

بررسی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در کانال مربعی با لوله صلب میانی و صفحه نگهدارنده

اکرم جهانبخشی

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

افشین احمدی ندوشن*

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

در این مقاله اثر افزودن نانو ذرات اکسید آلومینیوم در غلظت‌های ۱٪ تا ۵٪ به سیال پایه‌ی آب در یک کانال مربعی و لوله‌ی صلب میانی با وجود یک صفحه‌ی نگهدارنده مطالعه شده است. وجود صفحه‌ی نگهدارنده گامی در جهت اجرایی شدن این هندسه در طراحی مبدل‌ها و افزایش میزان انتقال حرارت با کمترین میزان حجم مبدل حرارتی است. بررسی جریان در کانال‌هایی با سطح مقطع غیر مدور می‌تواند بسیاری از محدودیت‌های اجرایی در صنعت مانند حد مجاز افت فشار، را برطرف نماید. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، کاهش قابل توجهی در دمای بی‌بعد جریان حاصل شده است که به معنای افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی است. بطوریکه در عدد رینولدز ۱۰۰ و برای غلظت ۵٪ ذرات نانو، ضریب انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در مقایسه با جریان آب خالص، نزدیک به ۱۴٪ افزایش دارد. وجود صفحه‌ی نگهدارنده نیز در مقایسه با حالتی که صفحه وجود ندارد تفاوت‌هایی را در رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی جریان ایجاد خواهد نمود، که در کانتورهای ارائه شده به وضوح مشخص است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی عددی، نانوسیال، جابجایی اجباری، کانال با مقطع غیر مدور.

Study the Convective Heat Transfer of Nanofluids in Square Channel with Rigid Tube in Center and Holder Plate

A. Jahanbakhshi

Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

A. Ahmadi nadooshan

Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract

In this paper, the effect of adding aluminum oxide nanoparticles in concentration range of 1% to 5% to the base fluid (water) in a square-shaped channel and its rigid central tube with a holder plate was studied. Existence of the holder plate is a step to implement this kind of geometry in exchanger design and increase the rate of heat transfer at the lowest volume heat exchangers. Check the flow in the channel with non-circular cross section can be resolve a lot of administrative constraints such as maximum allowable pressure drop in the industry. The results showed significant reduction in dimensionless temperature with increasing the volume fraction of nanoparticles, which was interpreted as increase of the convection heat transfer coefficient. For example, the convection heat transfer coefficient of nanofluids was increased about 14% relative to the pure water in $Re=100$ and concentration of nanoparticles equivalent to 5%. Existence of holder plate influenced the thermal and hydrodynamic behavior of flow, which were vividly shown in the presented contours.

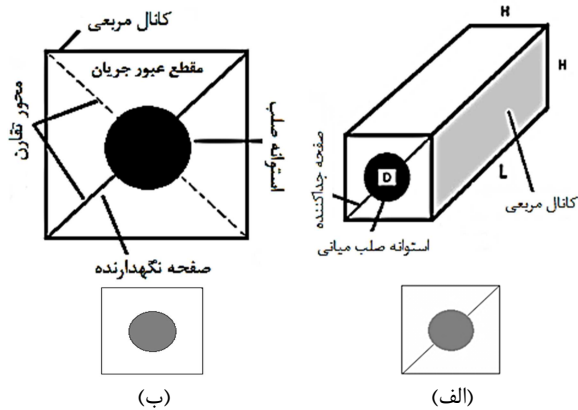
Keywords: Numerical Simulation, Nanofluid, Forced convection, Non-circular channel.

۱- مقدمه

بررسی انتقال حرارت جابجایی در کانال‌های غیر دایره‌ای جهت کاربردهای صنعتی، گرمایشی و سرمایشی همچون مبدل‌های هوایی و فشرده بسیار حائز اهمیت است. در این کانال‌ها به علت کاهش سطح تماس سیال با دیواره تنش برشی در طول مسیر جریان سیال کمتر بوده و افت فشار کمتری نسبت به کانال‌های دایره‌ای وجود خواهد داشت. افت فشار پایین این مقاطع اهمیت آن‌ها را در کاربردهای صنعتی بارزتر می‌نماید خصوصاً در کاربرد-هایی که محدودیت‌هایی برای میزان افت فشار لحاظ شده است. به علاوه کاهش سطح تماس سیال و جداره‌ها، باعث کاهش در انتقال حرارت نیز می‌گردد، بنابراین برای جبران این کاهش از نانوسیالات به جای سیال خالص استفاده می‌شود. یکی از مسائلی که امروزه در طراحی مبدل‌های حرارتی اهمیت دارد افزایش میزان انتقال حرارت با کمترین میزان حجم مبدل حرارتی است. مقاطع غیر دایره‌ای نظیر کانال‌هایی با مقاطع مربعی و مثلثی از جمله مواردی است که باید به آن پرداخته شود. چویی [۱] نخستین فردی بود که به مطالعه نانو سیالات پرداخت و ویژگی‌های

حرارتی قابل توجه آن‌ها را معرفی نمود. مرشد و کاسترو [۲] انتقال حرارت جابجایی اجباری برای نانوسیالات مختلف را مطالعه و مقایسه نمودند. آن‌ها سیالات پایه‌ی مختلفی از جمله آب، اتیل گلیکول و ... را بررسی کرده و دریافتند که تمامی نانوسیالات دارای ضریب انتقال حرارت بیشتری نسبت به سیال پایه هستند. میرمعصومی و بهزادمهر [۳] جابجایی مختلط آب اکسید آلومینیوم را در یک لوله مدور افقی، به صورت دو فاز مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار آنها نشان داد که در ناحیه کاملاً توسعه یافته نانو ذرات اثری بر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان نداشته اما اثر آن‌ها بر رفتار حرارتی جریان چشمگیر است. پیشکار و قاسمی [۴] به بررسی جریان جابجایی مختلط نانوسیال و سیال خالص در یک کانال افقی شامل یک منبع حرارتی به روش عددی تک فاز پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از نانو سیال موجب پخش بهتر حرارت و افزایش دمای میانگین منبع می‌شود. واصفی و علیزاده [۵] تاثیر نانو ذرات اکسید مس را بر روی انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آب در کانال‌های افقی با سطح مقطع های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها بهبود انتقال حرارت را در اثر حضور نانو ذرات نشان می‌داد. طبق مطالعاتی که توسط زینعلی و

کانال مربعی تحت شار حرارتی ثابت برابر $20000 \text{ (w/m}^2\text{)}$ بوده و دمای سیال ورودی 293 (K) است. در ادامه دو حالت متفاوت از مقطع عرضی نیز بررسی می‌شود. محدوده مورد نظر برای عدد رینولدز از ۱۰ تا ۱۰۰۰، قطر ذرات نانو برابر ۱۰ نانومتر و غلظت بین ۰ تا ۵٪ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- هندسه مساله و مقاطع عبور جریان سیال

۳- معادلات حاکم بر جریان نانوسیال

معادلات حاکم بر این مساله عبارتند از: [۱۶-۱۴]:

پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

مومنتم X:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

مومنتم Y:

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

مومنتم Z:

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

چگالی موثر، ظرفیت حرارتی و ضریب پخش حرارتی نانوسیال

طبق روابط (۶)، (۷) و (۸) محاسبه شده است: [۱۷]

$$\rho_{nf} = (1 - (\phi_p)) \rho_{bf} + \phi_p \rho_p \quad (6)$$

$$(C_p \rho)_{nf} = (1 - (\phi_p)) (C_p \rho)_{bf} + \phi_p (C_p \rho)_p \quad (7)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{K_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (8)$$

