



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

بهزاد فیروزه<sup>1\*</sup>، کوروش جواهرده<sup>2</sup>

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

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

\* رشت، صندوق پستی 4199613776، b\_firouzeh@msc.guilan.ac.ir

### چکیده

در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوسیال  $Al_2O_3$ /آب در مبدل‌های حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ به صورت عددی بررسی شده است. خواص ترمو-فیزیکی وابسته به دما برای نانوسیال و سیال پایه در نظر گرفته شده و تحلیل‌ها برای کویل‌های مارپیچ با نسبت انحنای 0.1، 0.0666 و 0.05 و غلظت حجمی نانوذرات 0-2% در اعداد رینولدز مختلف انجام شده است. با استفاده از مدل سه بعدی توربولانت  $k-\epsilon$  Realizable، تحلیل‌های دینامیک سیالات محاسباتی توسط 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 برحسب عدد ریلی در کویل‌های مارپیچ با استفاده از نتایج عددی پیشنهاد گردید. در نهایت شاخص عملکرد حرارتی برای حالت‌های مختلف مقایسه شد و ماکزیمم آن برای کویل با نسبت انحنای 0.1 و غلظت حجمی نانوذرات 2% به دست آمد. نتایج نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها و کویل‌های مارپیچ به جای سیال پایه و لوله‌های مستقیم، عملکرد حرارتی مبدل را بهبود می‌بخشد.

**کلید واژگان:** 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<sup>\*</sup>, Kouros Javaherdeh

Department of Mechanical Engineering, Guilan 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  $Al_2O_3$ /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<sup>1</sup> 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 ممنوم 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

### 1- مقدمه

با توجه به کاربرد وسیع انواع مبدل‌های حرارتی در صنایع، مطالعه بر روی آن‌ها جهت ارتقاء 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

<sup>1</sup> 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)

بررسی پژوهش‌های گذشته مشخص می‌کند که تاکنون هیچ پژوهشی در مورد بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوسیال‌ها 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  $Al_2O_3$ /آب، تاثیر نسبت انحنای کوئل 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 فلونت 15 استفاده شده است. معادلات حاکم برای جریان، دما و فشار در همه‌ی سلول‌ها حل شدند. ابتدا مدل سه‌بعدی در نرم‌افزارهای طراحی، مدل‌سازی شد. شماتیک هندسه یک کوئل مارپیچ در "شکل 1" نشان داده شده است. محاسبات برای 3 کوئل انجام شده که مشخصات هندسی آن‌ها در جدول 1 آمده است. جنس لوله از فولاد نرم با ضخامت 2.3 میلی‌متر با چگالی  $kg/m^3$   $\rho=7850$ ، ظرفیت گرمایی ویژه  $C_p=620 J/Kg K$  و ضریب هدایت حرارتی  $K=52 W/m K$  انتخاب شد. 1-2- شبکه بندی و استقلال شبکه

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

## 2-2- معادلات حاکم

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

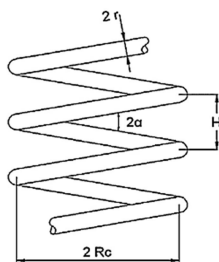


Fig. 1 Schematic geometry of a helical coil

شکل 1 شماتیک هندسه یک کوئل مارپیچ

جدول 1 مشخصات هندسی کوئل‌های مارپیچ

Table 1 Geometry properties of helical coils

کوئل	$\delta$	$L$ (mm)	$2r$ (mm)	$2R_c$ (mm)	$H$ (mm)
کوئل 1	0.1	2830.56	20	200	30
کوئل 2	0.0666	4243.29	20	200	30
کوئل 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- مروری بر مطالعات پیشین

