

شبیه سازی عددی انتقال حرارت جریان نانو سیال آب- آلومینیوم درون کانال سینوسی همراه با محیط متخلخل

داود طغرای¹، سامان نظری²

* نویسنده مسئول: Davoodtoghraie@gmail.com

واژه‌های کلیدی

کانال سینوسی، انتقال حرارت جابجایی،
جریان آرام، محیط متخلخل

چکیده

در این تحقیق انتقال حرارت نانو سیال آب- آلومینیوم در یک کانال سینوسی حاوی محیط متخلخل در عدد رینولدز 200 مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مطالعات انجام گرفته، انتقال حرارت نانو سیال در کانال سینوسی حاوی محیط متخلخل به طور کامل بررسی نشده است و مطالعات عمیق تری در این خصوص نیاز است. در این تحقیق نانو سیال آب- آلومینیوم در درصد های حجمی گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. شرط شار حرارتی ثابت در دیواره بالا و پایین لحاظ شده و جریان دو بعدی، آرام، تراکم ناپذیر و پایا در نظر گرفته شده است. صحت سنجی مسئله نیز با استفاده از روابط تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که با افزایش کسر حجمی و همچنین کاهش عدد دارسی که بیانگر نفوذپذیری محیط متخلخل است، عدد ناسلت متوسط و ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد.

1- استادیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

1- مقدمه

علم انتقال حرارت یکی از مهمترین و پرکاربردترین علوم مهندسی است که با توجه به لزوم مدیریت انرژی و صرفه جویی در مصرف انرژی اهمیت آن چندین برابر می شود. در این مسیر یافتن راهکارهای مفید که بتواند موجب کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری گردد ارزشمند است. بهینه سازی تجهیزات انتقال حرارت جهت رسیدن به راندمان بالاتر انرژی نیازمند تمرکز بر کوچک سازی تجهیزات از یک سو و افزایش انتقال حرارت به ازای واحد سطح از سوی دیگر است. محیط متخلخل به خاطر ساختار خود سطح انتقال حرارت بزرگی را در یک حجم مشخص فراهم می کند. از این رو بررسی انتقال حرارت در محیط متخلخل در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. انتقال حرارت جابجایی در محیط متخلخل موضوع تحقیقات بسیاری در شاخه‌های کاربردی نظیر خنک کاری قطعات الکترونیکی، مطالعه راکتورهای بستر دانه ای، ذخیره سازی زباله مواد هسته ای و رادیواکتیو، کانالیزورها، مبدل های حرارتی فشرده، محفظه های احتراق و بسیاری دیگر بوده است. آهوچا [1] ذرات با ضریب هدایت گرمایی بالا را در ابعاد میکرو، میلی متر در سیال پایه پراکنده کرد و نتیجه گرفت که استفاده از ذرات بزرگ موجب خوردگی لوله ها، افت فشار و رسوب منجر می شود. ابراهیم نیا و همکاران [2] عملکرد حرارتی و افت فشار جریان نانو سیال در یک لوله صاف در جریان آرام و تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها اکسید آلومینیوم، اکسید مس و چند نانو ذره دیگر را با کسر حجمی 0% تا 6% در سیال پایه آب و مخلوط آب و اتیلن گلیکول که به عنوان سیال عامل برای شبه سازی رفتار جریان و انتقال حرارت نانو سیال استفاده می شود، را پراکنده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد کسر حجمی نانوذره، حرکت براونی و نسبت منظری نانو ذره مشابه عدد رینولدز ضریب انتقال حرارت را افزایش می دهد، در صورتی که قطر ذرات اثر معکوس دارد. بیانکو و همکاران [3] انتقال حرارت جابجایی جریان مغشوش نانو سیال را داخل لوله دایره را به صورت عددی بررسی کردند. آنان نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم را داخل لوله ای با شار حرارتی ثابت