همکارانش [۶] روی انتقال حرارت جریان نانو سیال در کانالهایی با مقطع مثلث متساوی الاضلاع انجام گرفت این نتیجه حاصل شد که در این کانالها افت فشار کمتری نسبت به مجراهای دیگر رخ داده است. همچنین نشان دادند که شدت انتقال حرارت به تغییر غلظت نانو ذرات بستگی دارد. تاثیرات ناشی از خطای تخمینی در ویسکوزیتهی دینامیکی موثر و قابلیت هدایتی در انتقال حرارت جابجایی آزاد مربوط به نانوسیال آلومینیوم - آب برای یک محفظه مربعی گرم شده توسط هو و همکارانش [۷] بررسی شد. نتایج کار آنها نشان داد از طریق به کارگیری فرمول ویسکوزیتهی دینامیکی می‌توان شدت یافتن انتقال حرارت در میان محفظه را تشخیص داد. منصور و همکارانش [۸] به بررسی همزمان مسالهی جریان همرفتی آرام- درهم و انتقال حرارت برای نانو سیال اکسید آلومینیوم - آب در لوله پرداختند. در این مطالعه دیوارهی لوله در معرض شار حرارتی یکنواخت بود. انگوین و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجایی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم را در خنک کاری قطعات الکترونیکی بررسی کردند. در پژوهش آنها مشخص شد که ذرات با قطر ۳۶ نانومتر، ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با ذرات با قطر ۴۷ نانومتر، بیشتر افزایش می‌دهند. هریس و همکاران [۱۰] با استفاده از مدل تک فاز همگن انتقال حرارت جابجایی آرام نانو سیال را در لوله‌ای با دمای ثابت دیواره بررسی کردند. شاه و لندن [۱۱] به مطالعهی مشخصه‌های انتقال حرارت مربوط به جریان آرام در شکل- های متنوعی از کانالها پرداختند. از جمله کانالهایی با انواع متنوعی از مقاطع مثلثی شکل که در رنج متنوعی از شرایط مرزی گرمایی قرار داشتند. زهنگ [۱۲] گزارشی پیرامون اعداد ناسلت برای جریان آرام و کاملاً توسعه یافته برای مقطع مثلث متساوی الساقین با دیواره‌هایی دما ثابت و زوایای رئوس بین ۳۰ تا ۱۲۰ درجه، ارائه داد. نتایج حاصل از مطالعهی جریان نانوسیال در کانالهای غیر مدور بر این نکته تاکید دارد که عدد ناسلت نانوسیال با افزایش غلظت ذرات نانو و کاهش قطر آنها افزایش می‌یابد. هیهات و کوثری [۱۳] در یک مقاله دیگر به بررسی اثر توزیع غیر یکنواخت ذرات نانو بر پارامترهای جریانی و حرارتی نانو سیال آب - آلومینا در یک لوله مدور پرداختند. آنها از یک روش دو مولفه‌ای که توسط بونجیورنو ارائه شده بود، استفاده کردند و نشان دادند که توزیع غیر یکنواخت نانو ذرات، انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. کلت و مهزاد [۱۴] به مطالعهی انتقال حرارت جریان آرام نانوسیال در فضای بین کانال مربعی و لوله‌ی صلب واقع در مرکز آن پرداختند و نتیجه گرفتند که تغییرات ناسلت متوسط متاثر از تغییرات عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات است. در ادامه‌ی کارهای ذکر شده و در تحقیق حاضر، موضوع اصلی بررسی رفتار حرارتی و هیدرو- دینامیکی جریان نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در کانال با مقطع غیر مدور همراه با جسم صلب میانی و صفحه‌ی نگهدارنده، و نیز بررسی اثر تغییر عدد رینولدز، عدد پرانتل، غلظت نانو ذرات و نیز تغییر دمای ورودی جریان است.

۲- بیان مسئله

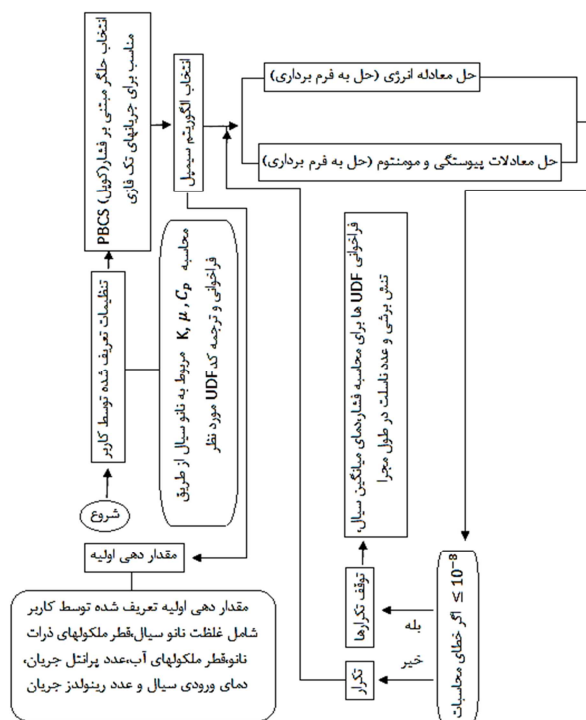
با توجه به شکل ۱ کانال حاوی نانوسیال Al_2O_3 و طول $L=3 \text{ (m)}$ است. ابعاد اضلاع کانال $H=0.05 \text{ (m)}$ ، شعاع استوانه‌ی میانی برابر (m) $D/2=0.0125$ و قطر هیدرولیکی مجرا (m) 0.0217 می‌باشد. جریان داخل محفظه آرام، پایدار و تراکم ناپذیر فرض شده است. دیواره‌های

۴- روش حل عددی

هندسه‌ی مساله در نرم افزار گمبیت^۱ رسم، و نرم افزار فلوئنت^۲ به منظور حل معادلات به کار رفته است. خواص ترموفیزیکی نانو سیال با توجه به نوع معادلات حاکم توسط ماکروهای حلقه‌ای و نوشتن توابعی به زبان برنامه نویسی C^۳ محاسبه شده است تا نتایج دقیق‌تری از متغیرهای خروجی نظیر تغییرات عدد ناسلت، فشار، تنش برشی و... حاصل شود. UDFها بصورت دینامیکی در هر تکرار از پروسه حل در فلوئنت، اجرا می‌شوند و خواسته‌های مورد نیاز مساله را به فلوئنت اعمال می‌کنند. روند حل شبیه‌سازی حاضر بصورت فلوچارت شکل ۲ اجرا می‌شود. خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم نیز در جدول ۱ ارائه شده است.

۵- تایید صحت روش حل مساله

اعتبارسنجی این تحقیق با مقایسه‌ی نتایج حاضر و نتایج مراجع [۱۴، ۱۵ و ۲۰] صورت پذیرفته است. مقایسه نتایج در جداول ۲ و ۳ ذکر شده است. همچنین با استفاده از توابع تعریف شده و روش حل به کار رفته در این مطالعه‌ی عددی، مقادیر ضریب انتقال حرارت متوسط حاصل از شبیه‌سازی عددی جریان آرام آب خالص، در یک لوله با دیواره‌ی دما ثابت با نتایج حاصل از معادله‌ی معروف سیدر و تیت [۲۰] مقایسه شده است. شکل ۳ نشان دهنده‌ی این مقایسه است و بیانگر دقت روش به کار رفته برای شبیه‌سازی عددی است. در معادله‌ی (۲۴) تمامی خواص به غیر از μ_m در مقدار متوسط دمای میانگین سیال ارزیابی شده‌اند.



شکل ۲- فلوچارت روند حل مساله

سرعت براونی نانو ذرات نیز از رابطه‌ی (۹) محاسبه شده است:

$$[18]$$

$$V_{Br} \equiv \frac{Tk_b}{3\pi\mu_{bf}d_p l_{bf}} \quad (9)$$

در رابطه‌ی (۹) پارامترها بصورت زیر هستند:

k_b (ثابت بولتزمن) و برابر با $1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ است. l_{bf} نیز مسیر آزاد بین ملکولی است که از رابطه‌ی (۱۰) محاسبه شده و برای سیال پایه‌ی آب برابر با 0.17 نانو متر است: [۱۸]

$$l_{bf} = \frac{1}{\sqrt{2}n\pi d_{bf}^2} \quad (10)$$

n : چگالی ملکولی سیال پایه است.

