



مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوسیال در مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ عمودی

بهزاد فیروزه^{۱*}، کوروش جواهرده^۲

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی ۴۱۹۹۶۱۳۷۷۶ b_firouzeh@msc.guilan.ac.ir

چکیده

در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوسیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{آب}$ در مبدل‌های حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ به صورت عددی بررسی شده است. خواص ترمومکانیکی وابسته به دما برای نانوسیال و سیال پایه در نظر گرفته شده و تحلیل‌ها برای کویل‌های مارپیچ با نسبت انحنای ۰.۱، ۰.۰۶۶۶ و ۰.۰۵ و غلظت حجمی نانوذرات ۰-۲٪ در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. با استفاده از مدل سه بعدی توپولوگی $k-\epsilon$ Realizable ANSYS FLUENT 15. انجام شده است. طبق نتایج، نشان داده شد که افزایش نسبت انحنای کویل و غلظت حجمی نانوذرات در یک رینولدز یکسان، ضریب انتقال حرارت و افت فشار کویل‌های مارپیچ را افزایش می‌دهد. رابطه‌ای برای پیش‌بینی عدد ناسلت خارجی بر حسب عدد رایلی در کویل‌های مارپیچ با استفاده از نتایج عددی پیشنهاد گردید. درنهایت شاخص عملکرد حرارتی برای حالت‌های مختلف مقایسه شد و مکاریم آن برای کویل با نسبت انحنای ۰.۱ و غلظت حجمی نانوذرات ۲٪ بدست آمد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها و کویل‌های مارپیچ به جای سیال پایه و لوله‌های مستقیم، عملکرد حرارتی مبدل را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژگان: نانوسیال، دینامیک سیالات محاسباتی، انتقال حرارت، افت فشار، کویل‌های مارپیچ

Numerical study on turbulent mixed convection heat transfer and pressure drop of nanofluid in vertical helically coiled tube heat exchanger

Behzad Firouzeh*, Kourosh Javaherdeh

Department of Mechanical Engineering, Guilain University, Rasht, Iran
* P.O.B. 4199613776, Rasht, Iran, b_firouzeh@msc.guilan.ac.ir

ABSTRACT

In this study, turbulent mixed convection heat transfer and pressure drop of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{water}$ nanofluid in helically coiled tube heat exchangers were investigated. Thermo-physical properties of nanofluid and base fluid were considered temperature dependent and analysis for helical coils, with curvature ratios of 0.1, 0.0666 and 0.05, and nanoparticles with volume concentrations in the range of 0-2% in various Reynolds number were carried out. CFD analysis was done by 3D realizable $k-\epsilon$ turbulent model in ANSYS FLUENT 15. According to the results, it was shown that by increasing the coil curvature ratio and nanoparticles volume concentrations in a same Reynolds number, heat transfer coefficient and pressure drop of helical coils both increased. Using numerical data, a correlation for predicting outer Nusselt number in terms of Rayleigh number in helical coils were proposed. Thermal performance index were compared in various conditions and the maximum value was noticed for coil with a curvature ratio of 0.1 and nanoparticles volume concentrations of 2%. Results showed that using nanofluid and helical coils instead of base fluid and straight pipes, improves thermal performance of the heat exchangers.

Keywords: Nanofluid, CFD, Heat transfer, Pressure drop, Helical coils

ثانویه^۱ را به وجود می‌آورد. با استفاده از لوله‌های مارپیچ به جای لوله‌های مستقیم خطوط جریان خمیده جایگزین خطوط جریان مستقیم شده و سبب افزایش نرخ مننتوم و انتقال حرارت می‌شوند، در نتیجه اندازه مبدل حرارتی کوچکتر شده و ضریب انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، بهبود ویژگی‌های انتقال انرژی سیال، یک راه برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. یک روش برای بالا بردن هدایت حرارتی سیال‌ها اضافه کردن ذرات کوچک جامد به سیال است. هدایت حرارتی سیال‌هایی با ذرات معلق بالاتر از سیال‌های معمول است، بنابراین اضافه کردن نانوذرات به سیال یک راه موثر برای بهبود شاخص‌های انتقال حرارت سیال‌ها است. ذراتی

-۱- مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع انواع مبدل‌های حرارتی در صنایع، مطالعه بر روی آن‌ها جهت ارتقای کارایی آن‌ها ضرورت ویژه‌ای دارد. عملکرد مبدل‌های حرارتی می‌تواند با استفاده از تکنیک‌های افزایش انتقال حرارت بهبود یابد.

