

بررسی تاثیر پارامترهای ترموفیزیکی بر انتقال حرارت جریان نانوسیال غیر نیوتنی در مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ قائم

چکیده:

در مطالعه حاضر به بررسی افزایش انتقال حرارت ترکیبی نانوسیال در سیال غیر نیوتنی در مبدل حرارتی با لوله‌های مارپیچ قائم پرداخته می‌شود. نسبت‌های انحنای مختلف برای لوله‌های مارپیچ قائم و غلظت حجمی نانو ذرات با نسبت‌های ۰ تا ۲٪ در نظر گرفته شده است. همچنین شاخص توانی سیال غیر نیوتنی ۰/۸۱، ۰/۸۵ و ۰/۹۱ انتخاب و از روش عددی حجم محدود و الگوریتم سیمپل برای ارتباط بین معادلات پیوستگی و مومنتم استفاده شده است. تاثیر شاخص توانی، عدد ریچاردسون، گام در لوله مارپیچ قائم و غلظت حجمی نانو ذره اکسید آلومینیوم بر روی عدد ناسلت بر روی دیواره برای چهار کوئل با نسبت انحنای متفاوت نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که افزایش غلظت حجمی نانو ذره اکسید آلومینیوم از صفر تا ۲٪ باعث افزایش ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک می‌گردد. همچنین کاهش شاخص توانی سیال غیر نیوتنی شبه پلاستیک سبب افزایش عدد ناسلت و کاهش ضریب اصطکاک گشته و افزایش گام کوئل و غلظت حجمی نانو ذره سبب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. به طوریکه با تغییر گام بی‌بعد کوئل از ۰/۰۵ به ۰/۱، عدد ناسلت میانگین ۷٪ افزایش پیدا نمود. نیروی شناوری بر الگوی توزیع دما و سرعت جریان در لوله‌های مارپیچ تاثیر گذاشته و با افزایش آن، الگوی توزیع دما و سرعت جریان یکنواخت‌تر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: نانو سیال، سیال غیر نیوتنی، لوله مارپیچ قائم، جابه‌جایی ترکیبی، تحلیل عددی

Study of the effect of thermo-physics parameters in Nano fluid Non-Newtonian in the heat exchanger with vertical helical coils

Abstract

This study investigated mixed convection heat transfer laminar flow Non Newtonian in heat exchangers helical coils with Nanofluids. Volumetric concentration of nanoparticles are with 0 to 2% and power law indexes are 0.81, 0.85 and 0.91 in this Non-Newtonian flow. Momentum and energy equations solved based on finite volume and simple algorithm method. The effect of power law index, Richardson number, pitch in helical coils and volumetric concentration of nanoparticles are studied on Nusselt number. Results showed that the heat transfer coefficient was increased by increasing volumetric concentration of nanoparticles from 0 to 2%. Also, Nusselt number increased by decreasing power law index and friction coefficient. Heat transfer coefficient was increased by increasing pitch coil and volumetric concentration of nanoparticles, in other word, Nusselt number is increased with 7% when pitch coil is varied from 0.05 to 0.1. Buoyancy forces effected on pattern of Temperature distribution and velocity of flow in helical coils and Temperature distribution become more uniform with increasing Buoyancy forces.

Keywords: Nano fluids, Non-Newtonian, heat exchangers helical coils, mix convection, Numerical study

مبدل‌های حرارتی یکی از موثرترین ابزار انتقال حرارت در صنایع مختلف بوده و در میان انواع مختلف مبدل‌های حرارتی، مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین مبدل‌های حرارتی موجود بوده که بیشتر از مبدل‌های حرارتی دیگر در صنایع مختلف استفاده می‌شود [۱]. استفاده از لوله‌های مارپیچ به عنوان یکی از راهکارهای افزایش مبادله حرارت در این نوع مبدل‌ها بکار می‌رود. در لوله‌های مارپیچ، مولفه شعاعی سرعت توسط نیروی گریز از مرکز ایجاد شده و جریان سیال در قسمت بیرونی لوله سریعتر از قسمت درونی آن حرکت کرده و این اختلاف سرعت، جریان ثانویه‌ای 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 مومنتوم و انتقال حرارت می‌شوند، در نتیجه اندازه مبدل حرارتی کوچکتر شده و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نیز افزایش می‌یابد [۲]. یکی از روش‌های افزایش هدایت حرارتی سیال، اضافه کردن ذرات کوچک جامد به سیال است. استفاده از نانو ذرات یک روش موثر برای بهبود شاخص‌های انتقال حرارت سیال است [۳]. استفاده از سیالات غیر نیوتنی با توجه به شدت برش، ویسکوزیته سیال نیز تغییر می‌یابد [۴]. کریمی و همکاران به بهینه‌سازی هزینه کلی سالیانه در مبدل حرارتی پوسته و لوله پرداخته‌اند [۵-۷]. قنبری و همکاران [۸] به بررسی انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال غیر نیوتنی محیط متخلخل پرداخته و نشان دادند که افزایش ۲٪ وزن نانو ذرات باعث افزایش ۱۲٪ هدایت حرارتی و ۴۰٪ ضریب انتقال حرارت متوسط می‌شود. مظفری و همکاران [۹] به بررسی انتقال حرارت در یک جریان نانو سیال غیر نیوتنی بر روی یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای با پره‌های حلزونی پرداختند. طاهران و همکاران [۱۰] به بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار بر روی یک ژنراتور چرخشی با استفاده از جریان نانوسیال غیر نیوتنی پرداخته و در نانو ذرات و عدد رینولدز مختلف، رفتار جریان را بررسی نمودند. نعمتی و همکاران [۱۱] به بررسی تغییر موقعیت منبع حرارتی بر انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی درون کانال موج‌دار با دامنه و تعداد نوسان متغیر پرداخته و نشان دادند که در یک موقعیت مشخص فرارگیری دیواره گرم، با افزایش سایر پارامترها، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که دیواره گرم به ورودی کانال نزدیک‌تر است. جواهرده و همکاران [۱۲] به بررسی جابه‌جایی ترکیبی جریان نانو سیال غیر نیوتنی در یک کانال حاوی موانع پرداخته و نشان دادند که با افزایش عدد رینولدز، میزان انتقال حرارت در کانال افزایش می‌یابد. حسینی راد و همکاران [۱۳] به بررسی مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای موج‌دار با استفاده از روش تاگوچی پرداخته و با استفاده از روش آنالیز واریانس، مقدار بهینه هر یک از مشخصات هندسی و همچنین تاثیر آنها بر میزان انتقال حرارت، افت فشار هوا و نشان دادند که دامنه‌ی موج مؤثرترین مشخصه‌ی هندسی بر معیار ارزیابی عملکرد موثر است. پاکدامن و همکاران [۱۴] به بررسی عددی انتقال حرارت و افت فشار در مبدل حرارتی صفحه‌ای پرداخته و تاثیر زاویه شوری و عدد رینولدز را بر روی ضریب اصطکاک و عدد ناسلت مورد بررسی قرار گرفت. اسکندری و همکاران [۱۵] به بررسی تاثیر پارامترهای هندسی بر مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله به وسیله الگوریتم ژنتیک پرداخته و نشان دادند که جریان‌های جت ایجاد شده باعث افزایش انتقال حرارت شده و محصولات خوردگی و رسوبات شیمیایی دسته لوله‌ها را کاهش می‌دهد. کاهانی و همکاران [۱۶] به بررسی تاثیر نسبت انحنا و گام کوئل در مبدل حرارتی برای نانوسیال اکسید آلومینیوم پرداختند. یافته‌های آنها نشان می‌دهد که درصد انتقال حرارت و افت فشار با افزایش درصد حجمی نانوسیال افزایش می‌یابد. رخشا و همکاران [۱۷] با بررسی عددی و تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان درهم نانوسیال اکسید مس / آب در لوله‌های مارپیچ تحت شرایط مرزی دما ثابت روابطی برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه دادند. همچنین پاورا و همکاران [۱۹] به مطالعه تجربی بر روی سیالات غیر نیوتنی در کوئل‌های عمودی پرداخته و رابطه‌ای برای بدست آوردن ضریب اصطکاک ارائه دادند.