بررسی کردند و مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به سیال پایه افزایش می یابد. همچنین افزایش انتقال حرارت با افزایش غلظت ذرات و عدد رینولدز افزایش می یابد. کیم و همکاران [4] اثر نانو سیال بر انتقال حرارت جابجایی در جریان آرام و مغشوش را داخل یک لوله صاف بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر حجمی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. بیان و همکاران [5] مشخصه های جریان و انتقال جرم داخل لوله سینوسی متقارن محوری به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که طول موج و دامنه لوله دیواره سینوسی مشخصه های جریان سیال و انتقال جرم را تحت تاثیر قرار می دهند. حیدری و کرمانی [6] تاثیر نانوذرات بر جابجایی اجباری در کانال سینوسی را بررسی کردند. آن‌ها معادلات حاکم را با روش حجم معیار بر اساس روش سیمپل حل کردند. نتایج آن‌ها تطابق خوبی با مقالات داشت. آن‌ها از این مطالعه نتیجه گرفتند اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه و موجی ساختن دیواره ها بطور قابل ملاحظه ای حرارت مبادله شده بین دیوار و جریان را افزایش می دهد و افزایش رینولدز نیز به دلیل گرایش خطوط دما ثابت به سمت دیوار افزایش یابد. فتوکیان و نصر اصفهانی [7] انتقال حرارت جابجایی و افت فشار نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم را داخل لوله دایره ای در رژیم جریان مغشوش به صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اضافه کردن مقدار اندکی نانو ذره به سیال پایه انتقال حرارت را حداکثر تا 48% افزایش می دهد. همچنین افزایش کسر حجمی نانو ذرات بهبود انتقال حرارت را به دنبال دارد. میر معصومی و بهزادمهر [8] به صورت عددی اثر قطر نانو ذرات بر عملکرد انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با کاهش قطر نانو ذره ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. همچنین قطر نانو ذره اثر قابل توجهی روی ضریب اصطکاک سطحی ندارد. شنگ [9] پدیده جابجایی در محیط های متخلخل در سیستم های زمین گرمایی را مورد بررسی قرار داد. پولیکاکوس و کازمیرزاک [10] انتقال حرارت جابجایی طبیعی، در دو کانال، یکی با صفحات موازی و دیگری با مقطع

معادله ممنتوم، برای یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر، به صورت زیر است،

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

معادله ممنتوم، برای یک سیال نیوتنی تراکم ناپذیر، به صورت زیر است،

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} = -u_i \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial x_j} - k_{eff} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j} - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \tau_{kj} \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \quad (3)$$

که در روابط فوق u_j مولفه سرعت در امتداد x_j از محور مختصات، C_p ظرفیت گرمایی ویژه سیال، T دما، k_{eff} ضریب هدایت گرمایی موثر، و τ_{kj} تانسور تنش است.

طول ورودی گرمایی را می توان بصورت زیر بیان کرد،

$$\left(\frac{x_{fd,t}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re.Pr \quad (4)$$

طول ورودی هیدرودینامیکی از رابطه زیر محاسبه می شود،

$$\left(\frac{x_{fd,h}}{D} \right)_{lam} \approx 0.05 Re \quad (5)$$

برای محاسبه عدد ناسلت از رابطه زیر استفاده شده است،

$$Nu = \frac{\nu H \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_w}{T_w - T_b} \quad (6)$$

که در آن دمای بالک در داخل کانال توسط رابطه زیر

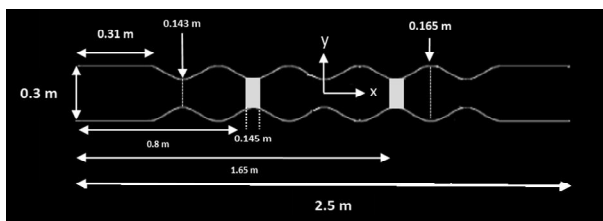
تعریف می شود،

$$T_b = \frac{\int_H u T dy}{\int_H u dy} \quad (7)$$

در محیط متخلخل از مدل تعادل گرمایی بین فازهای جامد و سیال استفاده شده است. محمد و کریم نشان دادند که فرض تعادل حرارتی فاز جامد و سیال در ماده متخلخل، در جریان های

