



بررسی اثرات قطر و کسر حجمی نانوذرات بر جریان و انتقال حرارت نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب در یک مبدل حرارتی با نوارهای زاویه‌دار

میثم پویانیان^۱، اشکان غفوری^{۲*}

۱. کارشناسی ارشد مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.
۲. هسته پژوهشی محاسبات پیشرفته، گروه مهندسی مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول: a.ghafouri@iauahvaz.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۳/۴

چکیده

در این پژوهش، اثر قطر و کسر حجمی نانوسیال بر ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت با استفاده از نوارهای زاویه‌دار در یک مبدل حرارتی با مقطع دایره‌ای، به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود حل شده است. دیواره لوله با شرایط مرزی شار حرارتی یکنواخت حرارت داده می‌شود. در این مطالعه، از چیدمان رو به جلو جهت قراردادن نوار زاویه‌دار به صورت ۴ پره و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ استفاده شده است. اثرات زاویه شیب ۱۰ درجه و گام نوار زاویه‌دار ۵۰ میلی‌متر برای نانوذره اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی مختلف از ۱ تا ۴ درصد و قطرهای مختلف نانوذره از ۲۰ تا ۵۰ نانومتر که در یک سیال پایه (آب) مخلوط شده‌اند، استفاده شده است. مقایسه نتایج تحلیل عددی با روابط موجود، همگرایی خوبی را نشان می‌دهد. نتایج حل عددی نشان می‌دهد، عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد با کاهش اندازه نانوذرات از ۳۰ تا ۲۰ نانومتر به ترتیب در حدود ۸٪ و ۱۶٪ افزایش می‌یابند. ضمن اینکه با کاهش قطرهای نانوذرات بر ضریب اصطکاک تاثیر چندانی نمی‌گذارد. میزان افزایش عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد با افزایش کسر حجمی نانوذرات به ترتیب در حدود ۱۸٪ و ۱۵٪ بوده است. افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییر ناچیزی بر ضریب اصطکاک داشته است. آب کمترین عدد ناسلت را دارد. همچنین نانوسیال نسبت به سیال پایه، دمای دیواره لوله را بیشتر کاهش داده است که این خود بیانگر مزیت استفاده از نانوسیالات در بهبود افزایش عملکرد حرارتی سیستم است.

کلمات کلیدی: نوار زاویه‌دار، نانوسیال، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک، ضریب هدایت حرارتی

مقدمه

مبحث انرژی به عنوان یکی از مهم‌ترین مباحث در جامعه بشری در پنجاه سال اخیر مطرح می‌باشد. بیش از هفتاد درصد تمام گونه‌های انرژی که امروزه مصرف می‌شود به فرم انرژی‌های حرارتی هستند. در بسیاری از سیستم‌های صنعتی برای انتقال انرژی در سیستم باید فرآیند انتقال حرارت انجام شود. با توجه به رشد سریع نیاز به انرژی در سرتاسر جهان، بهبود فرآیند انتقال حرارت از وظایف بسیار مهم مهندسان در این زمینه است. یکی از مباحث مطرح در این زمینه، بحث مبدل‌های حرارتی می‌باشد. همچنین توجه به صرفه‌جویی در مصرف مواد، فضا، انرژی و اقتصاد جهانی، منجر به گسترش تلاش‌هایی برای تولید تجهیزات مبدل‌های حرارتی پربازده‌تر در جهت کاهش هزینه‌ها شده است. نتیجه این تلاش‌ها کاهش ابعاد فیزیکی این تجهیزات برای یک ظرفیت حرارتی مشخص می‌باشد. بنابراین اصلی‌ترین اهداف هیدرولیکی-حرارتی، کاهش ابعاد یک مبدل حرارتی مورد نیاز برای یک ظرفیت حرارتی مشخص، افزایش ظرفیت و عملکرد یک مبدل حرارتی موجود با اختلاف دمای کوچکتر یا کاهش قدرت پمپ می‌باشد [۱]. طی چند سال اخیر، بهبود انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و دانشمندان قرار گرفته است.

نانوسیالات را می‌توان جایگزین مناسبی برای سیالات معمولی (آب خالص، اتیلن گلیکول و روغن و ...) به دلیل قابلیت بالای انتقال حرارت، به‌شمار آورد. در سال‌های اخیر، نتایج چندین پژوهش به این نتیجه دست یافته‌اند که استفاده از نانوسیالات، ضریب هدایت حرارتی سیال را افزایش می‌دهد که به موجب آن باعث افزایش عملکرد انتقال حرارت می‌گردد. برای اولین بار مفهوم نانوسیال توسط چوی [۲] ارائه گردید. نانوسیالات آینده امیدوار کننده‌ای از خود نشان می‌دهند، و دلیل آن این است که



رسانندگی حرارتی را بهبود می‌بخشند و پایداری بهتری (حتی برای بخش کوچکی از نانوذرات معلق) دارند. مزایای استفاده از نانوسیالات را می‌توان به رسانایی حرارتی بالاتر از آنچه در مدل‌های ماکروسکوپی پیش‌بینی شده است، پایداری عالی و توان پمپاژ به دلیل افت فشار و سایش دیواره لوله عنوان نمود. محققان انواع مختلفی از نانوذرات از قبیل ذرات فلزی (رسانا) همچون مس، آلومینیوم، آهن، طلا، نقره و ذرات غیرفلزی از جمله اکسید آلومینیوم، سیلیسیوم، کربید، دی‌اکسید تیتانیوم، اکسید آهن، اکسید مس و نانولوله‌های کربنی را مورد مطالعه تجربی قرار دادند [۳ و ۴]. هدایت حرارتی نانوسیالات با توجه به اندازه، شکل و جنس نانوذرات که در سیالات پایه پراکنده شده‌اند، متفاوت است. نتایج مطالعات پیشین نشان داد که نانوسیالات دارای خواص حرارتی بالاتر همچون رسانایی گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی در مقایسه با سیال پایه می‌باشد [۵].