تا کنون مطالعاتی در زمینه انتقال حرارت و افت فشار در جابجایی ترکیبی نانوسیالات با سیال پایه غیر نیوتنی در کوئل‌های مارپیچ قائم انجام نشده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی شاخص‌های انتقال حرارت و افت فشار در نانوسیال‌های غیر نیوتنی با غلظت حجمی مختلف نانو ذرات و نسبت انحناهای مختلف کوئل تحت شرایط انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های

مارپیچ است. همچنین، استفاده از سیال غیر نیوتنی به عنوان سیال پایه و بررسی تاثیر خواص رئولوژیکی سیال غیر نیوتنی شبه پلاستیک بر انتقال حرارت و افت فشار جریان در مبدل‌های حرارتی با کویل مارپیچ قائم از دیگر موارد بررسی شده در این پژوهش می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده چهار مورد نوآوری تحقیق حاضر نسبت به تحقیقات محققین دیگر را می‌توان به صورت ذیل مورد اشاره قرار داد:

۱. بررسی جریان انتقال حرارت ترکیبی (آزاد و اجباری) در یک لوله مارپیچ قائم
۲. استفاده از سیال پایه غیر نیوتنی
۳. استفاده از نانو ذرات جامد در سیال پایه غیر نیوتنی با غلظت‌های حجمی متفاوت
۴. استفاده از لوله‌های مارپیچ متفاوت با تعداد و شکل انحنای مختلف

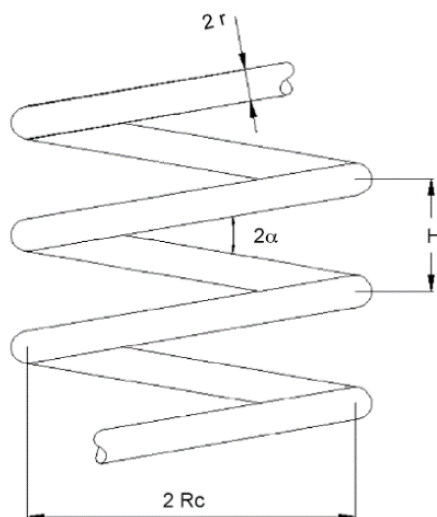
۱. معادلات حاکم

در شکل ۱ طرحی از یک کویل مارپیچ نمایش داده شده است. با توجه به شکل ۱، شماتیک مسئله کویل مارپیچ را در سه بعد نشان داده و لوله دارای قطر داخلی $2r$ و کویل دارای قطر $2Rc$ می‌باشد. فاصله بین دو مجاور گام کویل نامیده شده که با H نمایش داده می‌شود. نسبت قطر لوله به قطر کویل نسبت انحنا نامیده و با δ نشان داده می‌شود.

$$\delta = \frac{r}{Rc} \quad (1)$$

نسبت گام کویل به طول یک دور از کویل، گام بی بعد نامیده می‌شود و با λ نمایش داده می‌شود:

$$\lambda = \frac{H}{2\pi Rc} \quad (2)$$

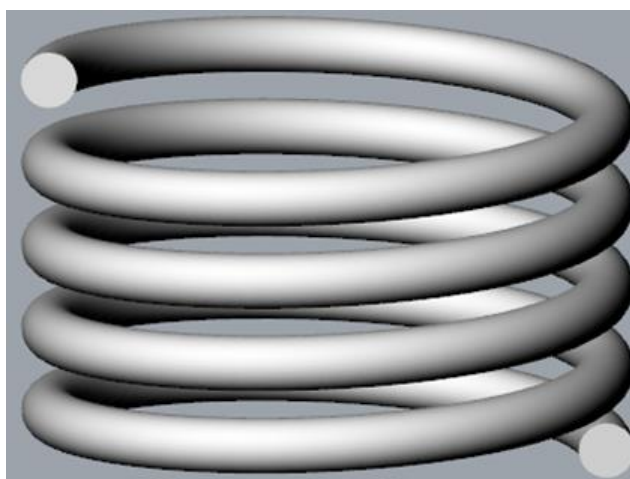


شکل ۱. شماتیک لوله مارپیچ در مبدل حرارتی

به زاویه تصویر یک دور از کویل با صفحه عمود بر محور کویل زاویه مارپیچ گفته و با θ نمایش داده می‌شود. تعداد دورهای یک کویل مارپیچ نیز با N مشخص می‌گردد. در این مطالعه از چهار نوع هندسه لوله مارپیچ با نسبت انحنای مختلف بین 0.5 تا 1.0 استفاده شده که مشخصات هندسی آن در جدول ۱ آمده است. شکل ۲ مدل ساخته شده یک کویل مارپیچ را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات هندسی کویل‌های مارپیچ مورد استفاده [۲۰]

کویل مارپیچ	δ	L (mm)	2r (mm)	2Rc (mm)	N	H (mm)
کویل ۱	۰/۱	۲۸۳۰/۵۶	۲۰	۲۰۰	۴/۵	۳۰
کویل ۲	۰/۰۸	۳۵۳۶/۸۶	۲۰	۲۵۰	۴/۵	۳۰
کویل ۳	۰/۰۶۶۶	۴۲۴۳/۲۹	۲۰	۳۰۰	۴/۵	۳۰
کویل ۴	۰/۰۵	۵۶۵۶/۴۷	۲۰	۴۰۰	۴/۵	۳۰



شکل ۲. مدل یک کویل مارپیچ (کویل ۱)

روابط (۳) تا (۶) مدل‌سازی ویژگی‌های وابسته به دمای آب از توابع چند جمله‌ای بدست آمده در پژوهش شیخ الاسلامی و همکاران [۲۱] را نشان می‌دهد.

$$\rho(T) = -5.03192e^{-8}T^4 + 7.71017e^{-5}T^3 - 0.046535T^2 + 12.2563T - 166.221 \quad (۳)$$

$$C_p(T) = 6.055427e^{-7}T^4 - 0.00080339T^3 + 0.407242T^2 - 92.96175T + 12201.77 \quad (۴)$$

$$K(T) = 6.7722e^{-11}T^4 - 9.5665e^{-8}T^3 + 4.05309e^{-5}T^2 - 0.004061T + 0.21117 \quad (۵)$$

$$\mu(T) = 3.2451e^{-11}T^4 - 4.4517e^{-8}T^3 + 2.2937e^{-5}T^2 - 5.2627e^{-3}T + 0.45563 \quad (۶)$$

برای مدل‌سازی سیال غیر نیوتنی از محلول CMC-آب با درصد جرمی ۰/۱ تا ۰/۳ به عنوان سیال پایه غیر نیوتنی با رفتار رئولوژیکی شبه پلاستیک که ویژگی آنها در جدول ۲ آمده، استفاده شده است. لذا ویسکوزیته سیال را می‌توان از مدل توانی بدست آورد. [۲۲-۲۳]:

$$\eta' = K' \gamma'^{n-1} \quad (۷)$$

جدول ۲. خواص رئولوژیکی محلول CMC-آب با درصد جرمی ۰ تا ۰/۳ درصد [۲۲]

خواص رئولوژیکی	CMC-آب (۰/۰)	CMC-آب (۰/۱)	CMC-آب (۰/۲)	CMC-آب (۰/۳)
شاخص مدل توانی (n)	۱/۰۰	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۸۱

شاخص پایداری (K')	۰/۰۰۰۸۵۵	۰/۰۰۶۳۱۹	۰/۰۱۷۵۴۰	۰/۰۳۱۳۶۰۳
-----------------------	----------	----------	----------	-----------

چگالی، ظرفیت گرمایی و ضریب هدایت حرارتی از روابط زیر بدست می‌آید [۲۵]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_{np} \quad (8)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_{np} \quad (9)$$

$$\frac{K_{nf}}{K_f} = \frac{(K_{np} + 2K_f) - 2\phi(K_f - K_{np})}{(K_{np} + 2K_f) + \phi(K_f - K_{np})} \quad (10)$$

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (11)$$

جدول ۳ خواص ترموفیزیکی نانو ذره Al_2O_3 نشان داده می‌شود.

