

بررسی عددی بهبود انتقال حرارت در دایورتور راکتورهای گداخت با استفاده از نانوسیال آلومینیوم اکسید

قاسمی زاد، عباس^(۱) - عاشوری، حدیقه^(۲) - سادات کیایی، سید محمود^(۲) - صدیق زاده، اصغر^(۲)

دانشگاه گیلان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

هدف از این مطالعه بررسی استفاده از نانوسیال در خنک سازی سیستم دایورتور راکتورهای گداخت است. انتقال حرارت جریان آشفته ی نانوسیال آب Al_2O_3 از میان تیوب خنک کننده $CuCrZr$ شبیه سازی شده است. رویکرد تک فاز مبتنی بر دینامیک سیال محاسباتی با استفاده نرم افزار فلونت، مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن جهت اعتبار سنجی با نتایج روابط شناخته شده، مقایسه و توافق خوبی حاصل شده است. وابستگی نمودارهای دمای بیشینه روی دیواره تنگستنی و تیوب خنک کننده در درصدهای حجمی مختلف (۱-۸٪) و مقایسه آن با خنک کننده آب خالص، نشان می دهد که استفاده از نانو سیال باعث کاهش قابل توجه دما به ویژه در درصدهای حجمی بیشتر می شود.

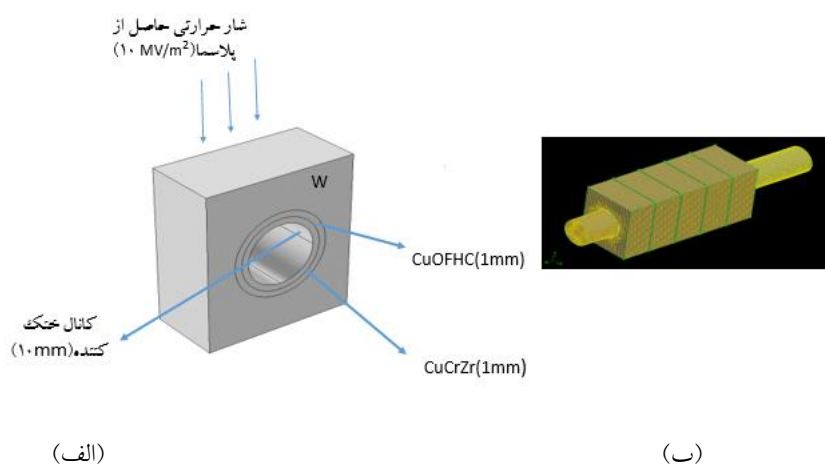
کلمات کلیدی: راکتور گداخت، دایورتور، نانوسیال، انتقال حرارت، تک فاز، CFD

مقدمه:

دایورتور یکی از اساسی ترین بخش های طراحی راکتورهای گداخت است. از آنجا که شار حرارتی بالایی (10 MV/m^2) بر این ناحیه وارد می شود، مواد مورد استفاده در این بخش باید از یک سو استحکام و از سوی دیگر قابلیت انتقال حرارت بالای حاصل را به بیرون از ناحیه دایورتور داشته باشند. دایورتور، شامل دو بخش دوم (dome) و هدف (target) [۱]، تحت تاثیر عمده ی این شار حرارتی بالا قرار دارد. هدف از بلوکه هایی تشکیل شده است که هر بلوکه خود شامل دو قسمت است؛ بخش جوشن (armor)، که در تماس مستقیم با پلاسمای گداخت است، و بخش ساختار (structure)، که نقش استخر حرارتی و خنک کنندگی را دارد و در آن خنک کننده از میان لوله هایی که در میان بلوکه ها تعبیه شده است، عبور کرده و گرما را به سمت بیرون هدایت می کند [۱].