در سال‌های اخیر، بسیاری از پژوهشگران مطالعاتی را به صورت تجربی و عددی بر روی بهبود انتقال حرارتی بر عملکرد مبدل حرارتی را با استفاده از نوارهای زاویه‌دار انجام داده‌اند. فن و همکاران [۶] به صورت عددی مشخصات حرارتی-هیدرولیکی جریان آشفته هوا را در یک لوله با مقطع دایره‌ای مجهز به درج‌های (پره) مخروطی شکل مورد مطالعه قرار دادند. مشاهده گردید که عدد ناسلت و حداکثر ضریب اصطکاک با استفاده از نوار مخروطی شکل به ترتیب ۵ و ۱۰ برابر در مقایسه با لوله صاف افزایش یافته است. کبیت و همکاران [۷] اثرات جریان آرام نانوسیال بر روی گام رو به جلو و عقب بر روی مشخصات انتقال حرارت مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد استفاده از گام رو به جلو نسبت به گام رو به عقب دارای حداکثر عدد ناسلت و ضریب اصطکاک می‌باشد. مرشد و همکاران [۸] مطالعه بر روی انتقال حرارت هدایتی و جابجایی اجباری در چند نوع نانوسیال مختلف را انجام دادند. نتایج نشان دادند که استفاده از این نانوسیال‌ها در مقایسه با سیالات پایه دارای انتقال حرارت رسانش و جابجایی بالاتری می‌باشند. مشایخی و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب/اکسید آلومینیوم در یک کانال با سطح مقطع بیضی از دو ردیف نوار زاویه‌دار مارپیچی مخروطی شکل با جریان غیرهمسو نسبت به یکدیگر و با سه ترکیب متفاوت از نوارها، با استفاده از مدل مخلوط دو فازی مورد تجزیه و تحلیل عددی قرار دادند. همچنین اثر عدد رینولدز بر روی ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت از محدوده ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ با کسر حجمی نانوسیال از ۱ تا ۳ درصد و نوار زاویه‌دار مخروطی شکل بررسی نمودند. نتایج نشان داد که در میان ترکیب زاویه‌دار مارپیچی مخروطی شکل به صورت محلی در حدود ۱۷ درصد بیشتر از لوله ساده، بالاترین مقادیر ضریب انتقال حرارت را ارائه داد. علاوه بر این، مشخص شد در مقادیر بالاتر عدد رینولدز، تأثیر افزایش کسر حجمی نانوسیال بر عملکرد حرارتی کانال قابل توجه است. با این حال، اختلاف افت فشار بین سه مدل ناچیز است. هو و همکاران [۱۰] مطالعه به صورت تجربی بر روی عملکرد خنک‌سازی جریان نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب در یک لوله مس تحت شار حرارت یکنواخت انجام داده‌اند.

در این مقاله، تأثیر پارامترهای همچون کسر حجمی، درجه حرارت و غیره بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت، دما در دیواره داخلی لوله، دمای بالک سیالات و بهبود انتقال حرارت مورد بررسی و مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که برای مقدار ثابت کسر حجمی نانوذرات، با افزایش دمای ورودی سیال باعث افزایش میزان انتقال حرارت و دستیابی به کارایی بالاتر شده است. علاوه بر این، افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش نسبت کارایی انتقال حرارت می‌شود. در حالی که حداکثر نسبت کارایی انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال حاصل گردید.

معادلات حاکم

در این پژوهش، جریان در مدل‌سازی نانو سیال به صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم برای جریان سه بعدی، معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی با استفاده از روش حجم محدود، می‌باشد. معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان سیال به ترتیب به صورت زیر آورده شده است [۱۱].

معادله پیوستگی:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad \rho = \text{cte} \quad (1)$$

معادله مومنتوم:



$$\rho U \cdot \nabla U = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{\text{diff}} \nabla U) \quad (2)$$

که در آن $\mu_{\text{diff}} = \mu + \mu_1$

معادله بقای انرژی:

$$\rho c_p U \cdot \nabla T = \nabla \cdot (\lambda_{\text{eff}} \nabla T) \quad (3)$$

که در آن $\lambda_{\text{eff}} = \lambda + \lambda_t$ و $\lambda_t = c_p \mu_t I \sigma_T$

انرژی جنبشی آشفتگی k

$$\rho \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (4)$$

پراکنش آشفتگی ε

$$\rho \frac{\partial (\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu + \frac{\mu_1}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

که در آن μ_t ویسکوزیته آشفتگی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

در روابط (۱) تا (۶)، ρ ، U ، T ، P ، μ_{eff} ، λ_{eff} ، ε ، k ، به ترتیب چگالی، سرعت، دما، فشار، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته موثر، هدایت حرارتی موثر، پراکنش آشفتگی و نیروی جنبشی آشفتگی موثر هستند. در مدل آشفتگی، C_1 ، C_2 ، σ_k ، σ_ε و C_μ مقادیر ثابت هستند، $C_1=1/44$ ، $C_2=1/92$ ، $\sigma_k=1/0$ ، $\sigma_\varepsilon=1/3$ و $C_\mu=0/09$.