دایروی را مورد بررسی قرار دادند، که در آنها لایه های متخلخل چسبیده به دیواره کانال بودند. آن ها با بررسی اعداد رینولدز، پرانتل، دارسی و پارامترهای هندسی، نتیجه گرفتند اثر پارامترهای فوق بر مشخصات جریان سیال و انتقال حرارت برای هر دو هندسه مشابه بوده و عدد ناسلت نسبت به ضخامت محیط متخلخل وابستگی خطی ندارد. الکم و الیمر [11] روش جدیدی برای جایگذاری ماده متخلخل در هر طرف دیواره داخلی مبدل های لوله ای هم مرکز، معرفی کردند. آن ها با حل عددی نشان دادند که استفاده از بلوک های متخلخل، تاثیر به سزایی در افزایش عملکرد مبدل دارد، گرچه افت فشار نیز به صورت متناظر افزایش می یابد.

در مطالعه حاضر جریان سیال به صورت تراکم ناپذیر، دوبعدی، دائم، با خواص ترموفیزیکی ثابت و در ورودی با دما و سرعت ثابت فرض شده است. شار حرارتی ثابت و یکنواخت $150 \text{ (W/m}^2\text{)}$ به دیواره بالا و پایین اعمال شده است و همچنین شرط عدم لغزش در دیواره ها برقرار است. طول کانال 2/5 متر و عرض آن 0/3 متر در نظر گرفته شده است. محیط متخلخل اول و دوم به فاصله 0/8 و 1/65 متر از ابتدای کانال قرار گرفته اند، همچنین قطر کانال در قسمت هگرا 0/143 متر و در قسمت واگرا 0/165 متر است.



شکل (1) هندسه مورد بررسی در کار حاضر

2- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی در واقع بیانی از پایستگی جرم بوده و به صورت زیر است،

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial(\rho u_2)}{\partial x_2} + \frac{\partial(\rho u_3)}{\partial x_3} = 0 \quad (1)$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + q_m''' \quad (10)$$

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + q_m''' \quad (11)$$

$$(\rho c)_m = (1 - \phi)(\rho c)_s + \phi(\rho c)_f \quad (11)$$

$$k_{eff} = (1 - \phi)k_s + \phi k_f \quad (12)$$

$$q_m''' = (1 - \phi)q_s''' + \phi q_f''' \quad (13)$$

با فرض پراکندگی یکنواخت نانوذرات درون سیال پایه، چگالی نانوسیالات عموماً از رابطه پاک و چو [13] محاسبه می‌شود،

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (14)$$

برای محاسبه ظرفیت گرمایی از رابطه ژوان و روتزل [14] استفاده می‌شود. این رابطه با فرض تعادل حرارتی در مقیاس نانو بین ذرات جامد و فاز مایع به کار می‌رود،

$$C_{p_{nf}} = \frac{\phi\rho_p C_{p_p} + (1 - \phi)\rho_{bf} C_{p_{bf}}}{\rho_{nf}} \quad (15)$$

مدل برینکمن [15] که برای ذرات جامد کروی و غلظت ذرات در حد متوسط است با رابطه زیر مشخص می‌شود،

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} / (1 - \phi)^{2.5} \quad (16)$$

همیلتون و کراسر [16] رابطه زیر را برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی مخلوط جامد- مایع ارائه کردند،

$$k_{nf} = \frac{k_p + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_p)\phi}{k_p + k_{bf} + (k_{bf} - k_p)\phi} k_{bf} \quad (17)$$

در جدول 1 خواص ترموفیزیکی نانو ذره اکسید مس و نانو سیال آب/ اکسید آلومینیوم برای کسر حجمی‌های 1 تا 3 درصد نشان داده شده است [17].

جدول (1) خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب- آلومینیوم

ϕ	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	$k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	$\mu (Pa \cdot s)$
--------	--------------------------------------	---	--	--------------------

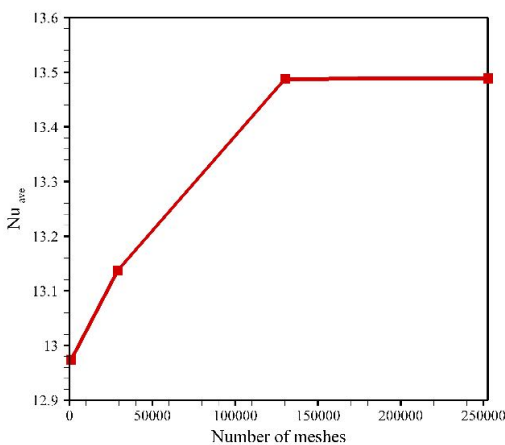
غیر واکنشی معتبر است. چون در مطالعه حاضر جریان سیال غیر واکنشی است در نتیجه استفاده از فرض تعادل حرارتی معتبر است. با میانگین گیری از المان های حجم محیط، برای فاز جامد خواهیم داشت [12].