رسانش حرارتی نانو سیال، از رابطه‌ی (۱۱) بدست می‌آید: [۱۸]

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = 1 + 64.7 \times \phi_p^{0.7460} \times \left(\frac{d_{bf}}{d_p}\right)^{0.3690} \times \left(\frac{K_p}{K_{bf}}\right)^{0.7476} \times Pr^{0.9955} \times Re^{1.2321} \quad (11)$$

اعداد بی بعد رینولدز و پراکتل در رابطه‌ی (۱۱) به صورت زیر تعریف می‌شوند: [۱۸]

$$Re \equiv \frac{\rho_{bf} V_{Br} d_p}{\mu} = \frac{\rho_{bf} k_b T}{3\pi\mu^2 l_{bf}} \quad (12)$$

$$Pr = \frac{\mu_{bf}}{\rho_{bf} \alpha_{bf}} \quad (13)$$

ویسکوزیته‌ی دینامیکی نانو سیال از رابطه‌ی (۱۴) که حاصل از

تجربی برای نانو سیال آب- آلومینا است، بدست می‌آید: [۱۹]

$$\mu_{nf} = 0.155 - \frac{19.583}{T} + 0.749\phi_p + \frac{2094.47}{T^2} - 0.192\phi_p^2 - \frac{8.11\phi_p}{T} - \frac{27463.863}{T^3} + 0.0127\phi_p^3 + \frac{1.6044\phi_p^2}{T} + \frac{2.1754\phi_p}{T^3} \quad (14)$$

قطر هیدرولیکی، محیط و مساحت تر شده به ترتیب روابط (۱۵)،

(۱۶) و (۱۷) به دست می‌آید.

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (15)$$

$$A = \frac{1}{2} [(H \times H) - \left(\pi \frac{d^2}{4}\right)] \quad (16)$$

$$P = [(2 \times H) + (\pi \times r) + \sqrt{2H^2 - 2} \times r] \quad (17)$$

در این روابط، H اندازه ضلع سطح مقطع کانال و r شعاع لوله است.

برای یافتن دمای میانگین سیال رابطه‌ی (۱۸) در نظر گرفته شده است:

$$T_b = \frac{(q'' \times z \times p)}{(m \times c_p)} + T_{in} \quad (18)$$

$$\dot{m} = \rho A V \quad (19)$$

$$h = \frac{q''}{T_{wall}(z) - T_{bulk}(z)} \quad (20)$$

$$NU = \frac{h D_h}{K_{nf}} \quad (21)$$

$$f = \frac{\tau_{wall}}{\frac{1}{2} \rho_f v^2} \quad (22)$$

سرعت ورودی جریان از رابطه‌ی (۲۳) حاصل می‌شود.

$$V = \frac{Re \mu_{nf}}{\rho_{nf} D_h} \quad (23)$$

¹ Gambit

² Fluent

³ Udf

معادله‌ی سیدر و تیت و فرضیات آن به شرح زیر است:

$$\overline{Nu_D} = 1.86 \left(\frac{Re_D Pr}{L/D} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14}$$

$$T_s = \text{constant}$$

$$0.48 < Pr < 16700, \quad 0.0044 < \frac{\mu}{\mu_s} < 9.75 \quad (24)$$

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم [۱۴]

خواص فیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم
$\rho(\text{kg/m}^3)$	۹۹۷٫۱	۳۹۷۰
$c_p(\text{J/kg.k})$	۴۱۷۹	۷۶۵
$k(\text{W/m.k})$	۰٫۶۱۳	۴۰

جدول ۲- مقایسه‌ی ناسلت متوسط آب خالص در کانال با نتایج دیگران

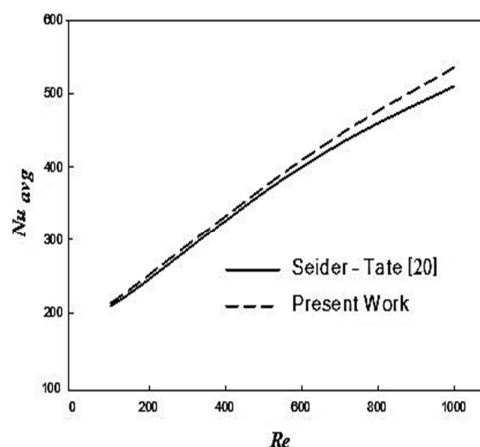
در $Re=100$

شاه و لندن [۱۱]	کلت و مهرزاد [۱۴]	کارحاضر	درصدخطا
$Nu=5.317$	$Nu=5.615$	$Nu=5.14$	۳٫۳۲۸
$f.Re=22.02$	$f.Re=24.054$	$f.Re=22.31$	۱٫۳۱۶

جدول ۳- مقایسه‌ی ناسلت متوسط نانوسیال در کانال با نتایج دیگران

در $Re=100$

غلظت نانو ذرات در قطر 70 نانومتر	کلت و مهرزاد [۱۴]	کارحاضر	درصدخطا
$\phi = 1\%$	$Nu=5.91$	$Nu=5.23$	۱۱٫۵
$\phi = 2\%$	$Nu=5.98$	$Nu=5.30$	۱۱٫۳۷



شکل ۳- اعتبار سنجی مقادیر ناسلت متوسط کار حاضر با مقادیر حاصل از معادله‌ی سیدر و تیت [۲۰]

۶- مطالعه‌ی شبکه

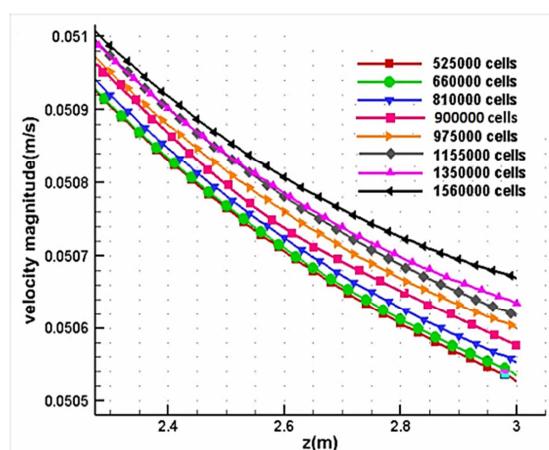
برای شبکه‌بندی هندسه‌ی مورد بررسی از شبکه‌بندی منظم^۱ استفاده شده است. این شبکه بندی‌ها در طول کانال یکنواخت و در

ورودی، خروجی، گوشه‌های کانال (نزدیک دیواره‌ها) و سطح منحنی شکل با نسبت مناسبی ریزتر در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی از شبکه‌بندی دامنه حل، چهار نوع شبکه‌ی درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز مورد بررسی قرار گرفته است. شبکه‌بندی ریز نتایج را با هزینه‌ی زمانی کمتر و با دقت قابل قبولی نسبت به حالت خیلی ریز ارائه می‌دهد و مناسب‌ترین گزینه برای انتخاب شبکه اصلی است. برای این تحقیق، شبکه‌بندی مستطیلی با تعداد ۱۳۵۰۰۰ سلول و ۱۳۹۵۴۳۶ گره انتخاب شده است. این انتخاب بر مبنای بزرگی سرعت روی خط مرکزی مقطع مورد تحلیل، مطابق شکل ۴ است. باید تاکید داشت که کنترل کیفیت مش در این مرحله، نقشی اساسی در دقت و پایداری محاسبات عددی دارد.

همواره در جریان‌های داخلی وجود ناحیه‌ی ورودی یا همان ناحیه‌ی کاملاً فراگیر مورد توجه است. در این پژوهش برای سیال خالص و عدد رینولدز برابر ۱۰ و با توجه به لایه‌ای بودن جریان، طول ورودی هیدرودینامیکی برابر (m) ۰٫۱۳ و طول ورودی گرمایی برابر (m) ۰٫۷۶۸ به دست آمده است. در اعداد رینولدز بالاتر طول ورودی افزایش یافته بطوریکه در رینولدز ۱۰۰ برای هیدرودینامیکی طول (m) ۰٫۱۳۰۳ و برای طول ورودی حرارتی مقدار (m) ۰٫۷۶۸ حاصل می‌شود. واضح است که پس از ناحیه‌ی ورودی حالت کاملاً فراگیر در مجرا رخ می‌دهد.