روابط حاکم بر خواص آب (سیال پایه)

جهت بدست آوردن خواص ترموفیزیکی سیال پایه (آب خالص) شامل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته از روابط (۷) تا (۱۰) استفاده می‌شود [۱۲]:

چگالی آب

$$\rho = 1000 \times \left[1 - \frac{(T_w - 4)^2}{119000 \times 1365 \times T_w - 4 \times (T_w)^2} \right] \quad (7)$$

ظرفیت گرمایی ویژه آب

$$c_w = 4217.629 - 3.20888 \times T_w + 0.09503 \times (T_w)^2 - 0.00132 \times (T_w)^3 + 9.415e-6 \times (T_w)^4 - 2.5479e-8 \times (T_w)^5 \quad (8)$$

ضریب هدایت گرمایی آب

$$k_w = 0.56112 + 0.00193 \times T_w - 2.60152749e-6 \times (T_w)^2 - 6.08803e-8 \times (T_w)^3 \quad (9)$$

لزجت سیال آب

$$\mu = 0.00169 - 4.25263e-5 \times T_w + 4.9255e-7 \times (T_w)^2 - 2.09935e-9 \times (T_w)^3 \quad (10)$$

روابط حاکم بر خواص نانوسیال

در این پژوهش، برای بدست آوردن خواص ترموفیزیکی نانوسیال از قبیل چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب هدایت گرمایی نانوسیال و لزجت از روابط (۱۱) تا (۱۴) محاسبه شده است [۱۲ و ۱۳]:



چگالی نانوسیال

$$\rho_{nf} = \phi\rho_p + (1 - \phi)\rho_w \quad (11)$$

ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیال

$$c_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c)_w + \phi(\rho c)_p}{(1 - \phi)\rho_w + \phi\rho_p} \quad (12)$$

ضریب هدایت گرمایی نانوسیال

$$k_{nf} = k_w 0.8938 \left[1 + \frac{\phi}{100}\right]^{1.37} \left[1 + \frac{T_{nf}}{70}\right]^{0.2777} \left[1 + \frac{d_p}{150}\right]^{-0.0336} \left[\frac{\alpha_p}{\alpha_w}\right]^{0.01737} \quad (13)$$

معادله لزجت سیال

$$\mu_{nf} = \mu_w \left[1 + \frac{\phi}{100}\right]^{11.3} \left[1 + \frac{T_{nf}}{70}\right]^{-0.038} \left[1 + \frac{d_p}{170}\right]^{-0.061} \quad (14)$$

خواص ترموفیزیکی آب و نانوذره اکسید آلومینیوم در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱: خواص ترموفیزیکی آب و نانوذره اکسید آلومینیوم در $T = 300 \text{ K}$ [۱۴]

نوع ماده	چگالی (kg/m^3)	ضریب گرمای ویژه ($\frac{\text{J}}{\text{kg.K}}$)	لزجت (pa.s)	ضریب هدایت ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2.\text{K}}$)
آب	۹۸۸/۲	۴۱۸۲	۰/۰۰۱	۰/۶
Al_2O_3	۳۶۰۰	۷۶۵	--	۳۶

اعتبار سنجی

جهت بررسی اعتبار نتایج بدست آمده، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل شده از پژوهش حال حاضر با نتایج بدست آمده از دیواره لوله صاف در حالت آشفته که از رابطه گلینسکی (۱۵) برای عدد ناسلت و از رابطه فلیننکو (۱۶) برای ضریب اصطکاک صورت گرفته است [۱۱].

$$Nu_{av} = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(Pr\left(\frac{2}{3}\right) - 1\right)} \quad \begin{cases} 0.5 \leq Pr \leq 2000 \\ 3000 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \end{cases} \quad (15)$$

$$f = [1.82 \ln(Re) - 1.64]^{-2} \quad 10^4 \leq Re \leq 5 \times 10^6 \quad (16)$$

معیار ارزیابی عملکرد

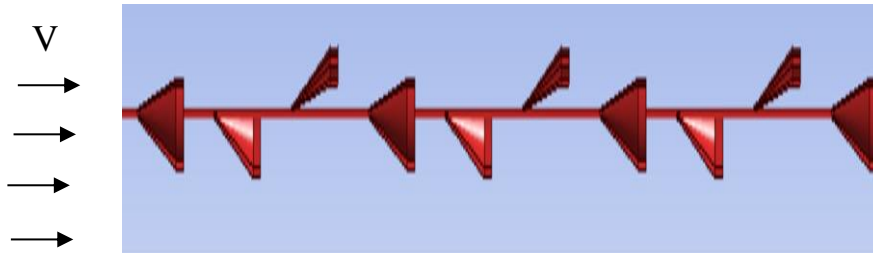
از مفهوم معیار ارزیابی عملکرد که در بردارنده همزمان اثر ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک با توجه به اثر دوگانه میدان بر رفتار ترموهیدرولیکی سیستم است، استفاده گردیده است. معیار ارزیابی عملکرد در رابطه (۱۷) آورده شده است و اندیس S بیانگر حالت بدون اثر آشوبگر و کسر حجمی نانوسیال است [۱۵ و ۱۶].

$$PEC = \frac{(Nu/Nu_s)}{\left(\frac{f}{f_s}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (17)$$



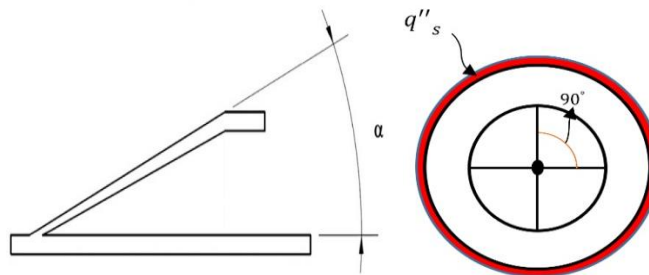
هندسه و شرایط مرزی

هندسه یک مبدل حرارتی با آرایش مختلف نوارهای زاویه‌دار رو به جلو روی میله مرکزی، که در شکل (۱) نشان داده شده، مدل‌سازی و شبکه بندی گردیده است. دیواره لوله (ناحیه تست) از صفحات آلومینیوم با ارتفاع ۱۹/۶ میلی‌متر و طول ۵۰۰ میلی‌متر طراحی شده است. همچنین در ابتدای لوله جهت ایجاد جریان کاملاً توسعه‌یافته، لوله با سطح جانبی عایق به طول ۵۰۰ میلی‌متر اضافه شده است. دیواره لوله توسط صفحات گرمکن با شار حرارتی ۲۰۰۰۰۰ وات/متر مربع تحت شرایط شار حرارتی ثابت، قرار گرفته است.