تنگستن همیشه به عنوان ماده ی نامزد جهت استفاده برای بخش جوشن مطرح بوده است. نقطه ی جوش بالا و رسانندگی گرمایی نسبتا بالا در کنار نرخ پایین خوردگی و دربرگیری تریتیوم (tritium retention) که در آن تریتیوم جذب جوشن یا هر ماده ی در تماس با پلاسما می شود) از جمله خواص مطلوب تنگستن برای استفاده در شرایط خاص راکتور است. مس یا آلیاژهای آن از جمله $CuCrZr$ به دلیل رسانندگی حرارتی بالا، ماده منتخب برای استخر حرارتی (heat sink)

است [۲]. از آنجا که لوله ی CuCrZr حامل خنک کننده از میان بلوکه تنگستنی می گذرد، اختلاف بالای ضریب انبساط حرارتی میان این دو ماده موجب تجمع حرارت در فصل مشترک این دو ماده و ایجاد شکست در ماده می شود. از این رو، استفاده از یک لایه ی میانی، با ضریب انبساط حرارتی بین این دو ماده، با هدف کاهش عدم تطابق استرس گرمایی میان تنگستن و ساختار پیشنهاد می شود. مس خالص با نام تجاری CuOFHC یک ماده پیشنهادی در این بخش است [۲]. شکل ۱ الف یک تک بلوکه تنگستنی طراحی شده برای این کار را نشان می دهد که در آن از آلیاژ مس CuCrZr به عنوان خنک کننده و CuOFHC به عنوان لایه میانی استفاده شده است



شکل ۱. الف) یکی از تک بلوکه های طراحی شده در این کار. ب) هندسه ی نهایی که در نرم افزار گمبیت تولید و وارد فلوئنت می شود.

از آنجا که مدیریت گرما از بحث های اساسی طراحی راکتور گداخت مبتنی بر توکامک است، اهمیت ویژه ای به خنک کننده و شرایط حاکم بر آن داده می شود. آب، همیشه به عنوان یک خنک کننده اصلی مطرح بوده است و مطالعات زیادی به بررسی و بهینه سازی موارد مرتبط با آن در شرایط خاص پلاسما، پرداخته اند [۲-۴]. همیشه معایبی نیز برای آب مطرح بوده است؛ مثل توان پمپاژ بالا و محدودیت مدیریت توان به علت شار حرارتی بحرانی (CHF). بنابراین به منظور بهبود انتقال حرارت آب، ایده ی استفاده از نانوسیالات مبتنی بر آب ارائه شده است. نانوسیال، سو سپانسیونی از در صد حجمی پایین (زیر ۱۰٪) نانوذراتی مثل آلومینیوم اکسید (Al_2O_3)، تیتانیوم اکسید (TiO_2)، مس اکسید (CuO) و غیره و یک سیال پایه مثل آب یا اتیلن است. [۵] استفاده از نانوسیالات جهت بهبود شرایط انتقال حرارت به دهه ی ۱۹۹۰ و مطالعات Choi [۶] بر می گردد. پس از آن ایده ی استفاده از نانوسیالات در سیستم های با

شار حرارتی بالا مثل مجتمع های خورشیدی، سیستم های خنک کننده ی الکترونیکی و راکتورهای هسته ای، به منظور کاهش دما و ایجاد توزیع دمای یکنواخت تر مطرح شد. [۶]

مطالعات اندکی به بررسی استفاده از نانوسیالات در سیستم های هسته ای مبتنی بر گداخت پرداخته اند. Barrett، به طور تجربی به مطالعه ی عملکرد نانوسیالات در هندسه های مرتبط با گداخت با تمرکز بر روی رفتار نانوسیال در چنین محیطی پرداختند. آنها نشان دادند استفاده از نانوسیال به عنوان خنک کننده در راکتور گداخت می تواند موجب بهبود انتقال حرارت شود. [۷]

در این مطالعه، هدف بررسی عددی جریان آشفته ی نانوسیال آلومینیوم اکسید در لوله ی خنک کننده ی یک بلوکه از دایورتور راکتور گداخت و مقایسه ی نتایج با حالت استفاده از آب خالص است. آنالیز CFD توسط فلوننت بر اساس روش حجم محدود انجام گرفته است.

روش کار

هندسه ی تک بلوکه ی تنگستنی در شکل ۱ الف نشان داده شده است که شامل یک مکعب تنگستنی با ابعاد ۲۲*۲۶*۱۱ میلی متری است که از وجه بالایی تحت شار حرارتی ثابت قرار می گیرد. لوله ی CuCrZr خنک کننده ی با قطر ۱۰ میلی متر از میان این بلوکه گذشته است. خنک کننده با فشار ۲،۴ MPa، دمای ۱۲۰°C و سرعت های ثابت ۸-۱۵ m/s مربوط به اعداد رینولدز مختلف، وارد لوله می شود. لایه میانی با ضخامت ۱ mm، لوله ی خنک کننده را به بلوکه ی تنگستنی متصل می کند.