جدول ۳. خواص ترمو-فیزیکی نانوذرات Al_2O_3 [۲۵].

قطر ذرات (nm)	ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	K (W/m K)	β (1/K)
۴۰	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	0.85×10^{-5}

عدد رینولدز در جریان سیالات غیر نیوتنی از عدد رینولدز تعمیم یافته استفاده می‌شود:

$$Re_{gen} = \frac{d^n u^{2-n} \rho}{k' 8^{n-1}} \quad (12)$$

اعداد دین و پرانتل تعمیم یافته برای سیال غیر نیوتنی از روابط زیر بدست می‌آید [۲۵]:

$$Dn' = Re_{gen} \sqrt{\delta} \quad (13)$$

$$Pr' = \frac{C_p}{K} K' \left(\frac{\delta u}{di}\right)^{n-1} \quad (14)$$

عدد رینولدز بحرانی در لوله‌های مارپیچ در مرجع [۱۸] ارائه شد که برای تعیین رژیم جریان استفاده شده است:

$$Re_{cr} = 2300 [1 + 8.6\delta^{0.45}] \quad (15)$$

عدد بی بعد M برای تعیین تغییر رژیم جریان از آرام به مغشوش معرفی می‌شود

$$M = Re_{gen}^{1-\phi(n)} / \psi(n) \delta^{\frac{\phi(n)}{2}} \quad (16)$$

در این رابطه $\phi(n)$ و $\psi(n)$ توابعی بر حسب شاخص مدل توانی سیال (n) می‌باشند. مقادیر عدد M برای سیال‌های مورد استفاده در جدول ۴ محاسبه شده است. در جریان آرام جابه‌جایی ترکیبی برای سیال نیوتنی و غیر نیوتنی در حالت پایدار سه بعدی روابط زیر

برقرار است:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (17)$$

معادله مومنوم

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) - \rho g_i \beta (T - T_0) \quad (18)$$

که در آن T_0 دما در ورودی کوپل است. معادله انرژی از رابطه (۱۹) بدست می‌آید

$$\frac{\partial(\rho C_p u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

جدول ۴. مقدار عدد M برای سیال‌های مورد استفاده [۱۸]

سیال	عدد M
آب	$\frac{Re^{0.64}}{0.26\delta^{0.18}}$
-CMC (۰/۱)	$\frac{Re_{gen}^{0.73}}{0.354\delta^{0.135}}$
آب	$\frac{Re_{gen}^{0.78}}{0.427\delta^{0.11}}$
-CMC (۰/۲)	$\frac{Re_{gen}^{0.82}}{0.511\delta^{0.09}}$
آب	

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی میانگین در یک سطح مقطع لوله

$$h_m = \frac{q_m''}{T_{w,m} - T_b} \quad (20)$$

و عدد ناسلت میانگین در یک سطح مقطع لوله

$$Nu_m = \frac{h_m d}{K_m} \quad (21)$$

و شار حرارتی در یک سطح لوله از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$\omega_m = \frac{\int_0^{2\pi} (\omega \Delta A) d\omega}{\int_0^{2\pi} (\omega A) d\omega} \quad (22)$$

در رابطه اخیر ω می‌تواند هر یک از پارامترهای K ، T و q باشد. همچنین ΔA ، مساحت المان یک حلقه موازی دیواره است که پارامترهای فوق مربوط به این ناحیه می‌باشند [۱۱]. در انتقال حرارت جابه‌جایی ترکیبی مقادیر عدد رایلی، گراشف و ریچاردسون طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T d^3}{\alpha \nu}, \quad Gr = \frac{Ra}{Pr}, \quad Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (23)$$

برای سیال غیر نیوتنی شبه پلاستیک رابطه عدد رایلی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T d^{2n+1}}{\frac{\alpha^n K'}{\rho}} \quad (23)$$

ضریب اصطکاک داری برای جریان داخلی نیز از رابطه زیر بدست می آید :

$$f = \frac{2\Delta P P d}{\rho u^2 L} \quad (23)$$

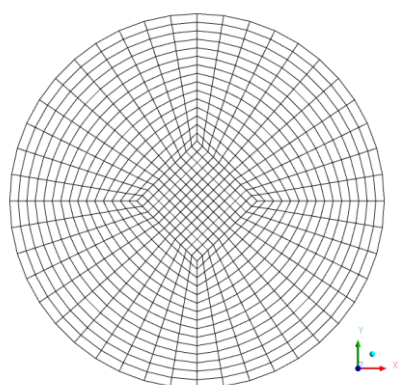
۲. حل عددی

برای شبیه سازی جریان سیال از مدل آشفتگی سه بعدی $k-\varepsilon$ Realizable استفاده شده که این مدل دو تفاوت عمده با مدل $k-\varepsilon$ استاندارد دارد. این مدل برخلاف مدل استاندارد، از مقادیر متغیر برای کمیت C_{μ} استفاده می کند. در جریان های تحت کرنش بالا، رینولدز نرمال در روابط $k-\varepsilon$ منفی شده که از نظر فیزیکی معنا ندارد. مقدار متغیر C_{μ} تابعی از نرخ کرنش محلی و چرخش جریان بوده و برای جلوگیری از مقادیر غیر فیزیکی تنش رینولدز نرمال طراحی شده است. دومین تفاوت این روش، پیش بینی جریان های چرخش، جریان های ثانویه پیچیده، لایه مرزی تحت گرادیان فشار معکوس شدید بوده که جدایش و انحنای شدید خطوط جریان را دقیقتر می کند. برای حل همزمان معادلات پیوستگی و مومنتوم از الگوریتم Simple استفاده شده است. معیار همگرایی نسبی برای پیوستگی سرعت ها 10^{-5} ، برای معادله انرژی 10^{-6} و برای k و ε ، 10^{-4} در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی تحلیل جابه جایی ترکیبی آرام در جدول ۵ آورده شده است:

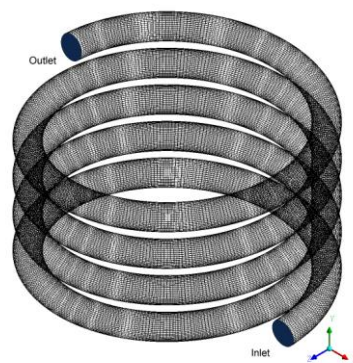
جدول ۵. شرایط مرزی تحلیل های جابه جایی ترکیبی

متغیر	ورودی	خروجی	دیواره
u	۰/۰-۰۰۱/۱ m/s	$\frac{\partial u}{\partial n} = 0$.
T	۲۹۰ K	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	۳۸۰-۲۹۰ K
P	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$.	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$

شبکه بندی کوئل ماریپیچ و سطح مقطع آن در شکل ۳ نشان داده شده است. برای اطمینان از دقت و اعتبار نتایج از چگالی شبکه بر واحد حجم استفاده شده است. مطابق شکل ۴، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک با افزایش چگالی شبکه تغییر محسوسی نکرده و همین چگالی برای محاسبات انتخاب می شود. در مدل سازی زیر لایه لزج نیز از تابع دیواره مقیاس پذیر استفاده شده است.