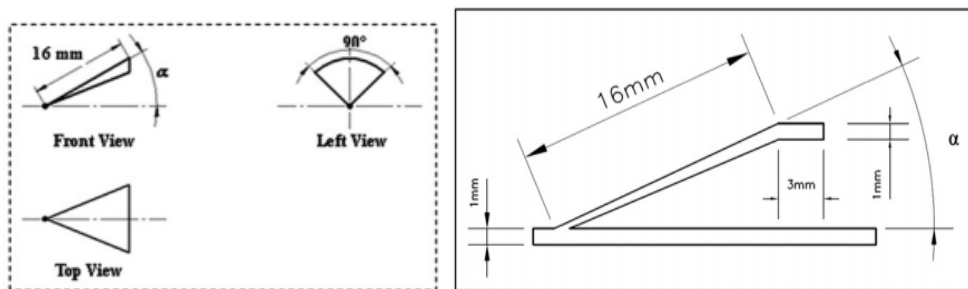


شکل ۱: شکل زاویه‌دار رو به جلو

شماتیک هندسه مورد بحث که از لوله پره‌دار یا نوار زاویه‌دار از آرایش رو به جلو با طول ۱۶ میلی‌متر و دامنه ۳ میلی‌متر تشکیل شده است، در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است.



شکل ۲: شکل نوار زاویه‌دار در نمای سه بعدی

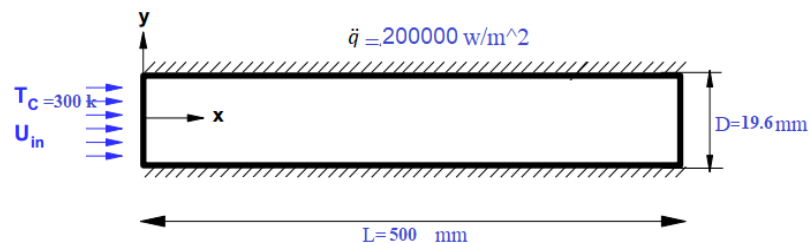


شکل ۳: مشخصات نوار زاویه‌دار

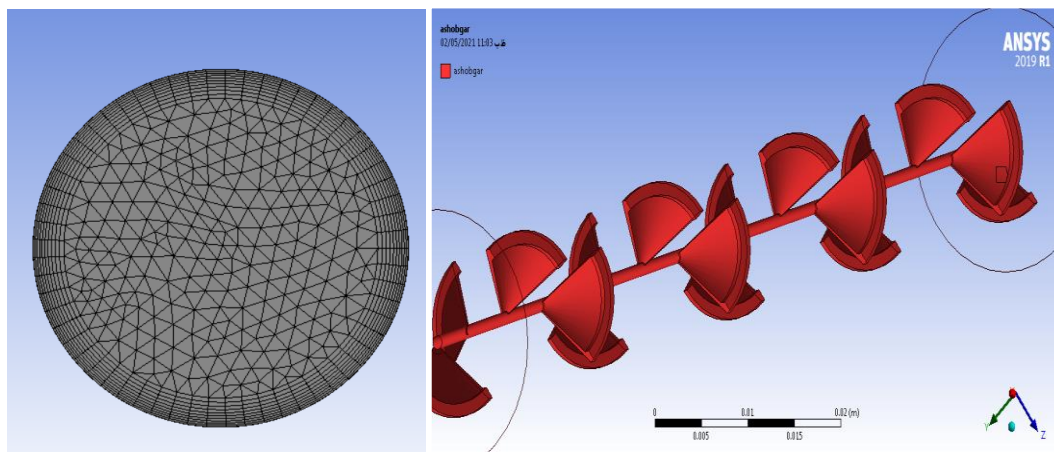
جهت شبیه‌سازی از هندسه سه بعدی با مش‌بندی به صورت بی‌سازمان استفاده شده است. نانو سیال با جریان کاملاً توسعه‌یافته با عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ از داخل لوله عبور داده شده و خروجی لوله در فشار محیط در نظر گرفته می‌شود. نانو سیال بصورت تک فاز با جریان تراکم‌ناپذیر، پایا، نیوتنی و مغشوش مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این، ویژگی‌های ترموفیزیکی برای نانوسیال ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین فرض گردیده است که تمامی دیواره‌ها به صورت ثابت و با فرض عدم لغزش



در نظر گرفته شده، دارای سرعت و دمای ورودی معلوم می‌باشد و همچنین دیواره‌های لوله تحت شار حرارتی ثابت 200000 وات/متر مربع قرار گرفته است. هندسه در نرم افزار آنسیس - فلونت تولید و شبکه‌بندی گردیده و جهت مدل‌سازی جریان آشفته از مدل $k-\epsilon$ استفاده شده است. مرز خروجی نیز شرط مرزی فشار نسبی صفر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی و نمای سه بعدی هندسه لوله به همراه نوارهای زاویه‌دار در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل ۴: شرایط مرزی هندسه مورد نظر