تاکنون، مطالعات اندکی در مورد بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و افت فشار جریان درهم نانوسیال‌ها در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های مارپیچ انجام شده است. راجر و میهو<sup>1</sup> [1]، به صورت تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری و افت فشار کوئل مارپیچ که با بخار گرم می‌شد را مطالعه کردند. آن‌ها روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز، نسبت انحنای کوئل و عدد پراپرتل برای جریان درهم داخل کوئل ارائه دادند. جایاکومار و همکاران<sup>2</sup> [2]، پژوهشی عددی برای تعیین شاخص‌های حرارتی جریان درهم آب درون کوئل‌های حرارتی مارپیچ انجام دادند. آن‌ها با تغییر مشخصه‌های هندسی کوئل و لوله، مانند قطر لوله، قطر و گام کوئل، تغییرات ناسلت محلی را در طول و محیط دیواره لوله نشان دادند. در مورد بررسی افت فشار لوله‌های منحنی شکل در جریان درهم، ایتو<sup>3</sup> [3]، رابطه‌ای برای ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز و نسبت انحنای کوئل به دست آورد. میشر و گوپتا<sup>4</sup> [4]، با مطالعه روی یک کوئل 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 کوئل مارپیچ توسط علی<sup>5</sup> [5] انجام شد. میانگین ضریب انتقال حرارت برای جریان طبیعی درهم به دست آمد. آزمایش‌ها برای کوئل‌هایی با 4 نسبت انحنای مختلف و تعداد دور 5 و 10 انجام شد. او با استفاده از نتایج، رابطه ضریب انتقال حرارت برحسب عدد رایلی را به دست آورد. میرقربانی و همکاران [6]، مطالعه‌ای عددی روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی یک کوئل مارپیچ با پوسته استوانه‌ای در اعداد رینولدز و رایلی مختلف، همچنین نسبت قطر لوله به قطر کوئل 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 نانوسیال‌ها در مبدل‌های حرارتی، علی<sup>6</sup> [7]، محاسباتی عددی روی انتقال حرارت و افت فشار نانوسیال‌ها درون مبدل حرارتی با لوله‌های حلقوی مارپیچ با جریان درهم انجام دادند. با در نظر گرفتن نانو سیال  $Al_2O_3$ /آب با درصد حجمی 0.5-2%، محاسبات برای 3 کوئل 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 همکاران [8] با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال  $CuO$ /آب در لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند و شاخص‌های عملکرد حرارتی را برای حالت‌های مختلف محاسبه کردند.

## 2-1- اهداف و نوآوری پژوهش

<sup>1</sup> Roger and Meyhew

<sup>2</sup> Jayakumar et al.

<sup>3</sup> Ito

<sup>4</sup> Mishra and Gupta

<sup>5</sup> Ali

<sup>6</sup> Aly

فوق مربوط به این ناحیه می‌باشند.

نرخ انتقال حرارت کوپل:

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

ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی کوپل:

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

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 شده‌اند.

ضریب اصطکاک:

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

### 3-2- ویژگی‌های ترمو-فیزیکی نانوسیال

در این پژوهش از نانوسیال  $Al_2O_3$  / آب استفاده شده و ویژگی‌های ترمو-فیزیکی سیال پایه (آب) بصورت توابع چند جمله‌ای وابسته به دما در نظر گرفته شده است. ویژگی‌های ترمو-فیزیکی نانوسیال از روابط (10) تا (13) محاسبه شده‌اند. همچنین ویژگی‌های 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

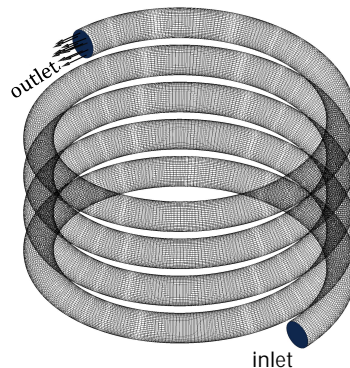
در مبدل‌های حرارتی با انتقال حرارت سیال به سیال روی سطح خارجی کوپل، انتقال حرارت جابجایی طبیعی اتفاق می‌افتد. شرایط مرزی کوپل در ورودی، خروجی و دیواره لوله در جدول 3 آمده است. جهت نرمال سطح است. سیال روی دیواره کوپل آب و دمای آن (دمای محیط)  $80^\circ C$  می‌باشد.