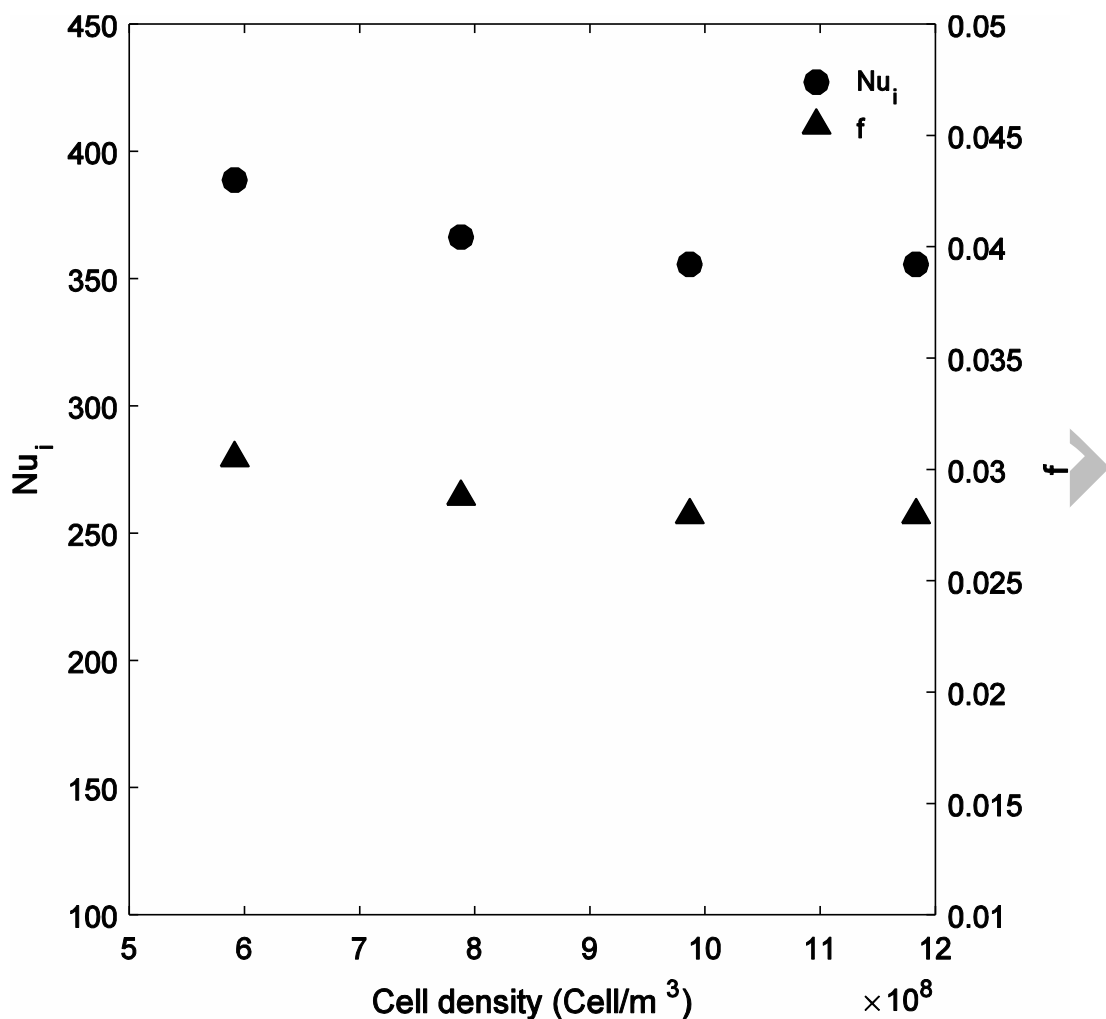


(ب)



(الف)

شکل ۳. (الف) شبکه بندی کوئل ماریپیچ (ب) شبکه بندی سطح مقطع لوله



شکل ۴. تغییرات عدد ناسلت و ضریب اصطکاک در برابر چگالی شبکه

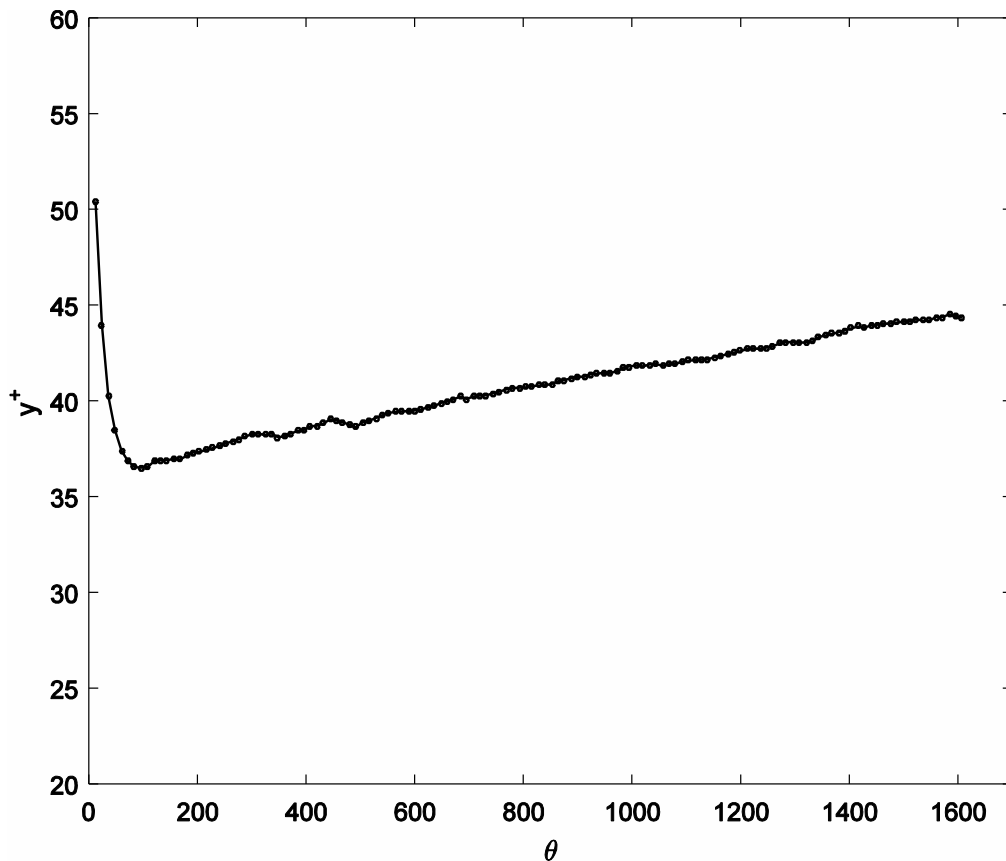
در این پژوهش، برای مدل‌سازی زیر لایه لزج، از توابع دیواره قیاس پذیر استفاده شده است. برای استفاده از این توابع می‌بایست اولین گره نزدیک دیواره خارج از زیر لایه لزج باشد ($y^+ > 11.2$). مظفری و همکاران [۹] پیشنهاد دادند که از گره با $y^+ < 30$ جلوگیری شود. برای محاسبه y^+ از روابط (۲۴) استفاده می‌شود.

$$y^+ = \frac{yu_{\tau}}{\nu} \quad (24)$$

که در آن u_{τ} سرعت اصطکاکی یا برشی بوده که از رابطه (۲۵) محاسبه می‌گردد:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (25)$$

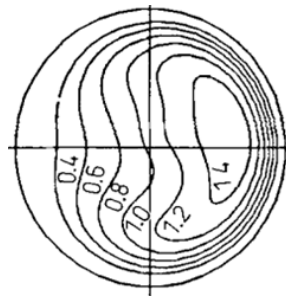
برای اطمینان از کیفیت شبکه، مقادیر y^+ در طول دیواره کوئل محاسبه شده است. نمودار ۵ مقادیر y^+ میانگین برای هر سطح مقطع در $Re=100$ آمده است. همانطور از نمودار ۵ مشاهده می‌گردد، در تمامی طول لوله $y^+ > 30$ بوده و بنابراین شبکه بندی از کیفیت لازم برخوردار است.