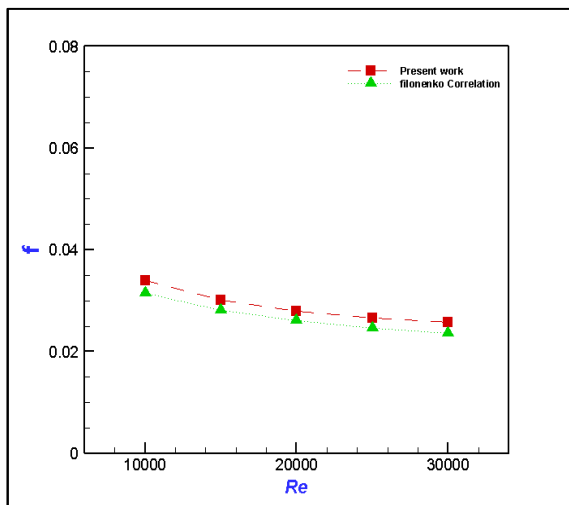


شکل ۵: نمای هندسه طراحی شده و شبکه‌بندی با چهار پره ۹۰ درجه

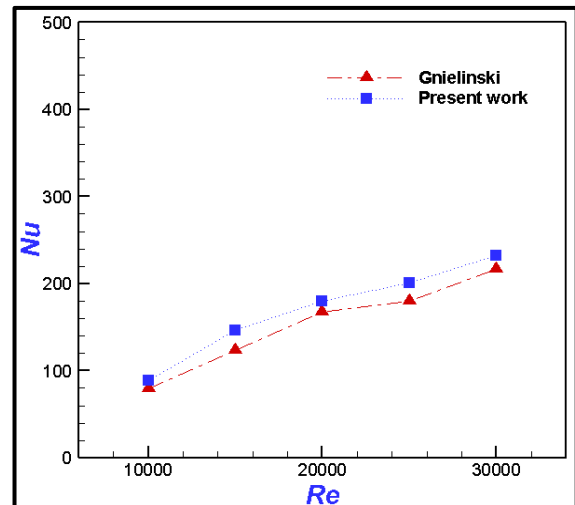
هندسه مورد بررسی لوله با نوارهای زاویه‌دار که به صورت ۴ پره روبه جلو با زاویه شیب ۱۰ درجه و گام ۵۰ میلی‌متر برای نانوذره اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی مختلف در بازه ۱ تا ۴ درصد و قطرهای مختلف نانوذره در محدوده ۲۰ تا ۵۰ نانومتر که در یک سیال پایه (آب) مخلوط شده‌اند، می‌باشد و جهت تحلیل عددی هندسه در نرم‌افزار آنسیس - فلونت تولید و شبکه‌بندی شده است. در این مطالعه، کیفیت شبکه استفاده شده از لحاظ تعداد و تاثیر آن بر روی جواب نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبکه بندی نشان داد اختلاف شبکه‌بندی دهم و یازدهم کمتر از ۱ درصد می‌باشد. بنابراین از شبکه دهم با تعداد 2997088 سلول استفاده گردیده است.

اعتبار سنجی

به منظور صحت سنجی و دقت نتایج حاصل شده، مستلزم است مقایسه‌ای بین این مطالعه و نتایج پژوهش‌ها و مطالعات مورد اطمینان پیشین صورت گیرد که به موجب این کار به پژوهش مورد نظر اعتبار بخشید. نتایج حاصل شده از پژوهش حال حاضر را با نتایج بدست آمده از دیواره لوله صاف در حالت آشفته با استفاده از رابطه گلینسکی [۱۱] برای عدد ناسلت و از رابطه فلینکو [۱۱] برای ضریب اصطکاک، مقایسه شده است. نتایج نشان داد که برای عدد ناسلت در حدود ۱۱ درصد و برای ضریب اصطکاک حدود ۷ درصد مطابق شکل‌های (۶) و (۷) اختلاف دارد.



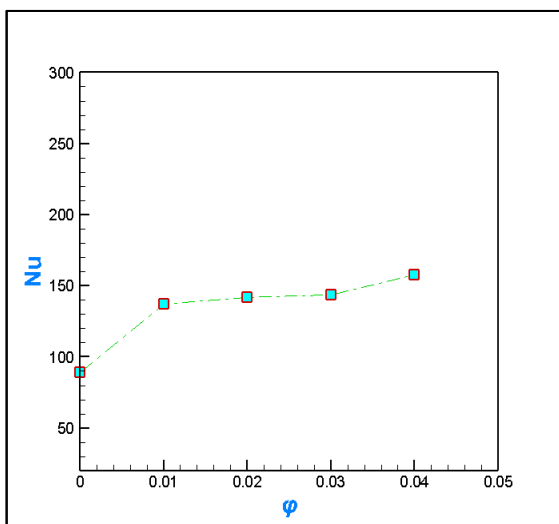
شکل ۷: نمودار مقایسه ضریب اصطکاک



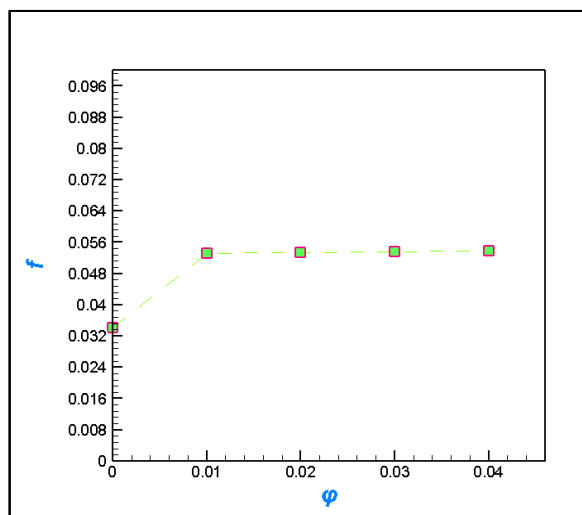
شکل ۶: نمودار مقایسه عدد ناسلت

بررسی اثر کسر حجمی نانو سیال

شکل‌های (۸) تا (۱۰) نمودار تاثیر کسر حجمی نانو سیال بر روی عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد در لوله به همراه آشفته‌ساز را نشان می‌دهند. در لوله میزان گام ۵۰ میلی‌متر عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۳، ۲، ۱ و ۰ درصد در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل‌های (۸) و (۹) مشاهده می‌شود با افزایش کسر حجمی نانوذرات در یک عدد رینولدز ثابت، عدد ناسلت به دلیل افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به تعریف عدد ناسلت (که بیانگر نسبت نرخ انتقال حرارت از طریق جابجایی، به انتقال حرارت از طریق هدایتی سیال می‌باشد، می‌توان گفت که، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق جابجایی بیشتر از مقدار افزایش نرخ انتقال حرارت از طریق هدایت است. ولی با افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییر محسوسی بر ضریب اصطکاک داشته است.