۷- ساختار داده‌های UDF

مناطق سلولی و نواحی صفحه‌ای (درحالت حجم محدود) در UDFها بصورت داده‌های رشته‌ای قابل دسترسی هستند. رشته، داده‌ای است که توسط فلوئنت تعریف شده است. مطابق شکل ۵ برای دسترسی به داده‌ها در یک رشته^۲ یا ناحیه^۳، باید نشانگر صحیحی را برای رشته ایجاد کرده و از حلقه‌ی ماکروی ایجاد شده توسط فلوئنت استفاده کنیم تا به هر عضو سلول^۴ یا سطح^۵ در آن رشته دست یابیم.



شکل ۴- مقایسه بزرگی سرعت در خط مرکزی مقطع عرضی کانال برای تعداد مش‌های مختلف

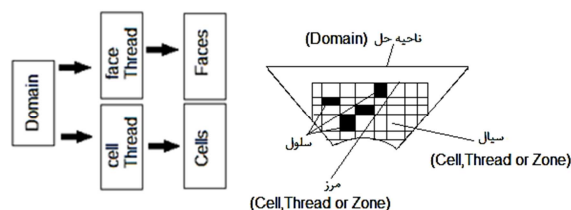
^۲ Thread

^۳ Zone

^۴ Cell

^۵ Face

^۱ Structure



شکل ۵- مناطق سلولی و نواحی صفحه‌ای در حالت حجم محدود در UDF

جدول ۴- نوع متغیر و مفهوم آن‌ها در توابع udf

نوع	متغیر	مفهوم
Domain	*d;	d اشاره به رشته‌ی دامنه (domain) thread دارد.
Thread	*t;	t اشاره به رشته (thread) دارد.
Cell-t	C;	c اشاره به متغیر رشته‌ی سلول (cell) thread variable دارد.
Face-t	f;	f اشاره به متغیر رشته‌ی سطح (face) thread variable دارد.

از ماکروهای حلقه‌ای برای تعیین خواص بهره گرفته شده است و از کد نویسی نیز برای دریافت متغیرهای خروجی مورد نظر و بررسی روند تغییرات آن‌ها در طول کانال استفاده شده است. زیرا بطور مثال نرم افزار فلوئنت در محاسبه‌ی عدد ناسلت به شدت خطا داشته و علت آن هم عدم محاسبه‌ی دمای بالک (میانگین) سیال در هر مقطع است که به جای آن از دمای تعیین شده در قسمت رفرنس استفاده می‌نماید و این امر در مسائل، منجر به بروز خطایی در حد ۲۰٪ تا ۳۰٪ خواهد شد. در نتیجه برای محاسبه‌ی دمای بالک و ناسلت موضعی استفاده از udf ها ضروری است.

جدول ۵- ماکروهای حلقه‌ای به کار رفته در udf

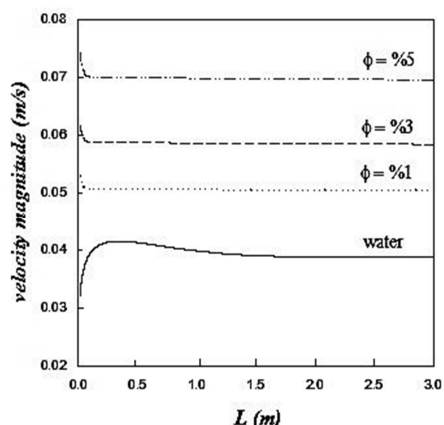
thread_loop_c(ct,d){ }	d حلقه روی همه‌ی cell thread ها در دامنه
thread_loop_f(ft,d){ }	d حلقه روی همه‌ی face thread ها در دامنه
begin_c_loop(c,t) {.....} end_c_loop(c,t)	t حلقه روی همه‌ی سلول‌ها در cell thread
begin_f_loop(f,f_thread) {.....} end_f_loop(f,f_thread)	f-thread حلقه روی همه‌ی وجه‌ها در face thread

۸- نتایج

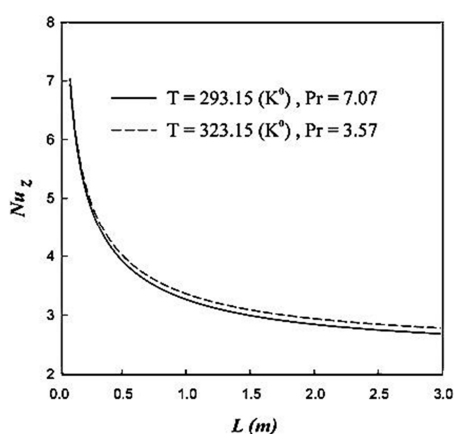
پس از اطمینان از صحت روش حل، به بررسی اثر پارامترهای مختلف می‌پردازیم. در جریان سیال خالص و همچنین جریان نانوسیال، عدد ناسلت در ابتدای کانال مقدار بزرگی داشته و با پیشروی در امتداد طول کانال تا مقادیر مجانبی‌اش (جریان کاملاً فراگیر) کاهش می‌یابد. این عدد معیاری برای انتقال گرمای جابجایی برای سطح در تماس با جریان سیال به شمار می‌آید. در هر غلظت حجمی و قطر ثابت نانو ذره، با افزایش عدد رینولدز مقدار عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. با مقایسه-ی مقادیر متوسط کمیت‌ها می‌توان به وضوح نتایج حاصل شده را شرح داد. بنابراین مقادیر متوسط عدد ناسلت برای غلظت و رینولدزهای

مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در رینولدز برابر ۱۰۰ با افزایش درصد غلظت نانوذرات از ۲٪ به ۵٪، ناسلت متوسط ۱۷/۶٪ و در رینولدزهای ۵۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب ۸/۶٪ و ۸/۸٪ افزایش داشته است. همچنین در غلظت $\phi=5\%$ با افزایش عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۱۰۰۰ این افزایش مقدار ۹۸/۸۴٪ است که بیانگر تاثیر چشمگیر عدد رینولدز نسبت به سایر متغیرهای مورد نظر است و تاثیرپذیری افزایشی عدد ناسلت از پارامتر عدد رینولدز در مقایسه با تاثیر افزایش غلظت نانو ذره، قابل توجه است. این نتیجه‌گیری‌ها بصورت گسترده‌تر برای محدوده‌ی اعداد رینولدز مورد مطالعه، در جدول ۶ ذکر شده است. در رینولدز برابر ۱۰، درصد افزایش ناسلت متوسط نسبت به آب خالص و در کسر حجمی ۵٪، برابر ۵/۱۸٪ است. برای رینولدز ۱۰۰ در همان کسر حجمی درصد افزایش برابر ۱۰/۸۱٪ و در عدد رینولدز ۵۰۰ برای غلظت ۵٪، افزایش عدد ناسلت نسبت به آب خالص ۱۲/۲۸٪ است. همچنین در رینولدز ۷۵۰ این افزایش برابر ۲۰/۳۰٪ و در رینولدز برابر ۱۰۰۰ میزان افزایش برابر ۱۰/۱۶٪ است. در یک قطر ثابت برای نانو ذرات جامد با افزایش غلظت حجمی عدد ناسلت افزایش داشته و این افزایش، بهبود رفتار حرارتی جریان را به دنبال دارد. بنابراین کمترین نرخ تغییر برای عدد ناسلت در هر رینولدز برای غلظت‌های حجمی پایین است و بیشترین نرخ تغییر برای غلظت ۵٪ می‌باشد، که بالاترین غلظت به کار رفته در این پژوهش است. همچنین واضح است که شدت انتقال حرارت به تغییر غلظت نانو ذرات بستگی زیادی دارد. در شکل ۷ مشخص است که در شرایط یکسان، طول ورودی هیدرودینامیکی نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات اندکی بزرگ‌تر است و توسعه یافتگی کمی دیرتر رخ می‌دهد. اما توسعه یافتگی در جریان نانوسیال نسبت به سیال خالص زودتر حاصل شده است و طول ورودی در جریان نانوسیال کمتر است. همچنین می‌توان اشاره داشت که در ناحیه کاملاً توسعه یافته وجود نانوذرات اثر قابل ملاحظه‌ای بر پارامترهای هیدرودینامیکی جریان نداشته اما اثر آن‌ها بر پارامترهای حرارتی چشمگیر است. در ادامه با توجه به شکل ۸ این نتیجه‌گیری حاصل شده است که در جریان نانوسیال مقدار ناسلت به عدد پرانتل سیال پایه نیز بستگی دارد. در اینجا در فشار اتمسفر با افزایش دمای ورودی جریان و به دنبال آن کاهش عدد پرانتل، مشاهده می‌شود که عدد ناسلت افزایش داشته است و این میزان افزایش در ناحیه‌ی توسعه یافته‌ی حرارتی نسبت به ابتدای طول کانال، چشمگیرتر است، به عبارتی در جریان نانوسیال عدد ناسلت موضعی در طول ورودی گرمایی مستقل از پرانتل است. این نتیجه نیز حاصل می‌شود که در جریان نانوسیال تاثیر پذیری عدد ناسلت از تغییرات عدد رینولدز بیشتر از تغییرات عدد پرانتل است به طوری که با تغییر عدد رینولدز از ۱۰۰ به ۲۵۰ در غلظت ثابت ۵٪ مقدار ناسلت متوسط تقریباً نزدیک به ۲۲٪ افزایش دارد و با تغییر عدد پرانتل از ۷/۰۷ به ۳/۵۷ در همین شرایط و رینولدز ۱۰۰، مقدار ناسلت متوسط از مقدار ۳/۵۴ به ۳/۶۴ افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش ۲/۳٪ در عدد ناسلت متوسط جریان است. ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز به پارامترهایی چون چگالی، ویسکوزیته، رسانندگی گرمایی، گرمای ویژه، هندسه‌ی سطح و شرایط جریان بستگی دارد. این ضریب در کانال غیر دایره‌ای در پیرامون مجرا تغییر می‌کند و در گوشه‌ها به شدت کاهش می‌یابد مانند آنچه در شکل ۹ مشخص است.