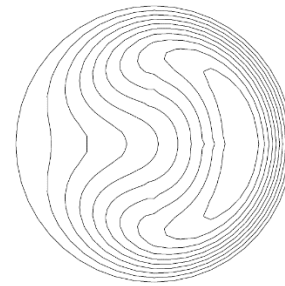
شکل ۵. مقادیر y^+ میانگین برای هر سطح مقطع در طول کویل مارپیچ (کویل ۱) برای $Re=100$

نتایج

کویل یک، برای بررسی عوامل تاثیر گذار بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در کویل‌های مارپیچ انتخاب می‌گردد. شکل ۵ مقادیر y^+ میانگین برای هر سطح مقطع در طول کویل مارپیچ (کویل ۱) برای $Re=100$ را نشان می‌دهد. نیروی گرانش در راستای عمودی (محور y) اعمال و چگالی سیال با تقریب بوزینسک در نظر گرفته شده که بصورت خطی با دما تغییر می‌کند. اثر شاخص توانی سیال‌های غیر نیوتنی مدل توانی بر انتقال حرارت، توزیع دما و جریان‌های ثانویه بررسی شد. سپس تاثیر نیروهای شناوری (عدد گراشف) بر جابجایی ترکیبی در سیال‌های غیر نیوتنی مورد مطالعه و در نهایت تاثیر گام بی‌بعد کویل مارپیچ و غلظت حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفت. معیار تشخیص جابجایی آزاد، اجباری و ترکیبی عدد ریچاردسون است. برای $Ri \gg 1$ جابجایی اجباری ناچیز و انتقال حرارت از نوع جابجایی طبیعی، برای $Ri \ll 1$ جابجایی طبیعی ناچیز و انتقال حرارت از نوع جابجایی اجباری و برای $Ri \approx 1$ انتقال حرارت ترکیبی از جابجایی اجباری و طبیعی (جابجایی ترکیبی) می‌باشد [۲۴]. برای اعتبار سنجی نتایج کار حاضر با مرجع [۱۸] به مقایسه توزیع دما برای جابه‌جایی ترکیبی سیال نیوتنی با وجود نیروی شناوری و در غیاب آن در شکل‌های ۶ و ۷ پرداخته شد. در غیاب نیروهای شناوری ($Gr=0$)، معادلات سرعت مستقل از معادله انرژی می‌تواند حل شود، بنابراین الگوی جریان مستقل از عدد پرناتل تحت تاثیر نیروهای مرکز گرا و جریان اجباری است. برای بررسی تاثیر شاخص توانی سیالات غیر نیوتنی بر انتقال حرارت در یک عدد رینولدز، پرناتل و ریچاردسون یکسان، تاثیر این شاخص بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیالات غیر نیوتنی نیز بررسی گردید. برای $Pr=10$ و $Gr=10^5$ ، توزیع دما نسبت به $Pr=1$ تغییر و دو ناحیه دما پایین در بالا و پایین دامنه جریان شکل گرفته است. تراکم خطوط دما ثابت در دیواره افزایش یافته که منجر به افزایش گرادیان دما و عدد ناسلت می‌گردد.

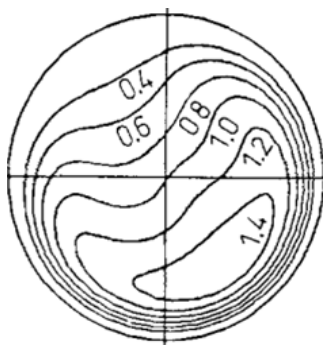


(ب)

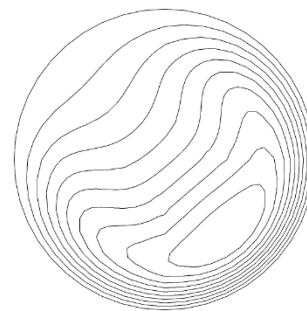


(الف)

شکل ۶ (الف) توزیع دمای کار حاضر (ب) توزیع دمای مرجع [۱۸] برای جابجایی اجباری یک سیال نیوتنی ($Pr=1$, $Gr=0$ و $Ri=0$) در کوئل ۱



(ب)

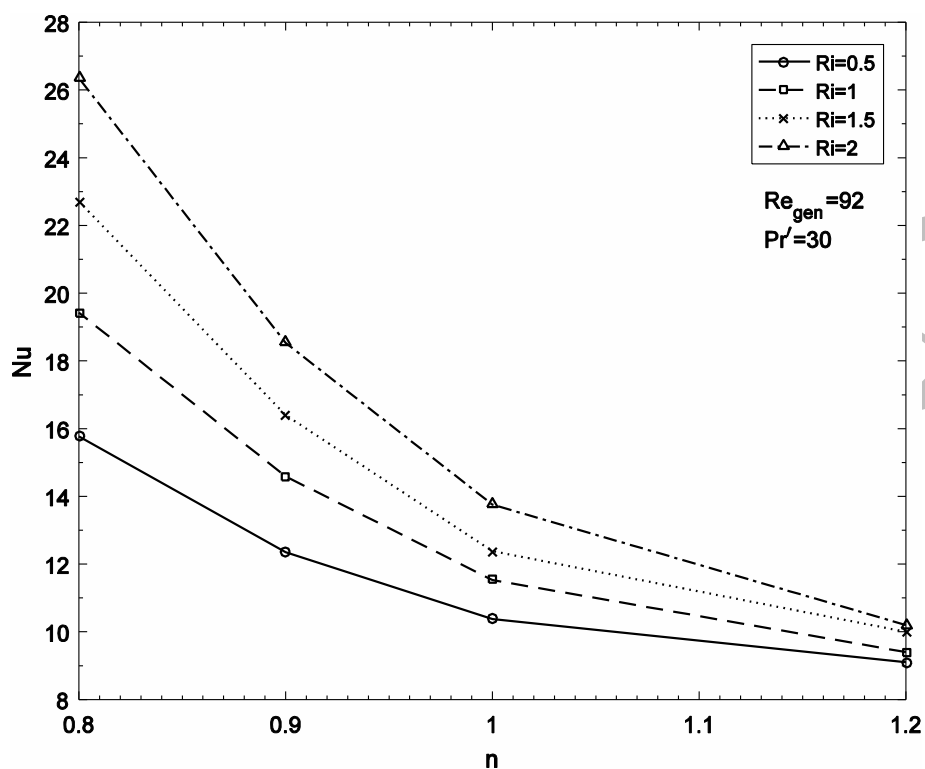


(الف)

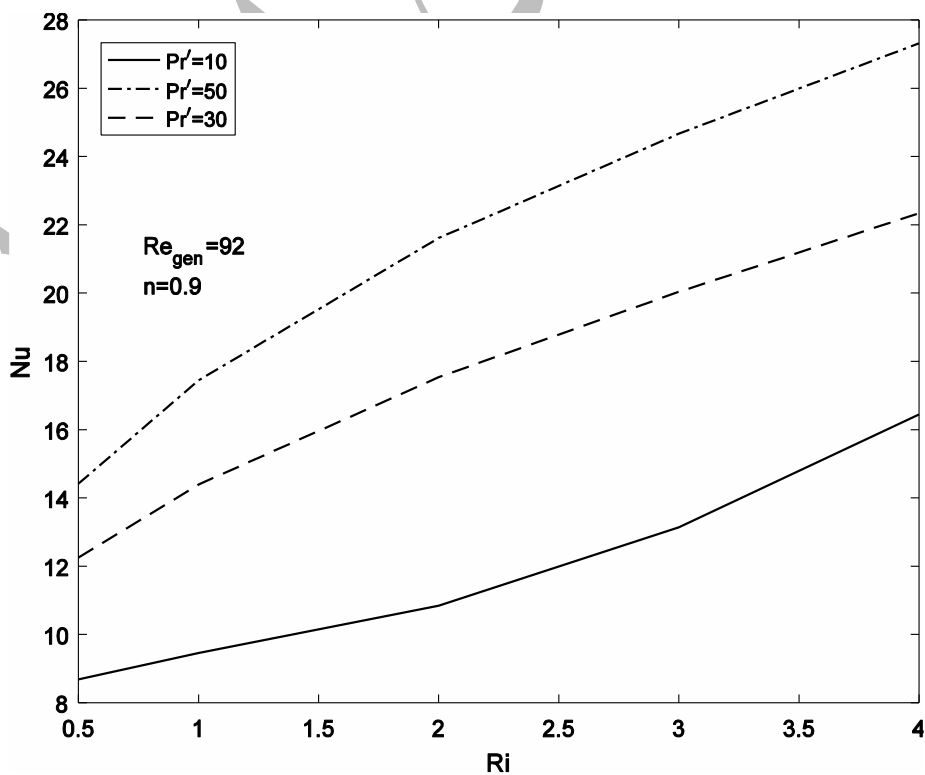
شکل ۷. (الف): توزیع دمای کار حاضر (ب) توزیع دمای مرجع [۱۸] جابجایی ترکیبی سیال نیوتنی ($Pr=1$, $Gr=10^5$ و $Ri=1$) در کوئل ۱