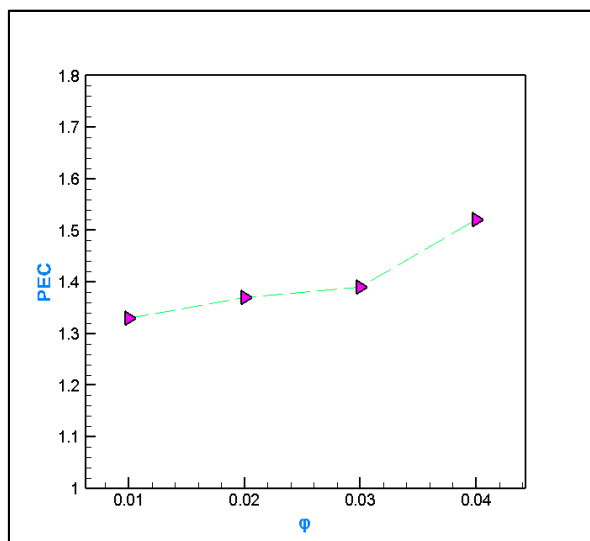


شکل ۹: نمودار تاثیر کسر حجمی نانو سیال بر عدد ناسلت



شکل ۸: نمودار تاثیر کسر حجمی نانو سیال بر ضریب اصطکاک

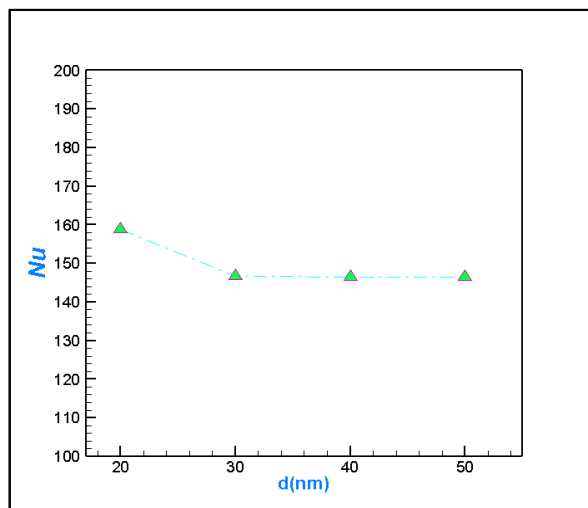
مطابق شکل (۱۰) معیار ارزیابی عملکرد با افزایش کسر حجمی نانوذرات روند افزایشی دارد و میزان افزایش آن نیز در حدود ۱۵ درصد می‌باشد. نتیجه این است که با افزایش کسر حجمی نانوذرات کارایی مبدل افزایش پیدا می‌کند که علت این افزایش را باید در افزایش عدد ناسلت دانست.



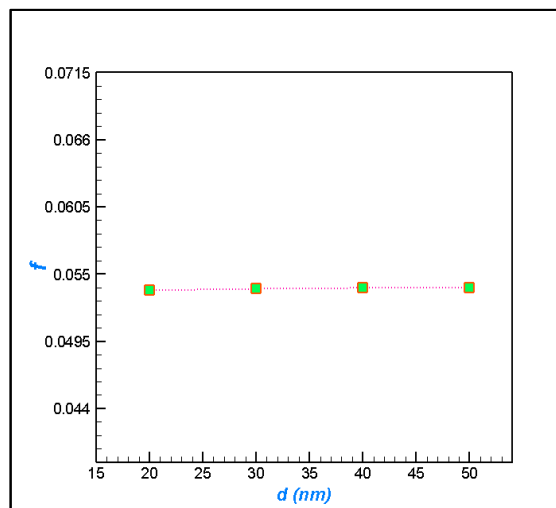
شکل ۱۰: نمودار تاثیر کسر حجمی نانوسیال بر معیار ارزیابی عملکرد

بررسی اثر قطر نانوذرات

شکل‌های (۱۱) تا (۱۳) نمودار تاثیر قطر ذرات نانوسیال بر عدد ضریب اصطکاک، ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد در لوله آورده شده است. در لوله میزان زاویه پره ۱۰ درجه و گام ۵۰ میلی‌متر و عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ و نانوسیال اکسید آلومینیوم در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود تغییرات عدد ناسلت در اندازه‌های نانوذرات ۵۰ نانومتر و ۴۰ نانومتر نسبت به قطر نانوذرات ۳۰ نانومتر، تغییرات ناچیزی داشته است. عدد ناسلت با کاهش بیشتر اندازه نانوذرات از ۳۰ نانومتر به ۲۰ نانومتر، در حدود ۸ درصد افزایش یافته است. ضریب اصطکاک در اندازه‌های نانوذرات از ۵۰ تا ۲۰ نانومتر، تغییر محسوسی مشاهده می‌شود.