استفاده از لوله‌های مارپیچ یکی از معمول‌ترین روش‌های افزایش انتقال حرارت مبدل‌ها در بسیاری از صنایع و دستگاه‌ها مانند سیستم‌های حرارتی و برودتی، تهویه مطبوع، صنایع غذایی، شیمیایی و هسته‌ای، دستگاه‌های فضایی و نیروگاه‌های برق می‌باشد. در لوله‌های مارپیچ، مولفه شعاعی سرعت توسط نیروی گریز از مرکز ایجاد می‌شود و جریان سیال در قسمت بیرونی لوله سریع‌تر از قسمت درونی حرکت کرده و این اختلاف سرعت، جریان

¹ Secondary flow

Please cite this article using:

B.Firouzeh, K.Javaherdeh, Numerical study on turbulent mixed convection heat transfer and pressure drop of nanofluid in vertical helically coiled tube heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Second International Conference on Air-Conditioning, Heating and Cooling Installations*, Vol. 16, No. 13, pp. 17-22, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بررسی پژوهش‌های گذشته مشخص می‌کند که تاکنون هیچ پژوهشی در مورد بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوپیل‌ها درون مبدل‌های حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ انجام نشده است. با در نظر گرفتن مبدل حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ قائم و نانو سیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{آب}$, تأثیر نسبت انحنای کویل مارپیچ و غلظت حجمی ذرات نانو بر شاخص‌های انتقال حرارت و افت فشار بررسی شده و این شاخص‌ها در جریان نانو سیال در لوله‌های مارپیچ با لوله‌های مستقیم و سیال پایه مقایسه شد. در نهایت رابطه‌ای برای به دست آوردن عدد ناسلت خارجی پیشنهاد شده و همچنین شاخص‌های عملکرد حرارتی مبدل‌ها در حالت‌های مختلف محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند.

2- مدل عددی

برای انجام محاسبات عددی هندسه مورد بررسی، از نرم‌افزار فلوئنت 15 استفاده شده است. معادلات حاکم برای جریان، دما و فشار در همه سلول‌ها حل شدند. ابتدا مدل سه‌بعدی در نرم‌افزارهای طراحی، مدل‌سازی شد. شماتیک هندسه یک کویل مارپیچ در "شکل 1" نشان داده شده است. محاسبات برای 3 کویل انجام شده که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول 1 آمده است. جنس لوله از فولاد نرم با ضخامت 2.3 میلی‌متر با چگالی $\text{kg}/\text{m}^3 = 7850$, ظرفیت گرمایی ویژه $K_{\text{p}} = 620 \text{ J/Kg K}$ و ضریب هدایت حرارتی $K = 52 \text{ W/m K}$ انتخاب شد.

شکل 2 شبکه بندی و استقلال شبکه در "شکل 2" شبکه بندی و هندسه کویل و در "شکل 3" شبکه بندی یک سطح مقطع از کویل نشان داده شده است. برای اطمینان از دقیقیت و اعتبار نتایج، یک بررسی دقیق برای استقلال شبکه حل عددی برای چهار شبکه بندی مختلف با چگالی شبکه از $11.834e8 \text{ cell}/\text{m}^3$ تا $5.917e8 \text{ cell}/\text{m}^3$ انجام گردید که چگالی شبکه تعداد سلول‌ها بر واحد حجم می‌باشد. مشاهده شد که پس از چگالی $9.862e8 \text{ cell}/\text{m}^3$ خطاهای کاهش چشمگیری نداشته و همین چگالی شبکه برای محاسبات انتخاب شد.