در شکل ۸، با افزایش شاخص توانی، ویسکوزیته ظاهری افزایش یافته و این امر منجر به کاهش تصادم بین مولکولی بین مولکولهای نزدیک به دیواره داغ و مولکولهای دورتر شده و مقاومت در مقابل حرکت در سیال بیشتر شده که این امر منجر به کاهش تبادل انرژی گرمایی و کاهش عدد ناسلت می‌شود. تغییرات عدد ناسلت در مقابل شاخص توانی در اعداد ریچاردسون مختلف برای $Re_{gen}=92$ و عدد پرانتل تعمیم یافته $Pr^*=30$ نشان داده شده است. در حضور نیروهای شناوری، در عدد ریچاردسون برابر، کاهش شاخص توانی باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده است. همچنین، شاخص پایداری با افزایش عدد ریچاردسون، سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده که برای شاخص‌های توانی کوچکتر، این افزایش انتقال حرارت بیشتر است. به طور مشخص، برای $n=1$ ، با تغییر عدد ریچاردسون از $0/5$ به 2 ، عدد ناسلت 32% افزایش یافته که این مقدار برای $n=0/8$ ، برابر 67% است. در عدد رینولدز ثابت، افزایش عدد ریچاردسون، عدد گراشف را افزایش داده که سبب افزایش نیروهای شناوری می‌شود. در شکل ۹، با افزایش عدد ریچاردسون نقش جابه‌جایی آزاد نسبت به جابه‌جایی اجباری بیشتر است. در این حالت ویسکوزیته ظاهری کمتر بوده لذا سیال مقاومت در برابر حرکت کمتری داشته و تصادم مولکولی بیشتر است. این تصادم بیشتر (به علت عدد ریچاردسون بالا) باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد. مقادیر عدد ناسلت میانگین در مقابل عدد ریچاردسون برای جابجایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک با شاخص توانی $n=0/9$ در یک کوئل مارپیچ نمایش داده شده است. همانطور که در شکل ۹ مشخص است، افزایش عدد پرانتل و عدد ریچاردسون باعث افزایش انتقال حرارت در کوئل‌های مارپیچ می‌شود. بنابراین حضور نیروهای شناوری، انتقال حرارت در کوئل‌های مارپیچ را با وجود سیال غیر نیوتنی افزایش می‌دهند. در اعداد پرانتل کوچکتر نقش ویسکوزیته ظاهری در مقابل ضرب پخش حرارتی پر رنگ است. از آنجایی که لزجت سینماتیکی متأثر از شاخص پایداری سیال غیر نیوتنی بوده اثرات آن بر اعداد ریچاردسون بزرگتر از یک (به واسطه

جابه‌جایی طبیعی موثرتر) متفاوت می‌باشد، لذا شیب منحنی عدد ناسلت در اعداد ریچاردسون بزرگتر از یک برای اعداد پرانتل تعمیم یافته بزرگتر از ده تغییر می‌یابد.



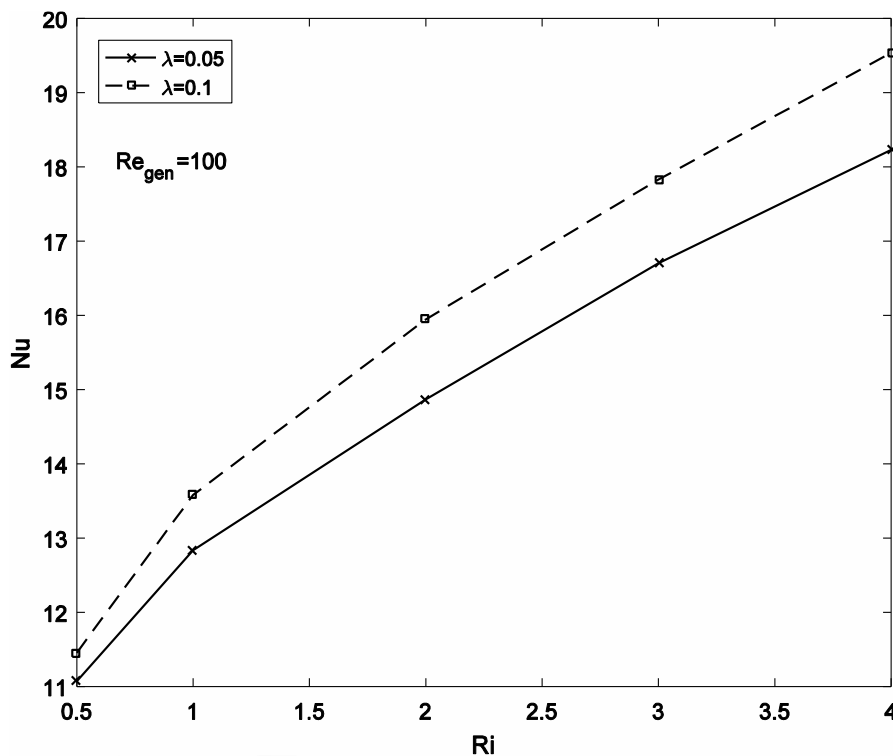
شکل ۸. تغییرات عدد ناسلت بر حسب شاخص توانی برای جابجایی ترکیبی سیالات غیرنیوتنی در کویل ۱ در اعداد ریچاردسون مختلف



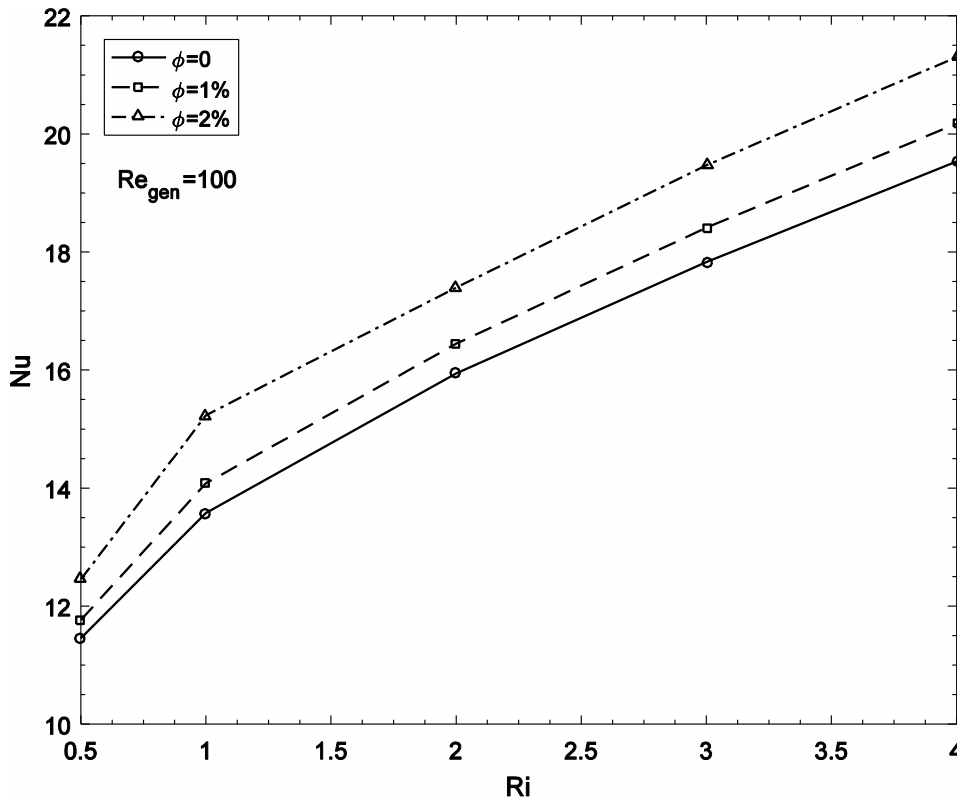
شکل ۹. تغییرات عدد ناسلت در مقابل عدد ریچاردسون برای اعداد پرانتل تعمیم یافته مختلف در جابجایی ترکیبی سیال