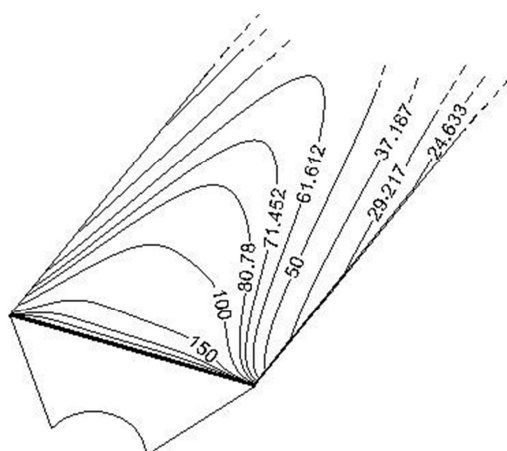
رینولدز ثابت بررسی شده است. شکل ۱۲ نیز تاثیرپذیری دمای بی‌بعد نانوسیال از تغییرات عدد رینولدز در یک غلظت ثابت را نشان داده است. مشخص است که با افزایش عدد رینولدز، دمای بی‌بعد کاهش یافته و این امر نتیجه‌ی افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در رینولدزهای بزرگ‌تر است.



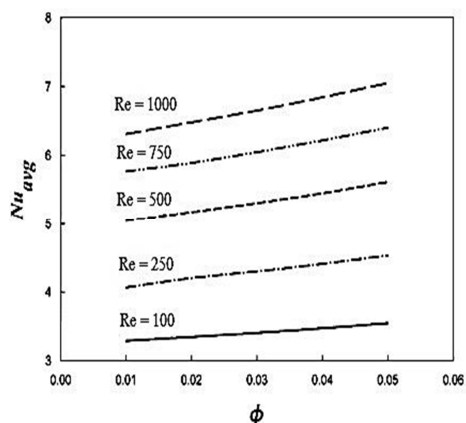
شکل ۷- مقایسه‌ی بزرگی سرعت در مرکز هندسه‌ی کانال برای آب و نانوسیال با غلظت‌های مختلف و $Re=750$



شکل ۸- مقایسه‌ی ناسلت موضعی با تغییر عدد Pr در $Re=100$ و $\phi=5\%$



شکل ۹- مقادیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در گوشه‌های کانال برای جریان نانوسیال در $Re=100$ و $\phi=5\%$



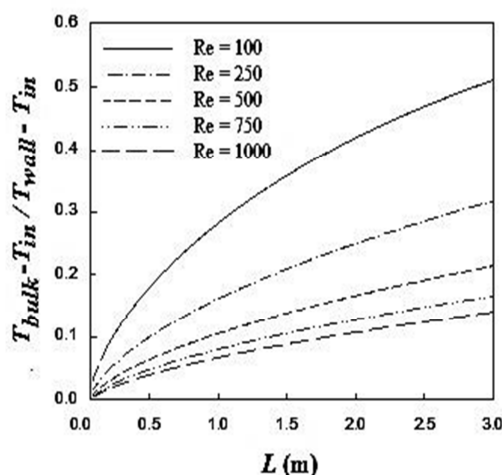
شکل ۶- مقایسه‌ی ناسلت متوسط در کسر حجمی و رینولدزهای مختلف

جدول ۶-مقایسه‌ی مقادیر عدد ناسلت متوسط نانوسیال در غلظت و

رینولدزهای مختلف

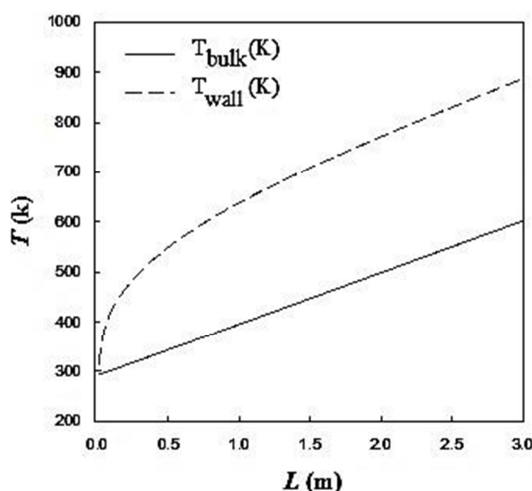
عدد رینولدز	$\phi=1\%$	$\phi=3\%$	$\phi=5\%$
$Re=10$	۲,۵۰۴	۲,۵۲۷	۲,۵۵۸
$Re=100$	۳,۲۸۹	۳,۴۰۶	۳,۵۴۶
$Re=500$	۵,۰۴۷	۵,۳۰۶	۵,۶۱۴
$Re=750$	۵,۷۶۸	۶,۰۴۸	۶,۴۰۳

به همین جهت است که هنگام استفاده از رابطه‌ی کانال با مقطع دایره‌ای در مجراهای غیر مدور، مقادیر عددی متوسط در محیط استفاده می‌شود. زیرا اینکه در گوشه‌های کانال، با ایجاد گردابه‌ها سطح تماس بین جریان سیال و دیواره‌ها کم شده است از این رو کاهش شدیدی در ضریب انتقال حرارت جابجایی ایجاد می‌شود. ضریب جابجایی در ورودی کانال بیشترین مقدار خود را دارا است زیرا ضخامت لایه‌ی مرزی گرمایی در ورودی مجرا صفر است که با گسترش لایه‌ی مرزی گرمایی، این ضریب سریعاً کاهش یافته و در ناحیه‌ی کاملاً توسعه یافته به مقدار ثابتی می‌رسد. در شکل ۱۰ مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در غلظت و رینولدزهای مختلف صورت گرفته است و در جدول ۷ نتایج این مقایسه به صورت عددی ذکر شده است. از آنجا که وجود انتقال گرمای جابجایی بین سطح و نانوسیال موجب می‌شود که دمای سیال با حرکت در امتداد طول کانال به طور پیوسته تغییر کند، از این‌رو برای تحلیل رفتار حرارتی و بررسی شرایط کاملاً فراگیر گرمایی، بهتر است جریان از نظر تغییرات دمایی آن نیز مورد تحلیل قرار گیرد. برای توصیف رفتار حرارتی جریان داخلی و در نبود دمای ثابت جریان آزاد، باید از دمای میانگین استفاده شود. دمای میانگین سیال (دمای بالک- دمای کپهای) در یک مقطع عرضی معین برحسب انرژی گرمایی انتقال یافته توسط سیال هنگام عبور از آن مقطع تعریف می‌شود و در مقاطع غیر دایره‌ای در حالت شار گرمایی یکنواخت، مشاهده شده است که دمای دیواره حول محیط مقطع تغییر می‌کند. از آنجا که دمای سیال نسبت به دمای ورودی آن، با پیشروی در طول کانال افزایش می‌یابد، دمای میانگین سیال دمای مرجع مناسبی برای جریان‌های داخلی است و همان نقش دمای جریان آزاد (T_{∞}) را برای جریان‌های داخلی ایفا می‌کند. در شکل ۱۱ تاثیرپذیری دمای بی‌بعد نانوسیال از تغییرات درصد حجمی نانوذرات در یک