جدول 2 ویژگی‌های ترمو-فیزیکی نانوذرات  $Al_2O_3$

قطر ذرات (nm)	$\rho$ (Kg/m)	$C_p$ (J/Kg K)	$K$ (W/m K)
40	3970	765	40

جدول 3 شرایط مرزی کوپل مارپیچ

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



1

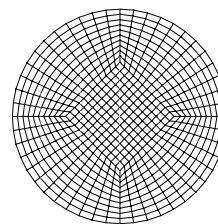


Fig. 3 Grid at cross section of helical coil

شکل 3 شبکه سطح مقطع کوپل مارپیچ

و جدایش دقیق‌تر است [7]. کوپلینگ فشار و سرعت با الگوریتم سیمپل<sup>1</sup> انجام شد و از طرح مرتبه دوم آپویند<sup>2</sup> برای حل معادلات ممنتوم، انرژی جنبشی درهم، نرخ اتلاف درهم و معادله انرژی استفاده گردید. همچنین معیار همگرایی نسبی برای پیوستگی، سرعت‌ها،  $k$  و  $\epsilon$ ،  $10^{-5}$  و برای معادله انرژی  $10^{-7}$  در نظر گرفته شد. روابط لازم برای استخراج نتایج به صورت زیر است:

متغیرها و پارامترهای بی‌بعد:

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

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

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

دمای بالک سیال:

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

عدد ناسلت داخلی میانگین در یک سطح مقطع لوله:

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

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

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

در رابطه اخیر  $\varphi$  می‌تواند هر یک از پارامترهای  $T$ ،  $K$  و  $q''$  باشد. همچنین  $\Delta A$ ، مساحت المانی یک حلقه موازی دیواره است که پارامترهای