برای نزدیک تر شدن به شرایط واقعی تر، هشت بلوک متصل به فاصله های نیم میلی متری به عنوان هندسه ی کار انتخاب شده است. هندسه و متعاقب آن مش بندی در نرم افزار گمبیت انجام شده و در نهایت شکل ۱ ب تولید شده است.

خنک کننده پایه آب و نانوذرات مورد نظر جهت ایجاد نانوسیال، ذرات آلومینیوم اکسید انتخاب شده اند.

برای محاسبه ی خواص فیزیکی نانوسیال آب/آلومینا با درصدهای حجمی ۴٪-۱، از روابط موجود برای چگالی،

ظرفیت گرمایی، رسانندگی و وشکسانی، به ترتیب زیر، استفاده می کنیم [۸، ۹]

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

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$k_{nf} = k_f \frac{k_{np} + 2k_f + 2\varphi(k_{np} - k_f)}{k_{np} + 2k_f - \varphi(k_{np} - k_f)} \quad (3)$$

رویکرد تک فاز برای حل عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری در اینجا انتخاب شده است. در این رویکرد برای حل جریانی انتقال حرارت سیال، از معادلات پیوستگی جرم، اندازه حرکت و انرژی (معادلات ۶-۳) به صورت زیر استفاده می‌شود

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V}) = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot (\rho_{nf} \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \mu_{nf} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot ((\rho c_p)_{nf} \mathbf{V} T) = \nabla \cdot (k_{nf} \nabla T) \quad (6)$$

و همچنین برای حل آشفتگی، از مدل کا-اِپسلون استفاده می‌شود، به علت صحت قابل قبول و سرعت همگرایی بالا. با انتخاب این مدل، دو رابطه‌ی دیگر نیز به معادلات بالا اضافه می‌شوند. هدف حل سه بعدی جریان آشفتگی (با توجه به محدوده‌ی سرعت‌های رینولدز به دست آمده در شرایط مساله، جریان در محدوده‌ی آشفتگی قرار می‌گیرد) نانو سیال در تیوب به طول ۱۰۰ mm و قطر ۱۰ mm در انتقال حرارت حاصل از پلاسمای داغ و متعاقب آن اعمال شار حرارتی ثابت روی وجه بالایی بلوکه است. خنک کننده، آب خالص یا نانو سیال با درصد حجمی ۴-۱٪، با دمای ورودی $(T_{inlet} = 393K)$ و سرعت‌های یکنواخت (V_{inlet}) متفاوت (متناسب با عدد رینولدز انتخابی در محدوده‌ی ۱۵۰۰۰-۸۰۰۰) وارد لوله می‌شود. فشار خروجی به عنوان شرط مرزی خروجی در نظر گرفته شده است. این فشار در مقدار ۲،۴ MPa قرار داده شده است. بر اساس این شرایط داریم؛

$$V_x = 0, V_y = 0, V_z = V_{inlet} \cdot T_{inlet} = 393.15 K.$$

$$P_{outlet} = 4.2 MPa$$

در فصل مشترک دیواره لوله و سیال، شار ثابت زیر برقرار است

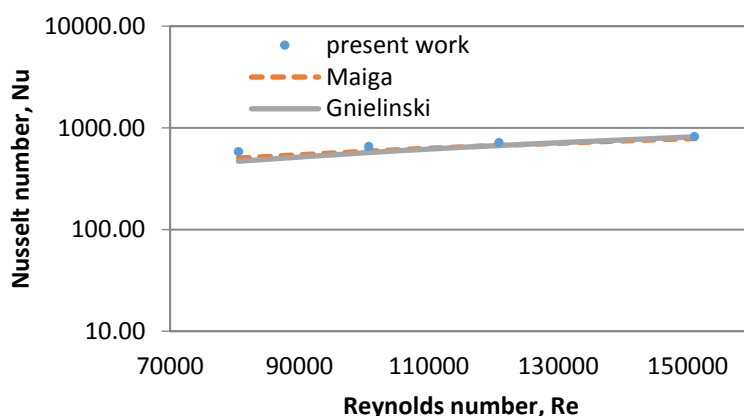
$$q = -k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} |_{wall}$$