شکل ۱۲- مقایسه‌ی دمای بی بعد برای $\phi = 1\%$ در رینولدزهای مختلف

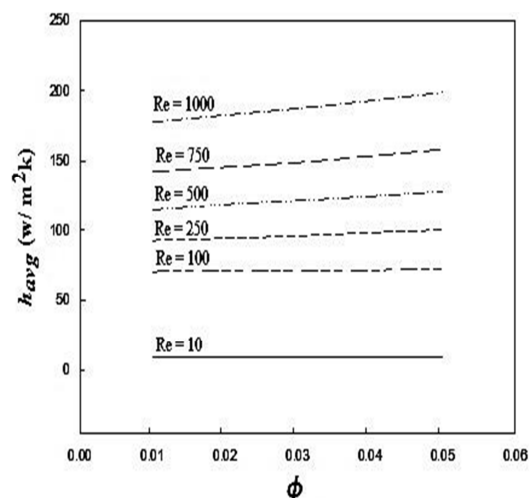
در شکل ۱۴ نیز به مقایسه‌ی دمای میانگین سیال و دمای دیواره-ی کانال در عدد رینولدز ۱۰۰ و کسر حجمی ۱٪ پرداخته شده است و نتایج آن در جدول ۹ آمده است. در شکل ۱۵ همان مقایسه با ثابت در نظر گرفتن عدد رینولدز و افزایش درصد کسر حجمی نانوذرات صورت گرفته است.



شکل ۱۳- مقایسه‌ی دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای جریان آب خالص در $Re = 100$

جدول ۸- مقایسه‌ی تفاضل دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای آب در $Re = 100$

مقطع مشخصی از کانال	$T_{wall} - T_{bulk}$	h (W/m^2K)
$L = 0.3$ (m)	۶۶/۱۱۳	۳۰۲/۵۱۳
$L = 0.5$ (m)	۲۰۵/۹	۹۷/۱۳۸
$L = 1$ (m)	۲۴۲/۸۰۵	۸۲/۳۷۰
$L = 1.8$ (m)	۲۶۸/۴۳۵	۷۴/۵۰۶
$L = 2$ (m)	۲۷۲/۲۶۵	۷۳/۴۶
$L = 2.99$ (m)	۲۸۴/۶۰۳	۷۰/۲۷۳
$L = 3$ (m)	۲۸۴/۷۳	۷۰/۲۴۲

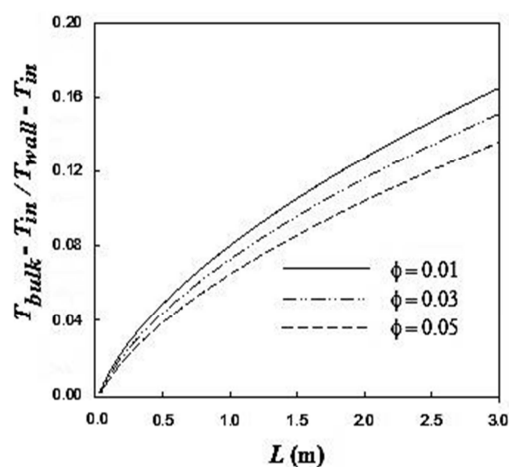


شکل ۱۰- مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط در کسر حجمی و رینولدزهای مختلف

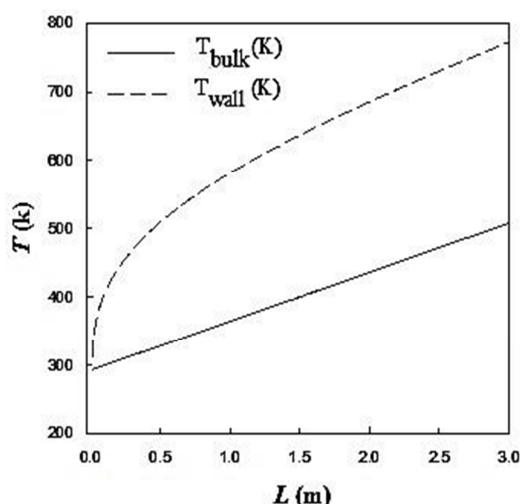
جدول ۷- مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت جابجایی در $Re = 100$

کسر حجمی ذرات نانو	h_{avg} (W/m^2K)	h_{avg} درصد افزایش نسبت به آب خالص
آب خالص	۸۸/۹۹	-
$\phi = 1\%$	۹۳/۷۹	۵/۳۹٪
$\phi = 2\%$	۹۵/۶۲	۷/۴۵٪
$\phi = 3\%$	۹۷/۴	۹/۴۵٪
$\phi = 4\%$	۹۹/۴۶	۱۱/۶۵٪
$\phi = 5\%$	۱۰۱/۶۳	۱۴/۲۰٪

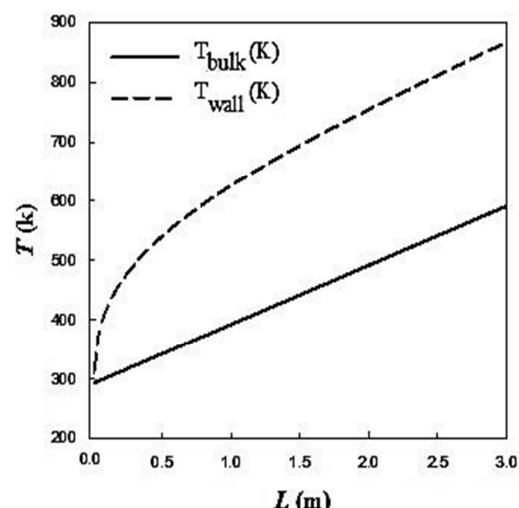
با افزایش درصد حجمی ذرات نانو، کاهش قابل توجهی در دمای بی بعد جریان حاصل شده است که به معنای افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی است. واضح است که دمای میانگین در امتداد کانال به طور خطی تغییر یافته و با افزایش درصد حجمی نانوذرات، کاهش می-یابد. در شکل ۱۳ به مقایسه‌ی دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال در رینولدز ۱۰۰ پرداخته شده است. نتایج آن به صورت عددی در جدول ۸ ارائه شده است.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی دمای بی بعد در $Re = 750$ بر اساس کسر حجمی نانوذرات



شکل ۱۵- مقایسه‌ی دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای کسر حجمی $\phi=5\%$ در $Re=100$



شکل ۱۴- مقایسه‌ی دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای کسر حجمی $\phi=1\%$ ذرات نانو در $Re=100$

جدول ۹- مقایسه‌ی تفاضل دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای کسر حجمی $\phi=1\%$ در $Re=100$

مقطع مشخصی از کانال	$T_{wall}-T_{bulk}$	$h (W/m^2K)$
$L=0.3 (m)$	۶۸.۳	۲۹۲.۹
$L=0.5 (m)$	۱۰۸.۶۵	۱۰۰.۷
$L=1 (m)$	۲۴۳	۸۵.۵
$L=1.8 (m)$	۲۸۵.۷۲	۷۷.۳۰۴
$L=2 (m)$	۲۶۲.۴۴	۷۶.۲۰۷
$L=2.99 (m)$	۲۴۷.۶	۷۲.۸۳۴
$L=3 (m)$	۲۷۴.۷	۷۲.۸۰

جدول ۱۰- مقایسه‌ی تفاضل دمای میانگین (بالک) سیال و دمای دیواره‌ی کانال برای کسر حجمی $\phi=5\%$ در $Re=100$