2-2- معادلات حاکم

مدل توربولانس Realizable k-ε برای شبیه‌سازی جریان درهم استفاده شده است. این مدل نسبت به دو مدل استاندارد و RNG برای پیش‌بینی جریان‌ها شامل چرخش، دارای جریان‌های ثانویه پیچیده، انحنای شدید خطوط جریان

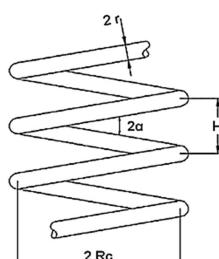


Fig. 1 Schematic geometry of a helical coil

شکل 1 شماتیک هندسه یک کویل مارپیچ

جدول 1 مشخصات هندسی کویل‌های مارپیچ

Table 1 Geometry properties of helical coils

کویل	δ	L (mm)	$2r$ (mm)	$2R_o$ (mm)	H (mm)
کویل 1	0.1	2830.56	20	200	30
کویل 2	0.0666	4243.29	20	200	30
کویل 3	0.05	5656.47	20	200	30

با قطر کوچکتر از 100 نانومتر در مقایسه با ذرات در ابعاد میکرو، دارای پتانسیل بیشتری برای افزایش انتقال حرارت هستند.

1-1- معرفی بر مطالعات پیشین

تاکنون، مطالعات اندکی در مورد بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوپیل‌ها در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های مارپیچ انجام شده است. راجر و میهوا¹ [1], به صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار کویل مارپیچ که با بخار گرم می‌شد را مطالعه کردند. آن‌ها روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز، نسبت انحنای کویل و عدد پرانتل برای جریان درهم داخل کویل ارائه دادند. جایاکومار و همکاران² [2]، پژوهشی عددی برای تعیین شاخص‌های حرارتی جریان درهم آب درون کویل‌های حرارتی مارپیچ انجام دادند. آن‌ها با تغییر مشخصه‌های هندسی کویل و لوله، مانند قطر لوله، قطر و گام کویل، تغییرات ناسلت محلی را در طول و محیط دیواره لوله نشان دادند. در مورد بررسی افت فشار لوله‌های منحنی شکل در جریان درهم، ایتو³ [3]. رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز و نسبت انحنای کویل به دست آورد. میشرا و گوپتا⁴ [4]، با مطالعه روی یک کویل مارپیچ توانستند رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک در جریان درهم ارائه دهند.

تاکنون پژوهش‌هایی نیز در مورد انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و انتقال حرارت سیال به سیال در مبدل‌های حرارتی انجام شده است. یک پژوهش تجربی روی انتقال حرارت جابجایی طبیعی یک کویل مارپیچ توسط علی⁵ [5] انجام شد. میانگین ضریب انتقال حرارت برای جریان طبیعی درهم بدست آمد. آزمایش‌ها برای کویل‌هایی با 4 نسبت انحنای مختلف و تعداد دور 5 و 10 دور انجام شد. او با استفاده از نتایج، رابطه ضریب انتقال حرارت برحسب عدد رایلی را به دست آورد. میرقربانی و همکاران⁶ [6]. مطالعه‌ای عددی روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی یک کویل مارپیچ با پوسته استوانه‌ای در اعداد رینولدز و رایلی مختلف، همچنین نسبت قطر لوله به قطر کویل و گام بی بعد مختلف انجام دادند. تفاوت کار آن‌ها با کارهای مشابه در نظر گرفتن شرایط مرزی برای یک مبدل با انتقال حرارت سیال به سیال به جای در نظر گرفتن شرایط دما و شار حرارتی ثابت روی دیواره بود.

