
Numerical investigation of heat transfer increase in nanofluid flow inside sinusoidal tubes

Ali Abdali *

Control Systems and Instrumentation Department of Iranian Offshore Oil Company, Kharg, Bushehr 7546143572, Iran
E-mails: ali.ebdali@gmail.com

Abstract

The issue of heat transfer is one of the most important issues that can cause many challenges in many cases if it is not investigated properly. In recent years, studies on the rheological behavior and heat transfer of nanofluids have increased greatly, and many researchers have conducted research in this field, and the results indicate significant progress in this field. This research deals with the numerical investigation of heat transfer and pressure drop of nanofluid flow with water base fluid and ethylene glycol water mixture with aluminum oxide and copper oxide nanoparticles. In order to increase heat transfer as much as possible, in addition to using suitable nanofluid, a tube with an axially symmetrical sinusoidal wall can also be used. In this article, a numerical investigation for base fluids and nanofluids with different volume concentrations and different nanoparticle diameters inside a smooth and sinusoidal tube has been done and the results have been presented.

Keywords

Heat transfer, nanofluid, sinusoidal tube, pressure drop, constant heat flux, performance evaluation criteria

بررسی عددی افزایش انتقال حرارت در جریان نانوسیال داخل لوله های سینوسی

علی ابدالی

بخش کنترل و ابزار دقیق شرکت نفت فلات قاره ایران، خارگ، بوشهر، ایران

چکیده

مبحث انتقال حرارت، یکی از مهم ترین بحث های موجود است که در بسیاری از موارد در صورت عدم بررسی مناسب آن، می تواند باعث چالش های زیادی بشود. در سال های اخیر مطالعات بر روی رفتار رئولوژیکی و انتقال حرارتی نانوسیالات به شدت افزایش پیدا کرده و پژوهشگران بسیاری در این زمینه تحقیقاتی را انجام داده اند و نتایج حاصل، پیشرفت های چشمگیری در این زمینه را حکایت می کند. این پژوهش به بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار جریان نانوسیال با سیال پایه آب و مخلوط آب اتیلن گلیکول با نانوذرات اکسید آلومینیوم و اکسید مس می پردازد. به منظور افزایش هرچه بیشتر انتقال حرارت، در کنار استفاده از نانوسیال مناسب، می توان از لوله با دیواره سینوسی متقارن محوری نیز بهره جست. در این مقاله، بررسی عددی برای سیال های پایه و نانوسیال با غلظت های حجمی مختلف و قطر نانوذره متفاوت درون لوله صاف و سینوسی انجام گرفته است و نتایج آن ارائه شده است.

کلمات کلیدی

انتقال حرارت، نانوسیال، لوله سینوسی، افت فشار، شار حرارتی ثابت، معیار ارزیابی عملکرد.

نام نویسنده مسئول: علی ابدالی

ایمیل نویسنده مسئول: ali.ebdali@gmail.com

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۳۰

تاریخ (های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۳۱

۱- مقدمه

لوله دیواره موج سینوسی متقارن محوری مقاومت جریان کمتری دارد. از این رو تحقیقاتی نیز در این زمینه انجام گرفته است.

با پیشرفت علم، تولید نانوذرات از مواد گوناگون میسر شده است. یکی از خصایص مواد در ابعاد نانو، نسبت سطح به حجم بالای آنهاست که توانایی های خاصی به آنها بخشیده است. نانوسیالات به عنوان دسته مهیج جدیدی از فناوری نانو پدیدار شده اند که بر پایه سیالات انتقال حرارت می باشند و در چند سال گذشته به طور فوق العاده ای رشد کرده اند. دانشمندان و مهندسان سعی بر این دارند تا قوانین حاکم بر خواص ترموفیزیکی این سیالات را کشف کنند، لذا سازوکارهای جدید پیشنهاد کرده و مدل های غیر معمولی را برای توضیح این رفتارها ارائه می دهند [۸-۶].