غیرنیوتنی در کویل ۱

در شکل ۱۰، با افزایش گام، زاویه بین لوله ها افزایش یافته که منجر به افزایش نیروی گریز از مرکز در سیال می گردد. مقدار عدد ناسلت میانگین در مقابل عدد ریچاردسون برای جریان سیال غیرنیوتنی (CMC(0.1% در دو کویل مقایسه شده است. در اعداد ریچاردسون پایینتر که نیروهای گریز از مرکز غلبه بیشتری بر نیروهای شناوری دارند، مقادیر ناسلت برای هر دو کویل تفاوت ناچیزی داشته ولی با افزایش اعداد ریچاردسون، تاثیر گام کویل بر انتقال حرارت افزایش می یابد، به طوری که در $Ri=4$ ، کویل با $\lambda=0.1$ نسبت به کویل با $\lambda=0.05$ ، ۷٪ عدد ناسلت میانگین را افزایش می دهد.



شکل ۱۰. تاثیر گام بی بعد کویل بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیال غیرنیوتنی (CMC(0.1% در اعداد ریچاردسون مختلف



شکل ۱۱. تغییرات عدد ناسلت میانگین در مقابل رینولدز برای جابجایی ترکیبی نانوسیال غیرنیوتنی CMC(0.1%)/Al₂O₃ در کویل ۱ با درصد حجمی نانوذرات ۰٪ تا ۲٪

شکل ۱۱ تاثیر افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم به سیال غیرنیوتنی CMC(0.1%) بر عدد ناسلت جابجایی ترکیبی در کویل ۱ در اعداد ریچاردسون مختلف به ازای یک عدد رینولدز ثابت را نشان می‌دهد. افزودن نانو ذرات سبب افزایش ضریب رسانش سیال پایه و نهایتاً افزایش ضریب انتقال حرارت شده، به طوریکه در $Ri=4$ برای غلظت حجمی $\phi=2\%$ ، عدد ناسلت تا ۹٪ افزایش پیدا کرده است.

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام نانوسیال غیرنیوتنی بصورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. سیال غیرنیوتنی شبه پلاستیک مورد بررسی محلول CMC/آب با درصد جرمی ۰/۱ تا ۰/۳ درصد به عنوان سیال‌های پایه و نانوذره Al₂O₃ با غلظت حجمی ۰/۲-۰/۱-۰/۰۵٪ به سیال‌های پایه برای چهار کویل با نسبت انحنای متفاوت ($\delta=0.05-0.1$) می‌باشد. تاثیرات شاخص توانی سیال غیرنیوتنی، اثر غلظت حجمی نانو ذرات، نسبت انحنای کویل بر انتقال حرارت و افت فشار در جریان آرام نانوسیال غیرنیوتنی بررسی و روابطی برای پیش بینی عدد ناسلت و ضریب اصطکاک ارائه گردید. در بررسی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی جریان آرام، با انتخاب یک کویل با نسبت انحنای ۰/۱، تاثیر شاخص توانی سیال‌های غیر نیوتنی بر عدد ناسلت در عدد رینولدز و ریچاردسون مشخص، بررسی گردید. اثر پارامترهای گام بی بعد کویل و درصد حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر عدد ناسلت میانگین جریان نانوسیال غیرنیوتنی به سیال پایه CMC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی حاصل از تحلیل‌های جریان جابجایی ترکیبی آرام نانوسیال غیرنیوتنی عبارتست از:

۱. در جابجایی ترکیبی در کویل‌های مارپیچ، شدت و الگوی جریان‌های ثانویه علاوه بر نیروی مرکزگرا، تحت تاثیر نیروهای شناوری نیز قرار می‌گیرد. این امر موجب افزایش نرخ انتقال گرما در کویل‌های مارپیچ نسبت به کویل‌های مستقیم می‌گردد.

۲. در جابه‌جایی ترکیبی علاوه بر نیروهای جابه‌جایی، نیروهای شناوری به طور موثر بر الگوی توزیع دمای سرعت جریان در کویل‌های مارپیچ تاثیر گذاشته و با افزایش نیروهای شناوری، توزیع دما و سرعت جریان به شکل یکنواخت در آمده و نرخ انتقال گرما را به طور پیوسته افزایش می‌دهد. با افزایش عدد ریچاردسون نقش جابه‌جایی آزاد نسبت به جابه‌جایی اجباری بیشتر است. در این حالت ویسکوزیته ظاهری کمتر بوده لذا سیال مقاومت در برابر حرکت کمتری داشته و تصادم مولکولی بیشتر است. این تصادم بیشتر (به علت عدد ریچاردسون بالا) باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد.
۳. شاخص توانی سیال غیر نیوتنی تاثیر بسزایی در میزان ضریب انتقال حرارت جریان دارد. در یک عدد رینولدز و ریچاردسون یکسان، کاهش شاخص توانی باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد. با افزایش شاخص توانی، ویسکوزیته ظاهری افزایش یافته و این امر منجر به کاهش تصادم بین مولکولی بین مولکولهای نزدیک به دیواره داغ و مولکولهای دورتر شده و مقاومت در مقابل حرکت در سیال بیشتر شده که این امر منجر به کاهش تبادل انرژی گرمایی و کاهش عدد ناسلت می‌شود. همچنین با تغییر شاخص توانی سیال غیر نیوتنی، الگوی توزیع دما، سرعت و جریان ثانویه تغییر می‌کند. به طوریکه در جریان نانو سیال غیر نیوتنی با شاخص توانی کوچکتر، جریان‌های ثانویه ناشی از نیروهای مرکز گرا از بین رفته و خطوط دما ثابت نزدیک دیواره متراکم شده و گرادیان دمای بالاتری را ایجاد و در نتیجه نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد.
۴. با توجه به نتایج مستخرج از حل عددی مشاهده می‌شود که با افزایش نیروهای شناوری و عدد پرانتل در جابه‌جایی ترکیبی، ضریب انتقال حرارت به طور محسوس افزایش می‌یابد و این امر به این دلیل است که ذرات جامد می‌توانند در جابه‌جایی ترکیبی نقش موثرتری در انتقال گرما داشته باشند.
۵. افزایش گام بی‌بعد کویل و غلظت حجمی نانو ذرات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت شده به طوریکه با تغییر گام بی‌بعد کویل از ۰/۰۵ به ۰/۱، عدد ناسلت میانگین به علت تغییرات عدد دین جریان با افزایش گام بی‌بعد کویل ۷٪ افزایش پیدا می‌کند. در واقع نیروی گریز از مرکز سیال در کویل با گام های بزرگتر بیشتر شده که خود باعث تلاطم بیشتر جریان و در نتیجه نرخ انتقال گرمای بیشتر می‌شود.