در مورد استفاده از نانوپیل‌ها در مبدل‌های حرارتی، علی⁶ [7]. محاسباتی عددی روی انتقال حرارت و افت فشار نانوپیل‌ها درون مبدل حرارتی با لوله‌های حلقوی مارپیچ با جریان درهم انجام دادند. با در نظر گرفتن نانو سیال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{آب}$ با درصد حجمی 0.5-2% محاسبات برای 3 کویل انجام شد. نتایج نشان داد با افزایش نسبت انحنای ضریب انتقال حرارت و افت فشار افزایش و با افزایش درصد حجمی ذرات نانو ضریب انتقال حرارت و به همراه آن افت فشار افزایش می‌یابد. رخشا و همکاران⁸ [8] با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوپیل $\text{Cu}/\text{آب}$ در لوله‌ای مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روایتی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند و شاخص‌های عملکرد حرارتی را برای حالت‌های مختلف محاسبه کردند.

2- اهداف و نوآوری پژوهش

¹ Roger and Meyhew

² Jayakumar et al.

³ Ito

⁴ Mishra and Gupta

⁵ Ali

⁶ Aly

فوق مریبوط به این ناحیه می باشدند.

نرخ انتقال حرارت کویل:

$$Q = \dot{m}C_p(T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (6)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی کویل:

$$h_o = \frac{Q}{(T_a - T_{\text{ow}})A_o} \quad (7)$$

عدد ناسلت خارجی:

$$Nu_o = \frac{h_o d_o}{K} \quad (8)$$

تمامی مشخصات ترمو-فیزیکی سیال خارجی در دمای متوسط بالک سیال خارجی محاسبه شده اند.

ضریب اصطکاک:

$$f = \frac{2\Delta Pd_i}{\rho u^2 L} \quad (9)$$

3-2- ویژگی های ترمو-فیزیکی نانوسيال
در این پژوهش از نانوسيال $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{آب}$ استفاده شده و ویژگی های ترموفیزیکی سیال پایه (آب) بصورت توابع چند جمله ای وابسته به دما در نظر گرفته شده است. ویژگی های ترموفیزیکی نانوسيال از روابط (10) تا (13) محاسبه شده اند. همچنین ویژگی های نانوذره Al_2O_3 نیز در جدول 2 آمده است.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (10)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (11)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_{np} + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_{np})}{(K_{np} + 2K_f) + (K_f - K_{np})\phi} \quad (12)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}} \quad (13)$$

4-2- شرایط مرزی

در مبدل های حرارتی با انتقال حرارت سیال به سیال روی سطح خارجی کویل، انتقال حرارت جابجایی طبیعی اتفاق می افتد. شرایط مرزی کویل در ورودی، خروجی و دیواره لوله در جدول 3 آمده است.
ن، جهت نرمال سطح است. سیال روی دیواره کویل آب و دمای آن (دمای محیط) 80°C می باشد.

جدول 2 ویژگی های ترموفیزیکی نانوذرات Al_2O_3

Table 2 Thermo-physical properties of Al_2O_3 nanoparticles				
(nm)	قطر ذرات	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	K (W/m K)
40		3970	765	40

جدول 3 شرایط مرزی کویل مارپیچ

متغیر	ورودی	دیواره	خرجی
u	1-3.5 m/s	0	$\partial u / \partial n = 0$
T	30°C	$-K \partial T / \partial n = h_a(T - T_a)$	$\partial T / \partial n = 0$
P	$\partial P / \partial n = 0$	$\partial P / \partial n = 0$	0

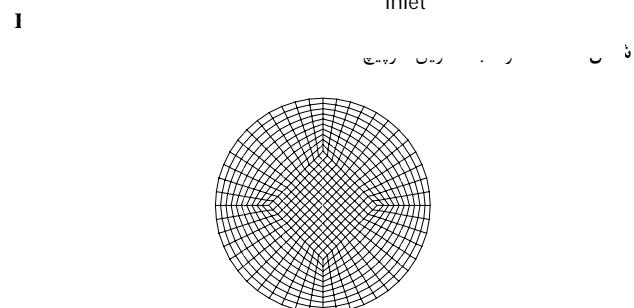
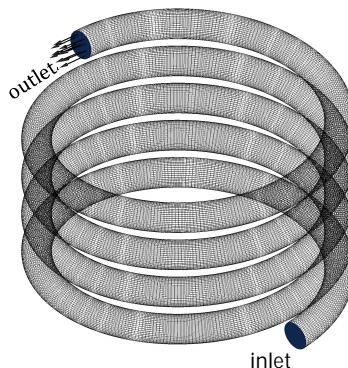