نانوسیال عبارتی است که به نوع جدیدی از سیال انتقال حرارت که شامل مقدار کمی از نانوذرات فلزی یا غیرفلزی بود، اطلاق شد. این ذرات به صورت همگن و پایدار در فاز پیوسته ای پراکنده شده بودند. تحقیق و توسعه ابتدایی فناوری نانوسیال، پتانسیل بالای نانوسیالات را برای کاربرد در انتقال حرارت نشان داد و منجر به این شد که هم صنعت و هم دانشگاه های سراسر جهان تلاش هایی را در خصوص پژوهش در این راستا انجام دهند. اندازه میانگین ذرات بکار رفته در نانوسیالات ممکن است از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر متغیر باشد. فهم کامل رفتارهای انبوهشی و رئولوژیکی نانوسیالات برای محققین نانوسیال بسیار مهم است [۹ و ۱۰]. از این رو در این قسمت به بررسی تحقیقات گذشته در خصوص خواص ترموفیزیکی نانوسیالات می پردازیم. تعدادی از نانومواد و سیالات پایه به شرح ذیل اند:

انواع نانومواد: نانوذرات مورد استفاده در نانوسیالات از مواد مختلفی ساخته می شوند، مانند: اکسیدهای سرامیکی (Al₂O₃ و CuO)، اکسیدهای نیترویدی (SiN و AlN)، سرامیک-ای کاربیدی (SiC و TiC)، فلزات (Cu، Ag، Au)،

در طی سال های اخیر به کمک کامپیوترهای سریع، مهندسیین قادر به انجام محاسبات عددی قابل توجهی برای پیش بینی پدیده های مهندسی و بهبود فرآیند طراحی شده اند. استفاده از روش های عددی، یکی توانایی به پیش نمایش راه حل یک مشکل است که هنوز به مرحله آزمایش نرسیده است و دیگری برای بهبود نتایج تجربی موجود است. دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) روشی استاندارد برای طراحی و تجزیه و تحلیل مسائل مرتبط مهندسی شامل پدیده های چندفیزیکی شده است. تعداد زیادی از مطالعات برای حل مکانیک سیالات و مسائل انتقال حرارت مایعات معمولی که از قوانین پایه منتشر شده در متون پیروی می کنند، انجام شده اند و اغلب آن ها با نتایج تجربی همان مساله سازگار هستند. به هر حال با معرفی نانوسیال در حوزه مکانیک سیالات و انتقال حرارت، راه جدیدی همراه با منافع و چالش های آن ایجاد گردیده است. روش هایی بسیار همانند مورد استفاده در روش های مرسوم محاسباتی می تواند برای بکارگیری در صنایع مهندسی در ارتباط با نانوسیال اقتباس شود [۵-۱].

افزایش انتقال حرارت و نیز سیالات انتقال دهنده حرارت موضوع بسیاری از تحقیقات در دهه های اخیر بوده است. سیالات انتقال حرارت شرایط را برای تبادل انرژی در یک سیستم مهیا می کنند و اثرات آنها بستگی به ویژگی های فیزیکی از قبیل هدایت حرارتی، لزجت، چگالی و ظرفیت گرمایی دارد. هدایت حرارتی پایین، اغلب مهم ترین محدودیت سیالات انتقال حرارت می باشد. به علاوه بهبود عملکرد انتقال حرارت بخصوص در مبدل های صفحه ای یا لوله ای می تواند بوسیله تغییر شکل دیوار کانال مورد استفاده تحقق یابد. در مقایسه با لوله های افزایش دهنده دیگر (مانند لوله مارپیچ یا لوله راه راه متقاطع)

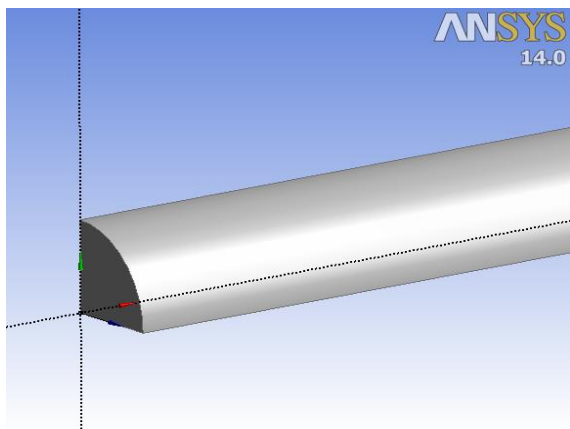
و روش حل آورده شده است. همچنین شبکه بندی هندسه، ارزیابی و بررسی حساسیت به شبکه بندی ارائه می‌گردد. در پایان اعتبار سنجی نتایج با داده‌های موجود انجام می‌شود [۱۴-۱۶].

