانو ذره CuO دارای بیشترین چگالی (6500 kg/m^3) و Al_2O_3 حداقل چگالی (3970 kg/m^3) دارا می باشند. عامل افزایش چگالی به تنهایی در شار جرمی ثابت، موجب افزایش سرعت شده که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. ولی عامل مهم دیگر ضریب هدایت حرارتی می باشد که در جریان مغشوش به دلیل تشکیل *viscous sub layer* از اهمیت بیشتری برخوردار است. افزایش ضریب هدایت بتنهایی موجب افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی می شود. نانو ذره Al_2O_3 دارای بیشترین ضریب هدایت (40 W/mK) و ZrO_2 حداقل ضریب هدایت (3 W/mK) دارا می باشند. در کنار دو عامل مهم مطرح شده، دو خاصیت لزجت و حرارت مخصوص نیز هستند که می توانند در جریان و انتقال حرارت تاثیر داشته باشند. در هر صورت، تعامل بین دو عامل مهم سرعت و هدایت حرارتی موجب افزایش یا کاهش ضریب انتقال حرارت می گردد. در نانوذرات بکارگرفته شده، Al_2O_3 که دارای بیشترین ضریب هدایت و حداقل چگالیست در درصدهای حجمی یکسان، بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را دارد.



شکل ۳. اثر تغییرات شار حرارتی روی نسبت ضریب انتقال حرارت نانوسیال به آب

شکل ۴. توزیع اختلاف دمای دیواره لوله با دمای ورودی را در راستای جریان نشان می دهد. تغییرات دما تنها در قسمتی از راستای جریان اتفاق افتاده که قرصهای سوخت واقع شده اند و در قسمتی از طول ورودی و خروجی که انتقال حرارت از دیواره لوله اتفاق نمی افتد تغییر دمایی وجود ندارد. تغییرات دمای دیوار در دو نانوسیال CuO و ZrO_2 در درصد حجمی مختلف تقریباً ناچیز است ولی در هر صورت نسبت به سیال آب بیشتر است. نانوسیال Al_2O_3 دارای بیشترین دمای دیواره است. ولی نانوسیال Al_2O_3 با درصد حجمی ۲% دمای دیواره بالاتری نسبت به Al_2O_3 با درصد حجمی ۵% دارد. بدلیل بالا بودن ضریب هدایت حرارتی Al_2O_3 ، تفاوت درصد حجمی در این ذره، می تواند تغییرات بیشتری را در دما روی دیواره ایجاد کند. کمتر بودن ضریب هدایت حرارتی نانوسیال Al_2O_3 با ۲% vol. نسبت به همین نانوسیال با ۵% vol. باعث ایجاد مقاومت حرارتی هدایتی در نزدیکی دیواره می شود. این یکی از عوامل مهمیست

که موجب شده دمای دیواره در نانوسیال Al_2O_3 با ۲٪ vol. در شار حرارتی ثابت در مرتبه ای بالاتر قرار بگیرد. درک این پدیده را می توان در شکل ۴. b بهتر مشاهده کرد که اختلاف دمای bulk temperature را با دمای ورودی نشان می دهد. در شکل ۴. b بطور کلی تزریق نانوسیال با درصدهای مختلف موجب افزایش دمای سیال گردید. هر سه نانوسیال در افزایش دمای سیال رفتاری کاملاً مشابه دارند.



شکل ۴. توزیع دما در راستای جریان

بحث و نتیجه گیری

در این مطالعه، به بررسی اثر تزریق نانوذرات در یک فیول اسمبلی قلب راکتور بروش حل عددی با استفاده از روش حجم محدود پرداخته شد. نتایج بدست آمده بصورت زیر قابل بیان است. با افزایش شار گرمی ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین در شار گرمی کمتر از $4000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ اثر تزریق نانو در سیال روی ضریب انتقال حرارت ناچیز است. تغییرات شار حرارتی روی ضریب انتقال حرارت تاثیری نداشته است که نشان از آن دارد که ضریب انتقال حرارت تابع ضعیفی از دماست. ضریب هدایت حرارتی و چگالی مهمترین خواص در کاهش یا افزایش ضریب انتقال حرارت می باشند. در نانوذرات بکارگرفته شده، Al_2O_3 دارای بیشترین ضریب هدایت و حداقل چگالیست و در درصدهای حجمی یکسان، بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را دارد.

مراجع

- [۱] Choi, S.U.S . Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles. In: Developments and Applications of Non-Newtonian Flows, Siginer, D.A. and H.P. Wang (Eds.). American Society of Mechanical Engineers, New York, pp: ۹۹-۱۰۵, ۱۹۹۵.
- [۲] Kwok DY, Neumann AW. Contact angle interpretation in terms of solid surface tension. Colloid Surface A.; ۱۶۱:۳۱-۴۸, ۲۰۰۰.
- [۳] Buongiorno, J. and Truong, B.,. Preliminary study of water-based nanofluid coolants for PWRs. Transactions of the American Nuclear Society, ۹۲, ۳۸۳-۳۸۴, ۲۰۰۵.
- [۴] B. Launder and D.B. Spalding, (۱۹۷۲). "Mathematical Model of Turbulence", Academic Press, New York.
- [۵] Krieger I M and Dougherty T J. A mechanism for non-newtonian flow in suspensions of rigid spheres Trans. Soc. Rheology ۳ ۱۳۷-۵۲ ۱۹۵۹.
- [۶] Hamilton, R.L. and Crosser, O.K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems." Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. ۱: pp. ۱۸۷-۱۹۱, ۱۹۶۲.