Fig. 3 Grid at cross section of helical coil

شکل 3 شبکه سطح مقطع کویل مارپیچ

و جدایش دقیق تر است [7]. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم سیمپل¹ انجام شد و از طرح مرتبه دوم آپوینند² برای حل معادلات ممتد، انرژی جنبشی درهم، نرخ اتلاف درهم و معادله انرژی استفاده گردید. همچنین معیار همگابی نسبی برای پیوستگی، سرعت ها، k و e 10^{-5} و برای معادله انرژی 10^{-7} در نظر گرفته شد. روابط لازم برای استخراج نتایج به صورت زیر است:

متغیرها و پارامترهای بی بعد:

$$\text{Re} = \frac{\rho u d_i}{\mu}, \delta = \frac{d_i}{D}, \text{Pr} = \frac{C_p \mu}{K}, \text{Ra} = \frac{g \beta \Delta TD^3}{\alpha v} \quad (1)$$

عدد رینولدز بحرانی به صورت رابطه (2) ارائه گردید.

$$\text{Re}_{cr} = 2300[1 + 8.6(\delta)^{0.45}] \quad (2)$$

دمای بالک سیال:

$$T_b = \frac{\int UC_p T dA}{\int UC_p dA} \quad (3)$$

عدد ناسلت داخلی میانگین در یک سطح مقطع لوله:

$$Nu_{i,\text{ave}} = \frac{q'' d_i}{K_m (T_{w,m} - T_b)} \quad (4)$$

که T_m ، K_m و q'' به ترتیب، ضریب هدایت حرارتی سیال، دمای سیال و شار حرارتی در یک سطح لوله هستند و از رابطه (5) بدست می آیند:

$$\varphi_m = \frac{\int_0^{2\pi} (\varphi \Delta A) d\varphi}{\int_0^{2\pi} (\Delta A) d\varphi} \quad (5)$$

در رابطه اخیر φ می تواند هر یک از پارامترهای T ، K و q'' باشد. همچنین A مساحت المانی یک حلقه موازی دیواره است که پارامترهای

¹ SIMPLE

² Second order upwind

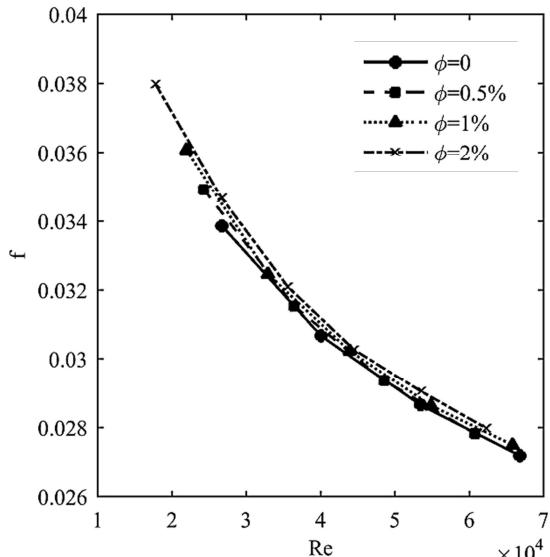


Fig. 5 Nanoparticles volume concentration effect on friction factor
شکل ۵ تأثیر غلظت حجمی نانوذرات بر ضریب اصطکاک

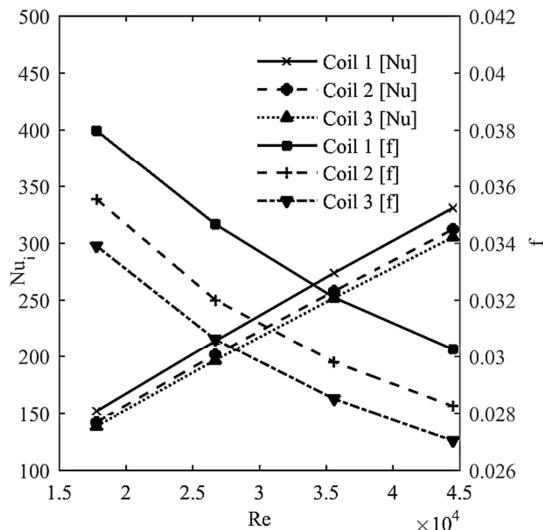


Fig. 6 Curvature ratio effect on Nusselt number and friction factor
شکل ۶ تأثیر نسبت انحنا بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک

ثانویه شده و در نتیجه انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابند. در "شکل 6" تأثیر نسبت انحنا بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در کویل‌های مارپیچ نمایش داده شده است.

3-3- جابجایی طبیعی کویل‌های مارپیچ قائم

برای مطالعه جابجایی طبیعی کویل‌های مارپیچ عمودی، محاسبات برای سه هندسه کویل انجام گردید. با تغییر دمای سیال بیرونی، عدد ناسلت بر پایه طول لوله بدست آمد. در "شکل 7" اعداد ناسلت بدست آمده از محاسبات برای سه کویل بر حسب عدد رایلی نشان داده شده است. با استفاده از نتایج، رابطه (14) برای پیش‌بینی عدد ناسلت خارجی بر پایه طول لوله کویل مارپیچ ارائه شده است.

$$Nu_L = 0.4643 Ra_L^{0.283}$$

$$9.95 \times 10^{11} \leq Ra_L \leq 4.96 \times 10^{14}, 9.77 \leq \frac{D}{d_0} \leq 19.55 \quad (14)$$

3- نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی، نتایج عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای جریان درهم آب در کویل 1، با رابطه راجر و میهו [1] برای عدد ناسلت و رابطه ایتو [3] برای ضریب اصطکاک در جدول 4 مقایسه شده‌اند. همان‌طور که پیداست، نتایج از دقت کافی برخوردار هستند.

1- تأثیر نانوپیلارها بر انتقال حرارت و افت فشار

در این قسمت به بررسی اثر اضافه شدن نانوذرات Al_2O_3 به آب بر انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم در کویل‌های مارپیچ پرداخته شده است. با توجه به "شکل 4"، با محاسبه عدد ناسلت در رینولدزهای مختلف در نانوپیلارها با غلظت حجمی مختلف نانوذرات، مشخص شد که عدد ناسلت و درنتیجه ضریب انتقال حرارت به طور متوسط در تمامی غلظت‌های حجمی نانوذرات نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد و هرچه غلظت حجمی ذرات نانو افزایش یابد انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد، به طوری که در $Re=62309$ برای غلظت حجمی نانوذرات 2%， عدد ناسلت 15% نسبت به سیال پایه افزایش یافته است.

در "شکل 5"، ضریب اصطکاک جریان درهم نانوپیلارها با غلظت حجمی نانوذرات 0.5% و 1% و 2% با سیال پایه در کویل 1 محاسبه و مقایسه شده‌اند. افزایش غلظت حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب اصطکاک شده است.

2- تأثیر نسبت انحنا بر انتقال حرارت و افت فشار

انحنا یک پارامتر مهم در کویل‌های مارپیچ است. تأثیر نسبت انحنا بر عدد ناسلت با تغییر قطر کویل برای سه قطر مختلف مورد بررسی قرار گرفت. طبق تعریف نسبت انحنا، با افزایش قطر کویل نسبت انحنا کاهش می‌یابد. افزایش نسبت انحنا، باعث افزایش نقش نیروی گریز از مرکز شده و غلظت جریان

جدول 4 مقایسه نتایج عدد ناسلت و ضریب اصطکاک

Table 4 Comparison of Nusselt number and friction factor

رینولدز	Nu	Nu [1]	خطا	f	f [3]	خطا
4×10^4	270	265	1.8%	0.0367	0.0365	0.5%
5.3×10^4	342	338	1.1%	0.0286	0.0291	1.7%
6.6×10^4	417	410	1.7%	0.0272	0.0280	2.8%