۳-۱- هندسه مسئله

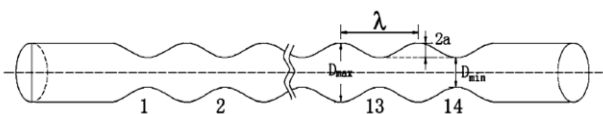
لوله صاف و لوله سینوسی در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در شکل ۱ نمایی از یک چهارم لوله صاف نشان داده شده است. برای تولید هندسه لوله سینوسی از پروفیل سطح آن که مطابق رابطه ۳-۱ است استفاده می‌شود.

$$y = a \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{3\pi}{2}\right) + \frac{D_{max} + D_{min}}{4} \quad (2)$$

که y فاصله پروفیل سطح سینوسی از مرکز لوله است. در **Error! Reference source not found.** ابعاد دو حالت لوله سینوسی که در **Error! Reference source not found.** پارامترهای آن مشخص شده، آورده شده است.



شکل ۱- نمایی از لوله صاف



شکل ۲- پارامترهای هندسه لوله سینوسی

جدول ۲- ابعاد لوله های سینوسی مورد استفاده در پژوهش حاضر

| ردیف | D_{max} (mm) | D_{min} (mm) | $2a$ (mm) | λ (mm) | F_w | طول لوله |
|----------|----------------|----------------|-----------|----------------|-------|-------------|
| حالت اول | ۱۰ | ۳ | ۳/۵ | ۱۴ | ۰/۸۳ | 14λ |
| حالت دوم | ۱۰ | ۷ | ۱/۵ | ۱۴ | ۰/۱۵ | 14λ |

نیمه رساناها (SiC و TiO₂)، ترکیبات کربنی (نانولوله های کربنی، الماس و گرافیت) و مواد کامپوزیتی مثل نانوذرات آلیاژی Al70Cu30. انواع سیالات پایه: انواع مختلفی از مایعات نیز بعنوان سیال میزبان بکار گرفته می‌شوند، مانند: آب، اتیلن گلیکول، روغن موتور، سیالات زیستی و محلول های پلیمری.

۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

هدایت حرارتی نانوسیالات توجه اصلی در نانوسیال را به خود اختصاص داده است. هرچند برای سیالات ساکن این مهمترین موضوع است ولی با در نظر گرفتن سیالات انتقال حرارت، ضریب انتقال حرارت نانوسیال در جریان مهمترین موضوع می‌باشد. دیگر خواص مهم غیر از هدایت حرارتی که برضریب انتقال حرارت اثر می‌گذارد، عبارتند از: چگالی، گرمای ویژه و لزجت نانوسیال. با فرض پراکندگی یکنواخت نانوذرات داخل سیال پایه، خواص حرارتی و فیزیکی نانوسیال به صورت زیر هستند.

رابطه ۱-۲ را برای محاسبه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال ارائه شده است [۱۱-۱۳]. مقادیر A_1 و A_2 در **Error! Reference source not found.** آورده شده است. مشاهده می‌شود که در این رابطه μ_{bf} اثر دما روی ویسکوزیته را شامل می‌شود، بنابراین هیچ عبارت اضافی شامل دما نیاز نیست. این رابطه در محدوده دمایی $273K < T < 363K$ معتبر است.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} A_1 e^{(A_2 \varphi)} \quad (1)$$

جدول ۱- ضرائب معادله

| غلظت (%) | متوسط اندازه ذره (nm) | A_2 | A_1 | نانوذره |
|--------------------------|-----------------------|---------|--------|-------------------------------|
| $0 \leq \varphi \leq 10$ | ۴۵ | ۱۲/۹۵۹ | ۰/۹۸۳ | اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) |
| $0 \leq \varphi \leq 6$ | ۲۹ | ۲۲/۸۵۳۹ | ۰/۹۱۹۷ | اکسید مس (CuO) |

۳- تشریح مسئله

همانطور که در فصل اول نیز گفته موضوع پژوهش حاضر بررسی عددی جریان نانوسیال داخل لوله سینوسی می‌باشد. بدین منظور از نرم افزار Ansys CFX استفاده شده است. در این بخش ابتدا به توضیح هندسه‌های مورد نظر پرداخته می‌شود. سپس معادلات حاکم، خواص نانوذرات، سیال پایه، روابط مورد استفاده