جدا از این شرایط مرزی، مقادیر ثابتی نیز برای حل معادلات آشفتگی [۱۰] نیز استفاده شده است. معادلات حاکم (معادلات جریان و آشفتگی) با شرایط مرزی ارائه شده، تحت مدل تک فاز در نرم افزار فلونت حل شده است. مدل SIMPLE برای جفت شدگی فشار-سرعت و مدل کا-اِپسلون (k-ε) با فرض دیواره‌ی استاندارد برای حل آشفتگی لحاظ شده است. برای اطمینان از نتایج به دست آمده، مطالعات استقلال از مش و نیز همگرایی پاسخ‌ها تا حد کوچکتر از 10^{-6} ، انجام شده است.

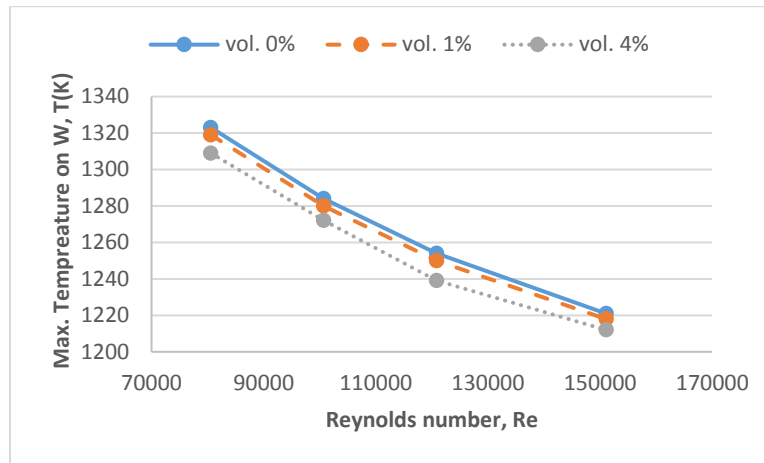
نتایج

به منظور بررسی اعتبار حد عددی ارائه شده در اینجا، مقایسه ای میان اعداد ناسلت به دست آمده از مرحله پسا پردازش فلونت و معادلات تئوری مرسوم برای محاسبه ی عدد ناسلت، که در مقالات مختلف موجود است، صورت گرفته است. شکل ۲، نتیجه ی مقایسه ی یاد شده است. اعداد ناسلت به دست آمده از شبیه سازی انجام گرفته به ازای اعداد رینولدز مختلف (سرعت های سیال مختلف) برای مورد نانوسیال با درصد حجمی ۱ درصد نشان داده شده است. برای مقایسه از روابط معتبر Maiga [۱۱] و Gnielinski [۱۲] استفاده شده است. همانگونه که از نمودار مشخص است، تطابق خوبی میان نتایج شبیه سازی و نتایج تئوری به ویژه در اعداد رینولدز بالا وجود دارد. این نتایج به خوبی در توافق با گزارش های ارائه شده توسط lotfi [۱۰] و Namburu [۱۳] است.

شکل ۳ بیشینه دمایی تنگستن را بر حسب عدد رینولدز در حالت استفاده از آب خالص (۰ درصد) و دو حالت مختلف نانوسیال (۱ و ۴ درصد) نشان می دهد. همان طور که از شکل پیداست، افزایش عدد رینولدز و نیز افزایش درصد حجمی نانوذرات، هر دو منجر به کاهش بیشینه ی دما روی تنگستن می شود. در یک رینولدز ثابت (برای مثال ۱۲۰۰۰۰)، افزایش درصد حجمی از ۰ (آب خالص) تا ۱ و ۴ درصد (نانوسیال)، به ترتیب موجب کاهش دمای ۴ و ۱۵ درجه ای می شود. می توان گفت که با افزودن نانوذرات به سیال پایه، خواص ترموفیزیکی سیال بهبود می یابد که شامل رسانندگی حرارتی بالاتر است و این امر خود منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. با افزایش این ضریب، توانایی سیال در انتقال حرارت بهبود یافته و منجر به کاهش بیشینه دما می شود.



شکل ۲. مقایسه ی اعداد ناسلت؛ نتایج حاصل از تصحیحات maiga و Gnielinski با نتایج کار حاضر (نانوسیال آلومینای ۱ درصد)



شکل ۳. دمای بیشینه ی تنگستن به ازای درصد ها حجمی و اعداد رینولدز مختلف.