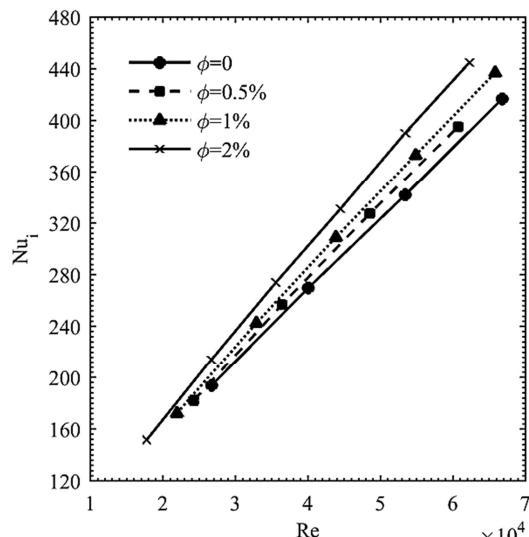


Fig. 4 تأثیر غلظت حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت

شکل 4 تأثیر غلظت حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت

4- نتیجه‌گیری

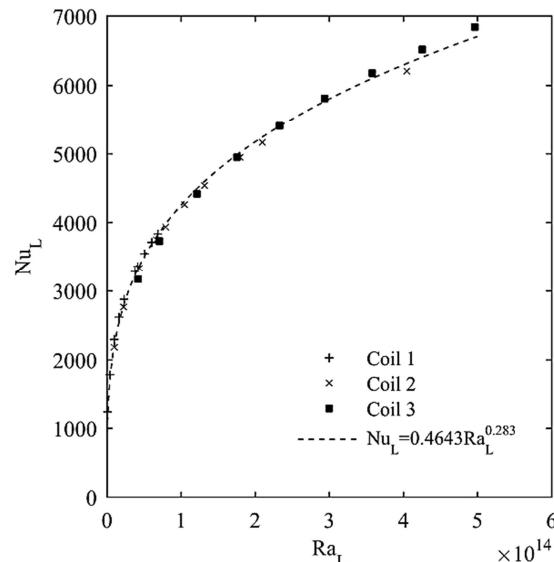
انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوپیچ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{آب}$ در مبدل‌های حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش غلظت حجمی نانوذرات و نسبت انحنای کویل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و همچنین افت فشار در لوله‌های مارپیچ گردید. با تحلیل نتایج برای انتقال حرارت طبیعی روی دیواره بیرونی کویل، رابطه‌ای برای پیش‌بینی عدد ناسلت خارجی بر حسب عدد رایلی پیشنهاد شد. در نهایت، محاسبه شاخص عملکرد حرارتی برای حالت‌های مختلف نشان داد که استفاده از نانوپیچ‌ها و کویل‌های مارپیچ به جای سیال پایه و لوله‌های مستقیم، عملکرد حرارتی مبدل را بهبود می‌بخشد.

5- فهرست عالیم	
	مساحت (m^2)
ضریب گرمایی ویژه ($\text{JKg}^{-1}\text{K}^{-1}$)	C_p
قطر کویل (m)	D
قطر لوله (m)	d
ضریب اصطکاک دارسی ویسکاچ (ms^{-2})	f
شتاب گرانش (ms $^{-2}$)	g
ضریب جابجایی حرارتی ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	h
ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)	K
عدد ناسلت	Nu
فشار (Pa)	P
عدد پرانتل	Pr
شار گرمایی (Wm^{-2})	q''
عدد رایلی	Ra
عدد رینولدز	Re
دما (K)	T
سرعت (ms^{-1})	U
عالیم یونانی	
لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)	μ
چگالی (kgm^{-3})	ρ
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β
غلظت حجمی نانوذرات	ϕ
نسبت انحنای کویل	δ
لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	v
زیرنویس‌ها	
میانگین	Ave
سیال پایه	bf
سیال	f
داخلی	i
طولی	L
نانوپیچ	nf
خارجی	o
لوله مستقیم	s
دیواره لوله	w