۳-۲ - معادلات حاکم

در پژوهش حاضر از مدل تک‌فازی برای حل جریان نانوسیال استفاده می‌شود. بنابراین معادلات حاکم همانند جریان سیالات متداول است. برای جریان پایا که خواص فیزیکی سیال تابع دما است، معادله بقای جرم، بقای مومنتم و انرژی به صورت زیر خواهد بود.
معادله بقای جرم :

$$\text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

معادله بقای مومنتم :

$$\text{div}(\rho \vec{V} \vec{V}) \quad (4)$$

$$= -\text{grad } P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V})$$

معادله بقای انرژی :

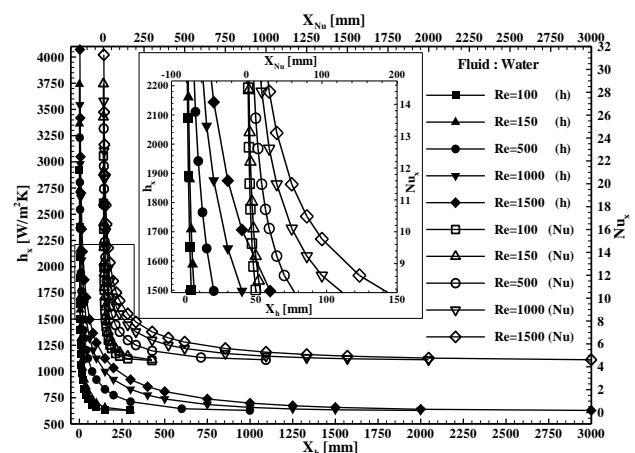
$$\text{div}(\rho \vec{V} C_p T) = \text{div}(k \text{ grad } T) \quad (5)$$

که P ، \vec{V} و T به ترتیب بردار سرعت، فشار و دما هستند.

۴ - شبیه سازی و نتایج

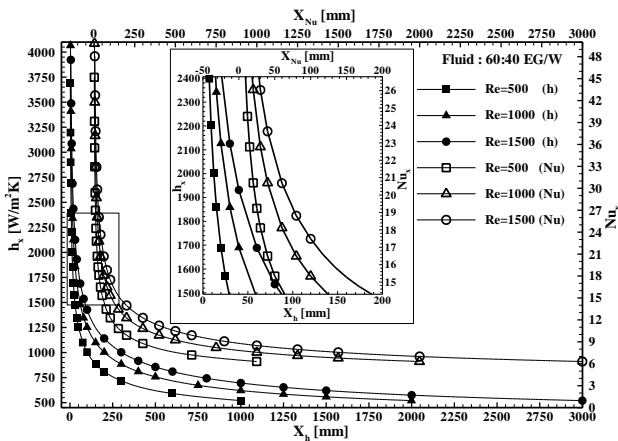
برای بررسی جریان داخل لوله صاف اعداد رینولدز ۱۰۰، ۱۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ که در محدوده جریان آرام قرار دارند شبیه‌سازی می‌شوند. لوله با قطر ۴/۵۷ mm و طول متفاوت برای هر عدد رینولدز که در **Error! Reference source not found.** توضیحات بخش قبل شبیه‌سازی شده است.

Error! Reference source not found. تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت موضعی سیال پایه آب با عدد رینولدز را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود با افزایش عدد رینولدز به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی انتقال حرارت جابجایی افزایش می‌یابد.



شکل ۳- تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت موضعی سیال آب با عدد رینولدز

برای بررسی اثر سیال پایه، مخلوط آب-اتیلن گلیکول که در مناطق سرد دنیا به دلیل نقطه انجماد پایین کاربرد دارد استفاده شده است. تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت موضعی با عدد رینولدز مطابق **Error! Reference source not found.** است و با افزایش عدد رینولدز مشابه قبل افزایش انتقال حرارت مشاهده می‌شود. البته باید توجه داشت که این سیال نسبت به آب، طول توسعه یافتگی بیشتری به دلیل بیشتر بودن عدد پراگت نیاز دارد.