بحث و نتیجه گیری

حل عددی به منظور بررسی خواص انتقال حرارت نانوسیال آب/ آلومینا که از میان لوله ی خنک کننده یک بلوکه، به عنوان بخشی از دایورتور راکتورهای هسته ای مبتنی بر گداخت، می گذرد، ارائه شد. انتقال حرارت جا بجایی جریان آشفته، تحت شار حرارتی ثابت با استفاده از حل CFD در نرم افزار فلوئنت انجام گرفت. اعتبار نتایج از طریق مقایسه با دو رابطه ی ارائه شده توسط Maiga و Gnielinski تایید شد. کانتورهای بیشینه ی دما روی تنگستن حاکی از کاهش قابل توجه دما با استفاده از نانوسیال آلومینیوم اکسید مبتنی بر آب در مقایسه با خنک کنندگی آب خالص حتی در درصد های حجمی پایین از نانوذرات است.

مراجع

- Autissier, E., et al., *Design optimization of plasma facing component with functional gradient material Cu/W interlayer*. Fusion Engineering and Design, 2013. **88**(9-10): p. 1714-1717.
- Chen, P., et al., *Preliminary Thermo-hydraulic and Mechanical Analysis for CFETR Divertor*. Journal of Fusion Energy, 2015. **34**(4): p. 901-904.
- Li-Puma, A., et al., *Potential and limits of water cooled divertor concepts based on monoblock design as possible candidates for a DEMO reactor*. Fusion Engineering and Design, 2013, **88**(9-10): p.1836-1843.
- Richou, M., A. Li-Puma, and E. Visca, *Design of a water cooled monoblock divertor for DEMO using Eurofer as structural material*. Fusion Engineering and Design, 2014. **89**(7-8): p. 975-980.
- M. Bahonar, G.J., M. Gharib, *Neutronic analysis of a superheat BWR using high performance fuel rod technique*. Progress in Nuclear Energy, 2016. **92**: p. 133-141.
- J.M. Wu , J.Z., *A review of nanofluid heat transfer and critical heat flux enhancement d Research gap to engineering application*. Progress in Nuclear Energy, 2013. **66**: p. 13-24.
- Thomas R. Barrett , S.R., K. Flinders , A.Sergis , Y.Hardalupas *Investigating the use of nanofluids to improve high heat flux cooling systems*. Fusion Engineering and Design, 2013. **66**: p. 131-141.

- ۸ Mohammad Nazifard, M.N., Khosrow Jafarpur, and Kune Y. Suh, *Numerical Simulation of Water-Based Alumina Nanofluid in Subchannel Geometry*. Science and Technology of Nuclear Installations, 2012. **2012**: p. 12 pages.
- ۹ Utomo, A.T., et al., *Experimental and theoretical studies of thermal conductivity, viscosity and heat transfer coefficient of titania and alumina nanofluids*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012. **55**(25–26): p. 7772-7781.
- ۱۰ R. Lotfi, Y.S., A.M. Rashidi, *Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010. **37**: p. 74-78.
- ۱۱ S. E. B. Maiga, C.T.N., N. Galanis, G. Roy, T. Mar'e, and M. Coqueux, *Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension*. International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, 2006. **16**(3): p. 275–292.
- ۱۲ Rostamani. M, H.S.F., Gorji. M, Khodadadi. J.M., *Numerical Study Of Turbulent Forced Convection Flow Of Nanofluids In A Long Horizontal Duct Considering Variable Properties*. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010. **37**(1426–1431).
- ۱۳ Praveen K. Namburu, D.K.D., Krishna M. Tanguturi, Ravikanth S. Vajjha, *Numerical study of turbulent flow and heat transfer characteristics of nanofluids considering variable properties*. International Journal of Thermal Sciences 2009. **489**: p. 290–302.

		فهرست علائم	
Pa.s	وشکسانی دینامیکی، μ	J/kg K	ظرفیت گرمای ویژه در فشار ثابت، c_p
vol.%	درصد حجمی، ϕ	W/m K	رسانندگی گرمایی، k
نانو ذرات	np	نانوسیال	nf
شار حرارتی، W	q	چگالی، kg/m^3	ρ
سرعت، m/s	V		
			T
			دما، K
			عدد رینولدز
			Re
			فشار، Pa
			P
			سیال
			f