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J / Kg .K$)
d	قطر لوله (m)
D	قطر کویل (m)
D_h	قطر (m)
f	ضریب اصطکاک
g	شتاب گرانش ($\frac{m}{s^2}$)
H	گام کویل مارپیچ (m)
h	ضریب انتقال حرارت ($W / m^2 K$)
K	رسانندگی گرمایی ($W / m .K$)
k	انرژی جنبشی آشفته ($\frac{m^2}{s^2}$)

K'	شاخص پایداری پورلا $(\frac{kg}{s^{2-n}m})$
L	طول کویل (m)
M	عدد بی بعد
N	تعداد دور
n	شاخص رفتار پورلا
P	فشار (Pa)
q''	شار حرارتی (W / m^2)
r	شعاع لوله (m)
R	شعاع کویل (m)
T	دما (K)
u	سرعت $(\frac{m}{s})$
y^+	فاصله بی بعد از دیوار $(\frac{yu_{\tau}}{\nu})$
	اعداد بی بعد
Dn	عدد دین $(Re \delta^{0.5})$
Dn'	عدد دین تغییر یافته $(Re_{gen} \delta^{0.5})$
Gr	عدد گرافش $(\frac{Re}{Pr})$
Nu	عدد ناسلت (hd / K)
Pr	عدد پرائتل $\frac{Cp \mu}{K}$
Pr'	عدد پرائتل تغییر یافته $\frac{CpK' (\frac{8u}{d})^{n-1}}{K}$
Ra	عدد رایلی $\frac{g \beta \Delta T d^3}{\alpha \nu}$
Re	عدد رینولدز $(\frac{\rho u d}{\mu})$
Ri	عدد ریچاردسون $\frac{Gr}{Re}$
	علائم یونانی
γ	نرخ کرنش $1/s$
μ	ویسکوزیته دینامیکی $\frac{Ns}{m^2}$
ε	نرخ اتلاف آشفتگی $\frac{m^2}{s^3}$
β	ضریب انبساط حرارتی $\frac{1}{K}$
ρ	چگالی $\frac{Kg}{m^3}$

τ	تنش برشی Pa
ν	ویسکوزیته سینماتیکی $\frac{m^2}{s}$
α	ضریب نفوذ حرارتی $\frac{m^2}{s}$
λ	گام بی بعد کوئل $\frac{H}{2\pi Rc}$
δ	نسبت انحنای کوئل $\frac{r}{Rc}$
η	شاخص عملکرد ترمو-هیدرودینامیکی
θ	زاویه محوری کوئل نسبت به ورودی
ϕ	غلظت حجمی نانوذرات (%)
	زیرنویس ها
b	بالک
c	کوئل
cr	بحرانی
f	سیال
gen	تعمیم یافته
m	میانگین
nf	نانو سیال
np	نانو ذره
t	آشفته
w	روی دیوار
i,j,k	اندیس محورهای مختصات فضایی
	مراجع

- [1]. Selbas R, Kızıllkan O, Reppich M. "A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view" *Chemical Engineering Process*, 45, pp. 268–275, (2006).
- [2]. Huminic, G., Huminic, A., "Heat transfer characteristics in double tube helical heat exchangers using nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 4280-4287, (2011).
- [3]. Javaherdeh, K., karimi, H. (2023), " Numerical analysis of the obstacle effect with different geometry on the heat transfer of nanofluid flow in a rectangular channel" *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 35(3), pp. 51-64.
- [4]. Naghian, M. and Hosseini, Kh. "Using Collocation Discrete Least Squares Meshless method in solving governing equations for non-Newtonian fluids by Herschel- Bulkley model" *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol.11 (2), pp.247-259. (2021)
- [5]. Karimi, H., Danesh Ashtiani, H.A. and Aghanajafi, C. "Study of mixed materials heat exchanger using optimization techniques", *Journal of Engineering, Design and Technology*,17(2), pp.414-433, (2019).

- [6]. Karimi H., Ahmadi-Danesh H, Aghanajafi C. "Applying multiple decomposition methods and optimization techniques for achieving optimal cost in mixed materials heat exchanger networks" *International Journal of Energy Research*, 43, pp. 3711–3722, (2019).
- [7]. H. Karimi, H.A. Danesh Ashtiani, C. Aghanajafi "Optimization of the total annual cost in a shell and tube heat exchanger by Ant colony optimization technique" *Iranian journal of Marine technology*, 6(3) pp. 113-121, (2019).
- [8]. Ghanbari, S., Javaherdeh, K. "Thermal performance enhancement in perforated baffled annuli by Nano porous graphene non-Newtonian Nano fluid" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 167, 114719, (2020).
- [9]. Mozafarie, S., Javaherdeh, K. "Numerical design and heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flow for annulus with helical fins" *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 22(4), pp. 1107-1115, (2019).
- [10]. Taheran, E., Javaherdeh, K. "Experimental investigation on the effect of inlet swirl generator on heat transfer and pressure drop of non-Newtonian nanofluid" *Applied Thermal Engineering*, Vol. 147, pp.551-561, (2019).
- [11]. Nemati, M. and Sefid, M. and Rahmati, A.R. "The effect of changing the position of the hot wall and increasing the amplitude and number of oscillations of wavy wall on the flow and heat transfer of nanofluid inside the channel in the presence of magnetic field" *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol.10(2), pp.219-236, (2020).
- [12]. Javaherdeh, K., karimi, H. " Numerical analysis of mix convection of sodium alginate non-Newtonian fluid with Al₂O₃ nanoparticle in a channel with block" *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, vol. 32(1), pp. 93-110, (2023). (In Persian)
- [13]. Hosseinirad, E. and Bidarian, V. and Hormozi, F. and Khoshvaght-Aliabadi, M. "Modelling and Optimization of Geometrical Parameters in Design of the Wavy-Fin-Plate Compact Heat Exchanger by Taguchi method" *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol.12, pp.89-101, (2022).
- [14]. Pakdaman, H., Alizadeh, M., and Kalantar, V. "Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in a plate heat exchanger with Chevron plates" *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 25(1), pp. 47-60. (2014). (In Persian)
- [15]. H. Eskandari, I., Hashemi "Numerical comparison of shell side thermo-hydraulic characteristics of shell and tube heat exchangers with trefoil and segmental baffle by genetic algorithm" *Journal Of Applied and Computational Sciences in Mechanics*, Vol. 35(2), pp. 55-76, (2023). (In Persian).
- [16]. Kahani, M., Heris, S. Z., Mousavi, S., "Effects of curvature ratio and coil pitch spacing on heat transfer performance of Al₂O₃/water nanofluid laminar flow through helical coils," *Journal of Dispersion Science and Technology*, vol. 34, pp. 1704-1712. (2013).
- [17]. Rakhsha, M., Akbaridoust, F., Abbassi, A., Majid, S.-A., "Experimental and numerical investigations of turbulent forced convection flow of nano-fluid in helical coiled tubes at constant surface temperature," *Powder Technology*, vol. 283, pp. 178-189, (2015).
- [18]. Yang, G., Ebadian, M., "Mixed convective flow and heat transfer in a vertical helicoidal pipe with finite pitch," *Computational mechanics*, vol. 14, pp. 503-512, (1994).
- [19]. Pawar, S., Sunnapwar, V. K., "Experimental and CFD investigation of convective heat transfer in helically coiled tube heat exchanger," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 92, pp. 2294-2312. (2014).

- [20]. Pawar, S., Sunnapwar, V. K., "Experimental studies on heat transfer to Newtonian and non-Newtonian fluids in helical coils with laminar and turbulent flow," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 44, pp. 792-804, (2013).
- [21]. Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., Ganji, D., "Experimental study on turbulent flow and heat transfer in an air to water heat exchanger using perforated circular-ring," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 70, pp. 185-195, (2016).
- [22]. Lin, Y., Zheng, L., Zhang, X., "Radiation effects on Marangoni convection flow and heat transfer in pseudo-plastic non-Newtonian nanofluids with variable thermal conductivity," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 77, pp. 708-716, (2014).
- [23]. Tian, J., He, Z., Xu, T., Fang, X., Zhang, Z., "Rheological Property and Thermal Conductivity of Multi-walled Carbon Nano-tubes-dispersed Non-Newtonian Nano-fluids Based on an Aqueous Solution of Carboxymethyl Cellulose," *Experimental Heat Transfer*, vol. 29, pp. 378-391, (2016).
- [24]. Matin, M. H., Khan, W. A., "Laminar natural convection of non-Newtonian power-law fluids between concentric circular cylinders," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 43, pp. 112-121, (2013).
- [25]. Javaherdeh, K., Karimi, H., Khojasteh, A. "Numerical study of heat transfer enhancement of non-Newtonian nanofluid in porous blocks in a channel partially" *Powder Technology*, Vol.383, pp.270-279, (2021).