$$(\rho c)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (\rho c)_s \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + q_s''' \quad (8)$$

$$\varepsilon(\rho c)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c)_f u \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \varepsilon q_f''' \quad (9)$$

که f و s به ترتیب به فازهای سیال و جامد مربوط هستند. C_p گرمای ویژه فاز جامد و C_p گرمای ویژه فاز سیال در فشار ثابت، k هدایت گرمایی و $q''' \left[\frac{W}{m^3} \right]$ گرمای تولید شده بر واحد حجم است. در نوشتن معادلات 8 و 9 فرض شده است که تخلخل سطح برابر با تخلخل است. این مورد به دلیل جملات هدایت است. به عنوان مثال $-k_s \nabla T_s$ شار حرارتی هدایتی از طریق جامد است، بنابراین $\nabla \cdot (k_s \nabla T_s)$ نرخ هدایت حرارتی خالص به حجم واحد جامد است. در معادله 8 عبارت $(1 - \varepsilon)$ بیانگر نسبت مقطع عرضی اشغال شده توسط فاز جامد به کل سطح مقطع عرضی محیط است. عبارت $u \cdot \nabla T$ نرخ تغییر دما در المان حجمی از طریق جابجایی سیال است. حاصلضرب این عبارت در $(\rho c)_f$ ، نرخ تغییر انرژی گرمایی سیال بر واحد حجم المان، از طریق جابجایی می‌باشد. با فرض $T_s = T_f = T$ معادلات 8 و 9 به صورت زیر تبدیل می‌شود [12].

برای بررسی استقلال حل از شبکه، از معیار عدد ناسلت به ازای پنج شبکه استفاده شده است. عدد رینولدز برابر 200 در نظر گرفته شده است. هندسه بررسی شده جهت استقلال حل از شبکه محاسباتی در شکل 3 آورده شده است. در شکل 4 تغییرات عدد ناسلت در شبکه های مختلف رسم گردیده است. در این شکل مشاهده می شود که در شبکه ای با تعداد 131131 گره، نتایج مستقل از شبکه محاسباتی می گردد و استفاده از این شبکه در مطالعه حاضر مناسب است.



شکل (4) نمودار بررسی استقلال حل از شبکه در عدد داری 4×10^{-2} و عدد رینولدز 200

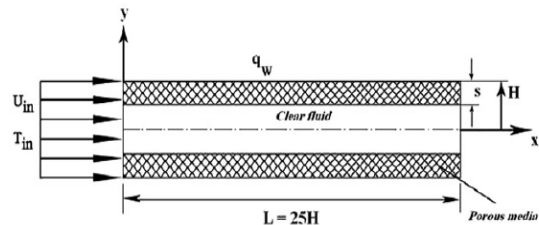
4- نتایج

شکل 5 ضریب انتقال حرارت جابجایی را به ازای پنج عدد داری مختلف بر حسب طول کانال و در عدد رینولدز 200 و کسر حجمی 1% نشان می دهد. در امتداد کانال ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر طول موج در قسمت همگرا از قسمت واگرا بیشتر است و در مکان هایی که ماده متخلخل وجود دارد ضریب انتقال حرارت افزایش یافته است.