مقطع مشخصی از کانال	$T_{wall}-T_{bulk}$	$h (W/m^2K)$
$L=0.3 (m)$	۶۰.۶۲	۳۲۹.۹۱۷
$L=0.5 (m)$	۱۸۱.۱۳	۱۱۰.۴۲
$L=1 (m)$	۲۱۷.۳	۹۲.۵۱۳
$L=1.8 (m)$	۲۴۵	۸۱.۶۵۴
$L=2 (m)$	۲۴۹.۳۰۵	۸۰.۲۲۳
$L=2.99 (m)$	۲۶۳.۹۹	۷۵.۷۶
$L=3 (m)$	۲۶۴.۱۴	۷۵.۷۱۸

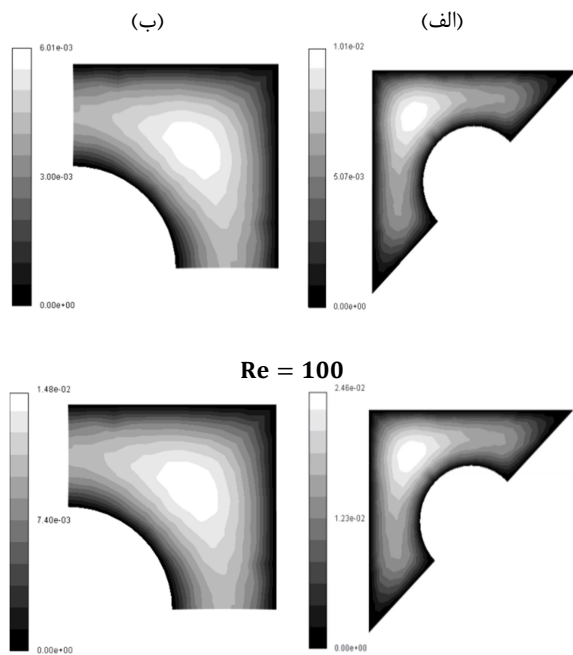
از مقایسه‌ی افت فشار در جریان نانوسیال با سیال خالص مشخص است که در جریان نانوسیال افت فشار افزایش یافته و این امر باعث بالا رفتن توان پمپاژ می‌گردد.

اختلاف فشار ورودی و خروجی در استفاده از آب خالص برابر 0.4712 است که با استفاده از نانوسیال و افزایش غلظت حجمی در یک قطر مشخص از نانوذرات، اختلاف فشار نیز افزایش پیدا کرده و این

نتایج حاصل از نمودار ۱۵ در جدول ۱۰ به صورت عددی ذکر شده است. با مقایسه‌ی مقادیر جداول ۸، ۹ و ۱۰ می‌توان گفت تفاضل دمای دیواره و دمای میانگین، در طول کانال متغیر است. این تفاضل در ابتدا به علت بزرگ بودن مقدار ضریب جابجایی، در ورودی کانال کوچک بوده اما با پیشروی در امتداد کانال، افزایش یافته زیرا ضریب انتقال حرارت جابجایی با گسترش لایه‌ی مرزی کاهش می‌یابد. در هر بخشی از کانال که مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی مستقل از امتداد طول کانال باشد تفاضل مذکور هم همین رفتار را نشان می‌دهد. همچنین از مقایسه‌ی نتایج مندرج در این جداول مشخص است که برای جریان نانوسیال نسبت به سیال خالص، تفاوت کم‌تری بین دمای میانگین جریان و دمای دیواره‌ی کانال وجود دارد.

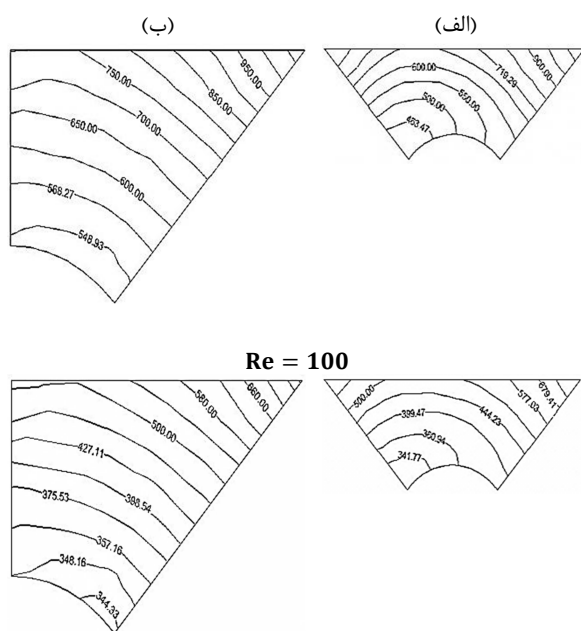
به وضوح مشاهده می‌شود که دمای بالک (میانگین) جریان سیال به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش درصد حجمی ذرات، کاهش می‌یابد. به طور مثال برای یک نرخ جریان جرمی ثابت برابر 0.29 کیلوگرم برثانه، میانگین دمای بالک سیال دارای مقدار تقریبی $311/442$ کلوین برای غلظت 2% و برابر $307/389$ برای غلظت 5% است، و با در شرایط نرخ جریان جرمی برابر 0.387 کیلوگرم برثانه، متوسط دمای میانگین سیال دارای مقدار $447/82$ برای آب خالص، و مقدار $400/753$ برای غلظت 1% نانوسیال است. به نظر می‌رسد چنین روند کاهشی در دمای بالک جریان نانوسیال تقریباً همیشه در محدوده‌های مختلف نرخ جریان جرمی ظاهر می‌شود. از طرف دیگر به وضوح مشخص است در غلظت ثابت نانو ذرات، دمای میانگین سیال با افزایش نرخ جریان جرمی کم شده است. نسبت این کاهش در مقایسه با متغیر کسر حجمی، کمتر بوده و علت این است که در عمل افزایش نرخ جریان جرمی که متاثر از افزایش عدد رینولدز است، افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی را نیز به دنبال دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افزایش انتقال حرارت همانطور که به غلظت حجمی ذرات نانوسیال بستگی دارد، به نرخ جریان جرمی سیال نیز مربوط است. که باز هم اشاره‌ای به تاثیر عدد رینولدز جریان است.

در صنعت اغلب افت فشار لازم برای حفظ جریان داخلی اهمیت دارد زیرا این پارامتر، تعیین کننده‌ی قدرت پمپ یا فن خواهد بود.



Re = 250

شکل ۱۷- کانتور خطوط جریان در مقطع خروجی کانال



Re = 250

شکل ۱۸- خطوط دما در مقطع خروجی کانال

۱۰- نتیجه گیری

در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی اجباری در کانال با مقطعی غیر مدور و غیر منتظم حاوی نانوسیال آب - آلومینا، بررسی شد. معادلات حاکم توسط الگوریتم سیمپل حل شده‌اند. به طور کلی مشاهده شد که حضور صفحه نگهدارنده منجر به رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی متفاوتی در کانال می‌شود. بیشترین تاثیر در بهبود رفتار حرارتی جریان به ترتیب ناشی از تغییر عدد رینولدز سپس کسر

افزایش با روند افزایش عدد رینولدز تا ۱۰۰۰ و نیز افزایش کسر حجمی ذرات نانو از ۱٪ تا ۵٪، محسوس‌تر است.

میزان افت فشار در غلظت نانوسیال برابر ۵٪ و عدد رینولدز برابر ۱۰۰ حدود ۲۲۱ برابر جریان سیال آب خالص شده است. این افزایش در غلظت ۱٪ حدود ۱۸۵ برابر است که موجب افزایش چشمگیر توان پمپ در فرایند پمپ کردن جریان نانوسیال خواهد شد. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز برای مقادیر ثابت غلظت حجمی نیز موجب افزایش انتقال حرارت و افت فشار می‌گردد.

در تحلیل تنش برشی جریان سیال در طول کانال مشخص است که به طور کلی گرانروی دینامیکی نانوسیالات وابستگی شدیدی به دما و درصد حجمی نانوذرات دارد، به طوریکه با افزایش درصد حجمی در شرایط دمای معین، گرانروی افزایش می‌یابد. اما در تراکم ذره‌ی معین با افزایش دما شاهد کاهش گرانروی خواهیم بود.