شکل ۴- تغییرات محوری ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت موضعی سیال پایه آب-اتیلن- گلیکول با عدد رینولدز

۵ - نتیجه گیری

در این بخش اثر پارامترهای مختلف نظیر عدد رینولدز، غلظت حجمی نانوذرات، قطر نانوذرات، سیال پایه و نوع نانوذرات بر انتقال حرارت جابجایی و ضریب اصطکاک لوله صاف و سینوسی در شکل‌های مختلفی برای ارائه یک نتیجه گیری کلی مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی‌های انجام شده در سه هندسه مورد مطالعه نتایج زیر قابل استنباط است:

در لوله صاف با رشد لایه مرزی حرارتی، عدد ناسلت موضعی کاهش پیوسته را نشان می‌دهد. در لوله سینوسی عدد ناسلت موضعی در هر طول موج در قسمت همگرا بیشتر از قسمت واگرا است. دلیل آن سرعت متوسط و گرادیان سرعت بالاتر در قسمت همگرا است که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. مشاهده می‌شود مقدار عدد ناسلت موضعی در گلوگاه لوله سینوسی در تمام طول موج‌ها از مقدار آن در لوله صاف بسیار بیشتر است. برعکس آن، جریان معکوس نزدیک دیوار در قسمت محدب گرادیان سرعت پایینی دارد که نرخ انتقال حرارت را کاهش می‌دهد.

مراجع

[1] Kakaç, S., Bergles, A. E., Mayinger, F., and Yuncu, H., Heat transfer enhancement of heat exchangers, vol. 355, Springer, 1999.
[2] Guo X, Shirkhani M, Ahmed EM. Machine-Learning-Based Improved Smith Predictive Control for MIMO Processes. Mathematics. 2022 Oct 9;10(19):3696.
[3] Tavooi J, Shirkhani M, Abdali A, Mohammadzadeh A, Nazari M, Mobayen S, Asad JH, Bartoszewicz A. A new general type-2 fuzzy predictive scheme for PID tuning. Applied Sciences. 2021 Nov 5;11(21):10392.

- [4] Tavooosi J, Shirkhani M, Azizi A, Din SU, Mohammadzadeh A, Mobayen S. A hybrid approach for fault location in power distributed networks: Impedance-based and machine learning technique. *Electric Power Systems Research*. 2022 Sep 1;210:108073.
- [5] Huang H, Shirkhani M, Tavooosi J, Mahmoud O. A new intelligent dynamic control method for a class of stochastic nonlinear systems. *Mathematics*. 2022 Apr 22;10(9):1406.
- [6] Webb, R. L., *Principles of enhanced heat transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [7] Bian, Y., Chen, L., Zhu, J., and Li, C., "Effects of dimensions on the fluid flow and mass transfer characteristics in wavy-walled tubes for steady flow", *Heat and Mass Transfer*, vol. 49(5), pp. 723-731, 2013/05/01 2013.
- [8] Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, 1995.
- [9] Pak, B. C. and Cho, Y. I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat Transfer*, vol. 11(2), pp. 151-170, 1998/04/01 1998.
- [10] Khanafer, K. and Vafai, K., "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54(19-20), pp. 4410-4428, 2011.
- [11] Ho, C. J., Liu, W. K., Chang, Y. S., and Lin, C. C., "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49(8), pp. 1345-1353, 2010.
- [12] Vajjha, R. S., Das, D. K., and Kulkarni, D. P., "Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53(21-22), pp. 4607-4618, 2010.
- [13] Lotfi, R., Saboohi, Y., and Rashidi, A. M., "Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37(1), pp. 74-78, 2010.
- [۱۴] پارسا، م، مدل سازی انتقال حرارت در داخل لوله های سینوسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۹۱.
- [15] Hodges, J. and Lehmann, E.L., "Some applications of the cramer – Rao inequality", *Proceeding of 2nd Berkely Symposium on mathematics, Statistics, and Probability*, Vol. 1, pp.13-22, Berkeley, 1951.
- [16] نادری، م. و حسینی، س.ر.، "ارزیابی تاثیر فرایند سطحی نورد عمیق بر ساختار میکروسکوپی سطح فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI316"، مجموعه مقالات چهاردهمین سمینار ملی مهندسی سطح، ص ص ۱۴-۲۰، اصفهان ۱۳۹۲.