<sup>1</sup> SIMPLE

<sup>2</sup> Second order upwind

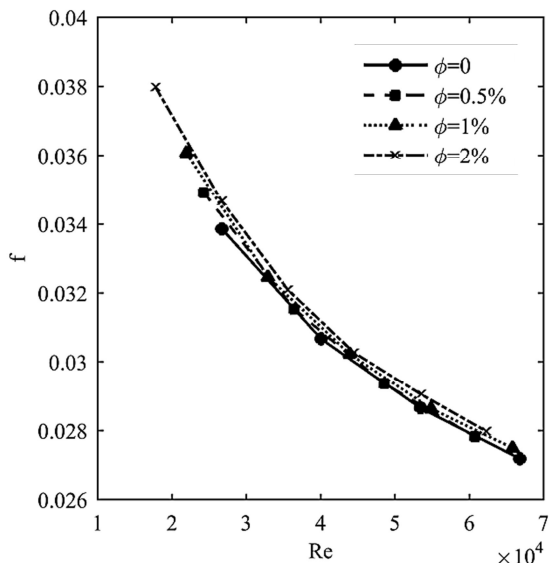


Fig. 5 Nanoparticles volume concentration effect on friction factor

شکل 5 تاثیر غلظت حجمی نانوذرات بر ضریب اصطکاک

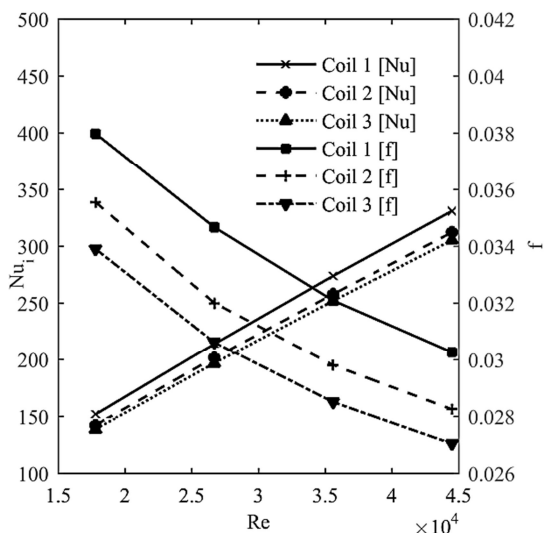


Fig. 6 Curvature ratio effect on Nusselt number and friction factor

شکل 6 تاثیر نسبت انحنا بر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک

ثانویه شده و در نتیجه انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابند. در "شکل 6" تاثیر 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 به دست آمد. در "شکل 7" اعداد ناسلت بدست آمده از محاسبات برای سه کویل برحسب 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.

$$Nu_L = 0.4643Ra_L^{0.283} \quad (14)$$

$$9.95 \times 10^{11} \leq Ra_L \leq 4.96 \times 10^{14}, 9.77 \leq \frac{D}{d_o} \leq 19.55$$

3- نتایج و بحث

برای اعتبارسنجی، نتایج عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای جریان درهم آب در کویل 1، با رابطه راجر و میهو [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.

1-3- تاثیر نانوسیال‌ها 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 نانوسیال‌ها با غلظت حجمی مختلف نانوذرات، مشخص شد که عدد ناسلت و در نتیجه ضریب انتقال حرارت به‌طور 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، به‌طوری‌که 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 نانوسیال‌ها با غلظت حجمی نانوذرات 0.5%، 1% و 2% با سیال پایه در کویل 1 محاسبه و مقایسه شده‌اند. افزایش غلظت حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب اصطکاک شده است.

2-3- تاثیر نسبت انحنا بر انتقال حرارت و افت فشار

انحنا یک پارامتر مهم در کویل‌های مارپیچ است. تاثیر 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

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

Table 4 Comparison of Nusselt number and friction factor

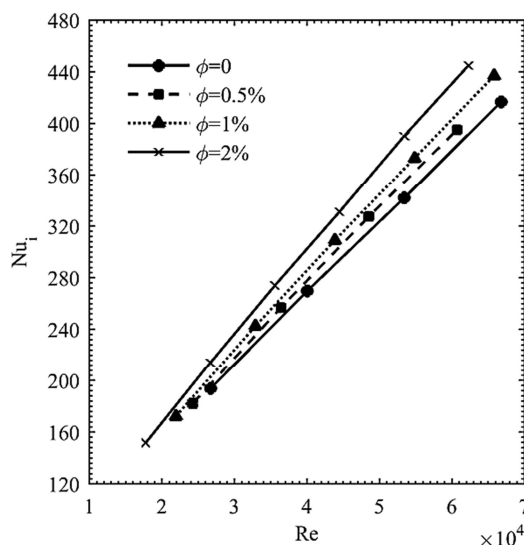


Fig. 4 Nanoparticles volume concentration effect on Nusselt number

شکل 4 تاثیر غلظت حجمی نانوذرات بر عدد ناسلت

4-3- شاخص عملکرد حرارتی

استفاده از لوله‌های مارپیچ و نانوسیال‌ها 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 انحنای مختلف و غلظت حجمی‌های مختلف نانوذرات  $Al_2O_3$  در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های مارپیچ نمایش داده شده است که ماکزیمم مقدار آن برای کوئل 1 و  $\phi=2\%$  بدست آمد.