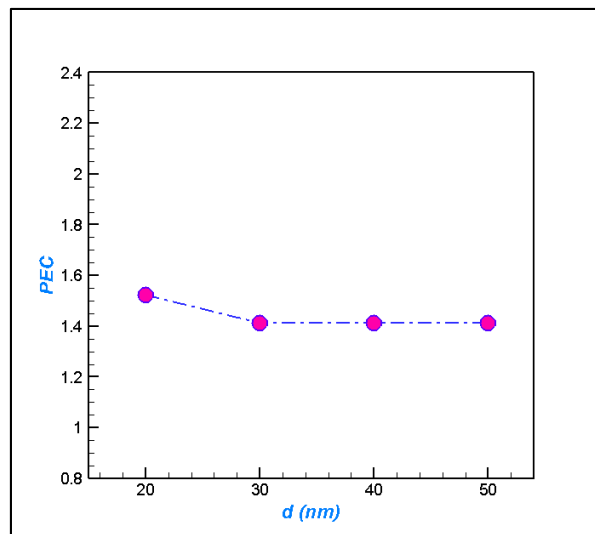


شکل ۱۲: نمودار تاثیر قطر ذرات نانوسیال بر عدد ناسلت



شکل ۱۱: نمودار تاثیر قطر ذرات نانوسیال بر ضریب اصطکاک

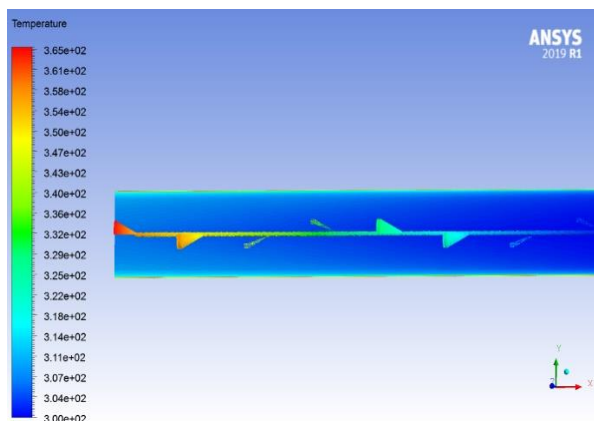
در شکل (۱۳) معیار ارزیابی عملکرد با کاهش قطر نانوذرات از ۳۰ نانومتر به ۲۰ نانومتر، افزایشی در حدود ۱۶ درصد مشاهده شده است در حالی که در قطر نانوذرات ۵۰ و ۴۰ نانومتر نسبت به اندازه ۳۰ نانومتر تغییر محسوسی داشته است. بنابراین، وقتی که قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر می‌باشد میزان عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد از همه حالت‌ها بیشتر شده است.



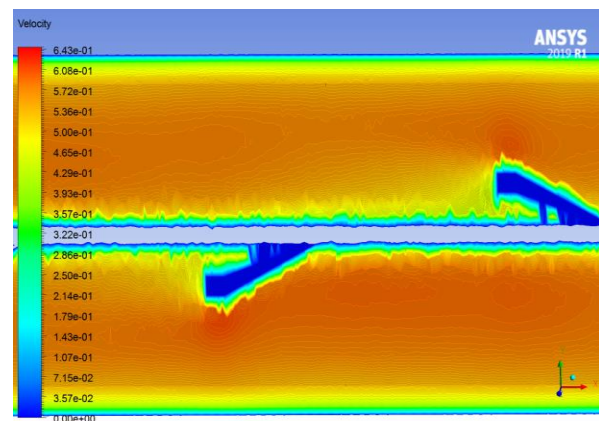
شکل ۱۳: نمودار تاثیر قطر ذرات نانوسیال بر معیار ارزیابی عملکرد

بررسی تاثیر نوارهای زاویه‌دار رو به جلو

مقایسه از تاثیر نوارهای زاویه‌دار رو به جلو برای چهار پره با زاویه شیب ۹۰ درجه و گام ۵۰ میلی‌متر و لوله صاف بر روی سرعت و دما با عدد رینولدز ۱۰۰۰۰ به ترتیب در شکل (۱۴) و شکل (۱۵) ارائه شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که اختلاط شدید یا آشفته‌گی زیاد در جریان (جهت جریان راست به چپ) در پشت نوارهای زاویه‌دار منجر به ایجاد گردابه‌های بیشتر می‌گردد. کانتور دما نشان می‌دهد که نرخ انتقال حرارت به پارامترهای ترکیبی نوار زاویه‌دار بستگی دارد. دلیل این امر آن است که اختلاط سیال، لایه مرزی اغتشاشی و انتقال حرارت جابجایی با آن پارامترهای هندسی ارتباط نزدیک به هم دارند. به وضوح قابل رویت است، اختلاط سیال و اغتشاش مرزی سیال به شدت تشدید می‌شود. بنابراین، لایه مرزی جریان در زاویه‌های شیب بزرگتر، نازک‌تر می‌شود. این امر منجر به افزایش قابل توجهی در میزان انتقال حرارت، ضریب اصطکاک و معیارهای ارزیابی عملکرد می‌گردد.



شکل ۱۵: کانتور دما برای آرایش ۴ پره با زاویه ۹۰ درجه و گام ۵۰ میلی‌متر و رو به جلو



شکل ۱۴: کانتور سرعت برای آرایش ۴ پره با زاویه ۹۰ درجه و گام ۵۰ میلی‌متر و رو به جلو

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تاثیر قطر نانو ذره و کسر حجمی نانوسیال اکسید آلومینیوم/آب بر روی انتقال حرارت جابجایی با استفاده از نوارهای زاویه‌دار در یک مبدل حرارتی با مقطع دایره‌ای، به صورت عددی پرداخته شد و پارامترهای همچون کسر حجمی نانوذرات



که در پنج کسر حجمی از ۱ تا ۴ درصد، قطر نانوذرات که در قطرهای ۲۰ تا ۵۰ نانومتر لحاظ گردید. همچنین جمع‌بندی نتایج بدست آمده از حل عددی جریان سیال در رژیم جریان آشفته درون لوله پرداخته شده است و خلاصه‌ای از عوامل موثر بر پارامترهای مختلف جریان از قبیل عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و معیار ارزیابی عملکرد به شرح ذیل آورده شده است:

(۱) با افزایش کسر حجمی از ۱ تا ۴ درصد، عدد ناسلت با افزایشی در حدود ۱۸ درصد روبه رو شده است. در حالی که با افزایش کسر حجمی نانوذرات تغییر محسوسی بر ضریب اصطکاک داشته است. معیار ارزیابی عملکرد با افزایش کسر حجمی در حدود ۱۵ درصد افزایش یافته است.