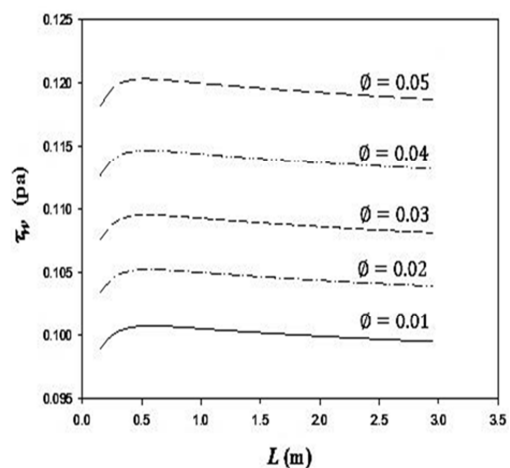
به عبارتی با پیشروی جریان نانو سیال در مجرا دمای میانگین دیواره‌ی کانال و دمای متوسط فلاکس جرمی سیال افزایش یافته و این تغییرات دما روی حرکت براونی و برهم‌کنش‌های نانو ذرات در نانوسیال تاثیر گذار است و باعث کاهش گرانروی مخلوط در طول کانال شده است.

همچنین افزایش عدد رینولدز باعث افزایش مقادیر تنش برشی شده است. با توجه به فرمول‌های (۱۴) و (۲۲)، در شکل ۱۶ روند تغییرات تنش برشی در رینولدز ۱۰۰۰ برای غلظت‌های مختلف نمایش داده شده است.

۹- مقایسه نتایج در دو حالت وجود و نبود صفحه نگهدارنده

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ مقایسه‌ای بین کانتورهای خطوط جریان و خوط هم‌دم در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۲۵۰ برای دو هندسه متفاوت مقطع عبوری جریان، انجام شده است.

همانگونه که از مقایسه نتایج مشخص است وجود صفحہی نگهدارنده در مقایسه با حالتی که صفحہ وجود ندارد تفاوت‌هایی را در رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی جریان ایجاد کرده است. کانتورها و خطوط دمای، نشان داده شده مربوط به مقطع خروجی مجرا هستند.



شکل ۱۶- بررسی تغییرات تنش برشی در طول کانال و $Re=1000$

- using two-phase mixture model, Applied Thermal Engineering., vol. 28, pp. 717-727, 2008
- [4] Pishkar I. and Ghasemi B., Effect of nanoparticles on mixed convection heat transfer in a horizontal channel with heat source, Modares Mechanical Engineering, vol. 12, no. 2, pp. 95-108, 2012. (In Persian)
- [5] Vasefi B. I. and Alizadeh M., A Numerical Investigation of CuO-Water Nanofluid in Different Geometries by Two-Phase Euler-Lagrange Method, World Appl. Sci. Journal., vol. 26, No. 10, pp. 1323-1329, 2013
- [6] Heris S. Z., Noei SH., Talaii E., Sargolzaei J., CuO/Water Nanofluid Heat Transfer Through Triangular Ducts, Iranian Journal of Chemical Engineering Vol. 9, No. 1 (Winter), IACHE, 2012
- [7] Ho C. J., Chen M. W., Li Z. W., Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, No. 17-18, pp. 4506-4516, 2008.
- [8] Ben Mansour R., Galanis N., Nguyen C. T., Developing laminar mixed convection of nanofluids in an inclined tube with uniform wall heat flux, International Journal of Numerical Methods for heat and fluid flow, Vol. 19, No. 2, pp. 146-164, 2009.
- [9] Nguyen C. T., Roy G., Gauthier C., and Galanis N., Heat transfer enhancement using Al₂O₃-water nanofluid for an electronic liquid cooling system, Applied Thermal Engineering., vol. 27, No. 8-9, pp. 1501-1506, Jun. 2007
- [10] Heris S. Z., Esfahany M. N., and Etemad G., Numerical Investigation of Nanofluid Laminar Convective Heat Transfer through a Circular Tube., Heat Transfer. Part A Appl, vol. 52, No. 11, pp. 1043-1058, Sep. 2007
- [11] Shah R. K., London A. L., Laminar Flow Forced Convection In Ducts, Chemical Engineering Department, Academic Press New York, San Francisco, London, pp. 350-355, 1978.
- [12] Zhang LZ., Laminar flow and heat transfer in plate-fin triangular ducts in thermally developing entry region, International Journal of Heat and Mass transfer, Vol. 50, No.7-8, pp.1637-1640, 2007.
- [13] Heyhat M. M. and Kowsary F., Effect of Particle Migration on Flow and Convective Heat Transfer of Nanofluids Flowing Through a Circular Pipe, Journal Heat Transfer, vol. 132, No. 6, p. 062401, 2010
- [14] Mehrzad salakjani S., Kalteh M., Majlesi, Numerical study of flow and heat transfer in a channel between a square and solid tubes located in the center of it, Proceedings of The 5th Conference of heat exchangers, Tehran, Iran, MOBADDEL05-020, November21, 2013. (in Persian فارسی)
- [15] Pak B., Cho Y. I., Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, Experimental Heat Transf, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.
- [16] Hamilton R. L., Crosser O. K., Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems, Industrials and Engineering Chemistry Fundamentals, Vol. 1, No. 3, pp. 187-191, 1962.
- [17] Kalteh M., Abbassi A., Saffar-Avval M., Frijns A., Darhuber A., Harting J., Experimental and numerical investigation of nanofluid forced convection inside a wide microchannel heat sink, Applied Thermal Engineering, Vol. 36, PP: 260-268, 2012
- [18] Chon C. H., Kihm K. D., Lee S. P., Choi S. U. S., Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al₂O₃) thermal conductivity enhancement, Applied Physics Letters, Vol. 87, No. 15, pp. 1-3, 2005.
- [19] Nguyen C. T., F. Desgranges, Roy G., Galanis N., Mar'e T., Boucher S., Mints H.A., Temperature and particle-size dependent viscosity data for waterbased nanofluids-hysteresis phenomenon, International Journal of Heat Fluid Flow, Vol. 28, No 6, pp. 1492-1506, 2007.
- [20] Sider E. N., Tate G. E., Heat transfer and pressure drop of liquids in tubes, Industrial & Engineering Chemistry, Vol. 28, No. 12, pp. 1429-1435, 1936.

حجمی نانو ذرات و در نهایت تغییر عدد پرانتل برای قطر ثابتی از نانوذرات است. همچنین در همه اعداد رینولدز، افزایش در صد حجمی نانو ذرات باعث افزایش عدد ناسلت شده که در اعداد رینولدز کوچک کمتر است. زیرا در رینولدزهای کوچک برخورد ملکولی کاهش یافته و در نتیجه اثر ضریب هدایت نانوسیال کمتر می‌باشد. همچنین افزایش عدد رینولدز برای مقادیر ثابت غلظت حجمی باعث افزایش افت فشار شده است.

۱۱- فهرست علائم

c_p	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kgK)
f	ضریب اصطکاک مودی
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m^2k^{-1})
K	ضریب هدایت گرمایی ($Wm^{-1}k^{-1}$)
p	فشار (Pa)
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
u	سرعت در جهت x (ms^{-1})
v	سرعت در جهت y (ms^{-1})
w	سرعت در جهت z (ms^{-1})
z	راستای طول کانال (m)
Nu	عدد ناسلت
T	دما (K)

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})
ϕ	کسر حجمی نانوذرات
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})

زیر نویس‌ها

avg	مقدار میانگین
bf	سیال پایه
bulk	مربوط به دمای میانگین سیال
nf	نانو سیال
p	نانو ذره
in	ورودی سیال
wall	دیواره

۱۲-مراجع

- [1] Choi SUS., In: Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In Developments and Applications of Non-Newtonian Flows. Volume, FED-231/MD-66. Siginer DA, Wang HP, editor. ASME, New York; pp. 99-105, 1995.
- [2] Murshed S. M. S., & Castro N., Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in Minichannel, in Two Phase Flow, Phase Change and Numerical Modeling, Ed, A. Ahsan, Chapter 18, pp.419-434, INTECH, Vienna, 2011.
- [3] Mirmasoumi S. and Behzadmehr A., Numerical study of laminar mixed convection of a nanofluid in a horizontal tube