$$\eta = \frac{(Nu^+ / Nu_{s,bf})}{(F^+ / F_{s,bf})^{1/3}} \quad (15)$$

4- نتیجه‌گیری

انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال  $Al_2O_3$  در مبدل‌های حرارتی سیال به سیال با لوله‌های مارپیچ به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش غلظت حجمی نانوذرات و نسبت انحنای کوئل باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و همچنین افت فشار در لوله‌های مارپیچ گردید. با تحلیل نتایج برای انتقال حرارت طبیعی روی دیواره بیرونی کوئل، رابطه‌ای برای پیش‌بینی عدد ناسلت خارجی برحسب عدد رایلی پیشنهاد شد. در نهایت، محاسبه شاخص عملکرد حرارتی برای حالت‌های مختلف نشان داد که استفاده از نانوسیال‌ها و کوئل‌های مارپیچ به جای سیال پایه و لوله‌های مستقیم، عملکرد حرارتی مبدل را بهبود می‌بخشد.

5- فهرست علائم

A	مساحت ( $m^2$ )
$C_p$	ضریب گرمایی ویژه ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )
D	قطر کوئل (m)
d	قطر لوله (m)
f	ضریب اصطکاک داریسی و بسپاخ
g	شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )
h	ضریب جابجایی حرارتی ( $Wm^{-2}K^{-1}$ )
K	ضریب هدایت حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
Nu	عدد ناسلت
P	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
$q''$	شار گرمایی ( $Wm^{-2}$ )
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
T	دما (K)
u	سرعت ( $ms^{-1}$ )

علائم یونانی

$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حرارتی ( $K^{-1}$ )
$\phi$	غلظت حجمی نانوذرات
$\delta$	نسبت انحنا کوئل
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )

زیرنویس‌ها

Ave	میانگین
bf	سیال پایه
f	سیال
i	داخلی
L	طولی
nf	نانوسیال
o	خارجی
s	لوله مستقیم
w	دیواره لوله

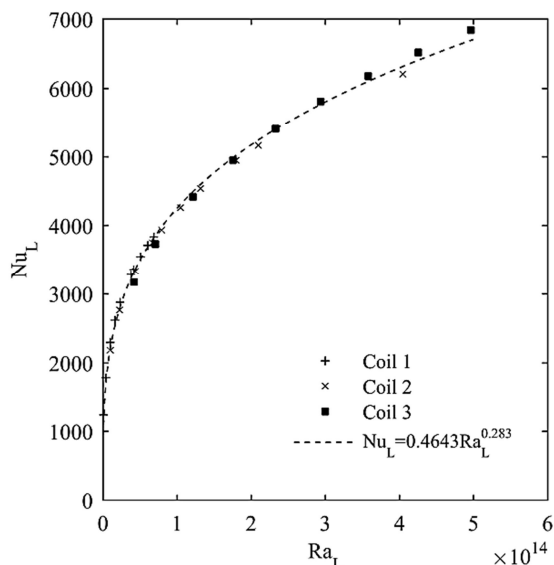


Fig. 7 Nusselt number base on length in terms of Rayleigh number

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

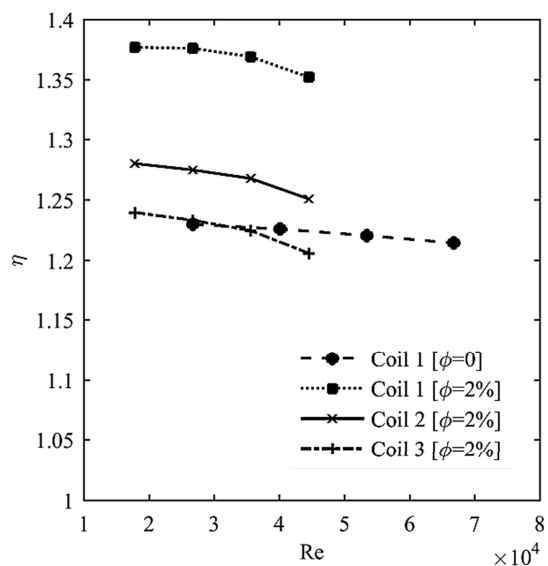


Fig. 8 Variation of thermal performance index with Reynolds

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.