(۲) میزان عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد با کاهش اندازه نانوذرات از ۳۰ تا ۲۰ نانومتر به ترتیب در حدود ۸٪ و ۱۶٪ افزایش می‌یابند. میزان عدد ناسلت و معیار ارزیابی عملکرد در قطر نانوذرات ۲۰ نانومتر از همه حالات بیشتر می‌باشد. ضمن اینکه با کاهش قطر نانوذرات ضریب اصطکاک تغییر ناچیزی داشته است.

(۳) اختلاط شدید یا آشفته‌گی زیاد در جریان در پشت نوارهای زاویه‌دار منجر به ایجاد گردابه‌های بیشتر می‌گردد. نرخ انتقال حرارت به پارامترهای ترکیبی نوار زاویه‌دار بستگی دارد. دلیل این امر آن است که اختلاط سیال، لایه مرزی اغتشاشی و انتقال حرارت جابجایی با آن پارامترهای هندسی ارتباط نزدیک به هم دارند.

فهرست علائم

فهرست علائم و نمادها

C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($J kg^{-1}K^{-1}$)
d	قطر نانوذره (nm)
k	ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1}K^{-1}$)
Nu	عدد ناسلت، $Nu=qL/k_f\Delta T$
Pe	عدد پکله، $Pe=u_s d_s/\alpha_f$
Pr	عدد پرانتل، $Pr=\nu_f/\alpha_f$
Re	عدد رینولدز، $Re=U_m L/\nu_f$
S	گام (mm)
T	دما ($^{\circ}C$)
q	نرخ انتقال حرارت (W/m)
α	زاویه شیب پره (درجه)
L	طول لوله (mm)
N	عدد آووگادرو (-)
P	فشار (N/m^2)

فهرست علائم یونانی

α	نفوذ حرارتی سیال ($m^2 s^{-1}$)
μ	گرانروی دینامیکی ($Kg ms^{-1}$)
ν	گرانروی سینماتیک ($m^2 s^{-1}$)
ρ	چگالی ($kg m^{-3}$)
φ	کسر حجمی نانوذرات (-)



مراجع

- [1] Kakaç, S., Bergles, A. E., Mayinger, F., Yüncü, H., (2013), Heat transfer enhancement of heat exchangers, Springer Science & Business Media (Vol. 355).
- [2] Choi, S. U., Eastman, J. A., (1995), Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, in: D.A. Signer, H.P. Wang (Eds.), Developments Applications of Non-Newtonian Flows, FED-vol. 231/MD, 66, pp. 99–105.
- [3] Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K., (1993), Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of c-Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles), Netsu Bussei (Japan) 4, pp.227–233.
- [4] Lee, S., Choi, S. S., Li, S. A., Eastman, J. A., (1999), Measuring thermal conductivity of fluid containing oxide nanoparticles", Journal of Heat Transfer, 121, pp.280–289.
- [5] Saidur, R., Kazi, S. N., Hossain, M. S., Rahman, M. M., Mohammed, H. A., (2011), A review on the performance of nanoparticles suspended with refrigerants and lubricating oils in refrigeration systems, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 15, pp. 310–323.
- [6] Fan, A., Deng, J., Guo, J., Liu, W., (2011), A numerical study on thermo-hydraulic characteristics of turbulent flow in a circular tube fitted with conical strip inserts, Applied Thermal Engineering, 31, pp. 2819–2828.
- [7] Kherbeet, A. S., Mohammed, H. A., Salman, B. H., Ahmed, H. E., Alawi, O. A., Rashidi, M. M., (2015), Experimental study of nanofluid flow and heat transfer over microscale backward- and forward-facing steps, Experimental Thermal and Fluid Science, 65, pp.13–21.
- [8] Murshed, S. S., de Castro, C. N., (2016), Conduction and convection heat transfer characteristics of ethylene glycol based nanofluids—a review. Applied energy, 184, pp. 681–695.
- [9] Mashayekhi, R., Arasteh, H., Toghraie, D., Motaharpour, S. H., Keshmiri, A., Afrand, M., (2020), Heat transfer enhancement of Water-Al₂O₃ nanofluid in an oval channel equipped with two rows of twisted conical strip inserts in various directions: A two-phase approach. Computers & Mathematics with Applications, 79(8), pp.2203–2215.
- [10] Ho, C. J., Cheng, C. Y., Yang, T. F., Rashidi, S., Yan, W. M., (2021), Experimental study on cooling performance of nanofluid flow in a horizontal circular tube, International Journal of Heat and Mass Transfer, 169, 120961.
- [11] Akyürek, E. F., Geliş, K., Şahin, B., Manay, E., (2018), Experimental analysis for heat transfer of nanofluid with wire coil turbulators in a concentric tube heat exchanger, Results in Physics, 9, pp. 376–389.
- [12] W. H. Azmi, K V Sharma, Rizalman Mamat, A B S Alias, Izan Izwan Misnon, (2012), Correlations for thermal conductivity and viscosity of water based nanofluids, Materials Science and Engineering, 36, 012029.
- [13] Hamilton, R.L., and Crosser, O.K., (1962), Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems, Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals, 1(3), pp. 187–191.
- [14] Mohammed, H. A., Hasan, H. A., Wahid, M. A., (2013), Heat transfer enhancement of nanofluids in a double pipe heat exchanger with louvered strip inserts, International Communications in Heat and Mass Transfer, 40, pp. 36–46.
- [15] Webb, R.L., (1981), Performance Evaluation Criteria for use of Enhanced Heat Transfer Surfaces in Heat Exchanger Design, international journal of heat and mass transfer, 24, pp. 715–726.
- [۱۶] نعمت زاد، ا، غفوری، ا، فلاوند جوزایی، ع، (۱۳۹۹)، بررسی تجربی عملکرد هیدروترومودینامیکی مبدل حرارتی دو لوله ای با استفاده از نانوسیال و نوار تابیده دوگانه، نشریه مهندسی مکانیک، انجمن مهندسان مکانیک ایران.