4-3- شاخص عملکرد حرارتی

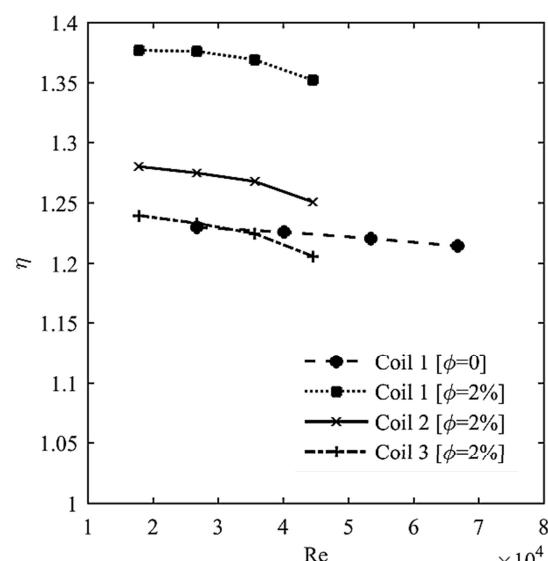
استفاده از لوله‌های مارپیچ و نانوپیچ‌ها به جای لوله‌های مستقیم و سیال پایه، انتقال حرارت جابجایی را در رینولدز یکسان افزایش می‌دهد ولی با افت فشار بیشتری نیز همراه است که می‌تواند مانع استفاده از آن‌ها در کاربردهای عملی شود. بنابراین برای به دست آوردن شرایط کاری بهینه و در نظر گرفتن افت فشار در کنار افزایش انتقال حرارت شاخص عملکرد حرارتی طبق رابطه (15) تعریف شده است. در "شکل 8" تغییرات شاخص عملکرد حرارتی را در رینولدزهای یکسان برای نسبت انحنای‌های مختلف و غلظت حجمی‌های مختلف نانوذرات Al_2O_3 در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های مارپیچ نمایش داده شده است که ماکریم مقدار آن برای کویل 1 $\eta = 2\%$ بوده است.

$$\eta = \frac{(\text{Nu}_L^+ / \text{Nu}_{s,bf}^-)^{1/3}}{(f^+ / f_{s,bf}^-)^{1/3}} \quad (15)$$



شکل 7 عدد ناسلت خارجی بر پایه طول لوله بر حسب عدد رایلی

شکل 7 عدد ناسلت خارجی بر پایه طول لوله بر حسب عدد رایلی



شکل 8 تغییرات شاخص عملکرد حرارتی در مقابل رینولدز

شکل 8 تغییرات شاخص عملکرد حرارتی در مقابل رینولدز

6- مراجع

- [5] M. E. ALI, Experimental investigation of natural convection from vertical helical coiled tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 665-671, 1994.
- [6] H. Mirgolbabaei, H. Taherian, G. Domairry, N. Ghorbani, Numerical estimation of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 66, pp. 805-819, 2011.
- [7] W. I. A. Aly, Numerical study on turbulent heat transfer and pressure drop of nanofluid in coiled tube-in-tube heat exchangers, *Energy Conversion and Management*, Vol. 79, pp. 304-316, 2014.
- [8] M. Rakhsha, F. Akbaridoust, A. Abbassi, M. Safar-Avval, Experimental and numerical investigation of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature, *Powder Technology*, 2015.
- [1] G. F. C. Rogers, Y. R. Mayhew, Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 7, pp. 1207-1216, Pergamon Press 1964.
- [2] J. S. Jayakumar, S. M. Mahajani, J. C. Mandal, K. N. Iyer, P. K. Vijayan, CFD analysis of single-phase flows inside helically coiled tubes, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 34, pp. 430-446, 2010.
- [3] H. Ito, Friction factors of turbulent flow in curved pipes, *Journal of Basic Engineering*, Vol. 81, pp. 123-134, 1959.
- [4] P. Mishra, S. N. Gupta, Momentum Transfer in Curved Pipes. 1. Newtonian Fluids, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, Vol. 18 (1), pp. 130-137, 1979.