%1	1026/8	4047	0/6408	0/00091367
%2	1056/6	3922/4	0/6691	0/00093716
%3	1086/3	3804/7	0/698	0/0009615

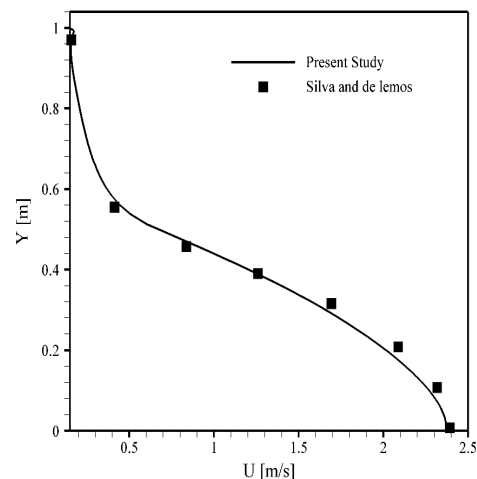
3- اعتبارسنجی و استقلال حل از شبکه

منظور حصول اطمینان از صحت نتایج عددی بدست آمده و درستی روش حل مورد استفاده در پژوهش حاضر، نتایج بدست آمده با نتایج سیلوا و دلموس [18] مقایسه شده است. بدین منظور جریان با عدد رینولدز 200 در داخل کانال با عرض 20 سانتی متر و طول 2/5 متر که نصف عرض کانال محیط متخلخل می باشد، شبیه سازی شده است (شکل 2).

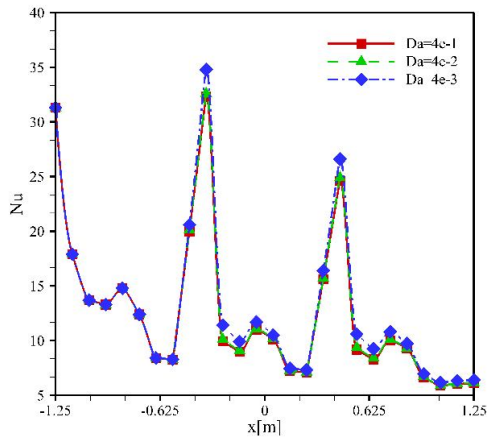


شکل (2) هندسه استفاده شده در مرجع

محیط متخلخل با ضریب تخلخل 0/6 و ضریب نفوذپذیری 0/000016 متر مربع می باشد. در شکل 3 توزیع سرعت توسعه یافته مطالعه حاضر با مطالعه سیلوا و دلموس مقایسه شده است و دیده می شود که تطابق خوبی بین دو نمودار وجود دارد.

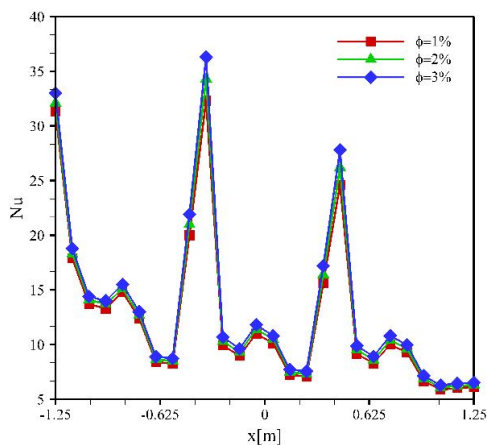


شکل (3) توزیع سرعت توسعه یافته برای کانال نیمه متخلخل و مقایسه آن با مطالعه سیلوا و دلموس [17]



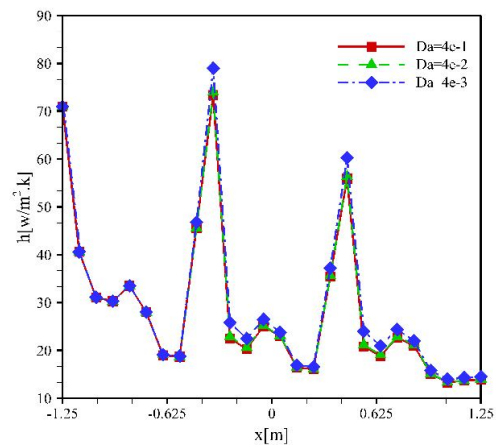
شکل (6) مقایسه عدد ناسلت در امتداد کانال به ازای اعداد دارسی مختلف

از شکل 7 می توان نتیجه گرفت که با افزایش کسر حجمی نانو ذرات عدد ناسلت در مقدار بیشینه خود، یعنی در مکان هایی که ماده متخلخل جایگزین شده است، به طور محسوس افزایش می یابد. افزایش کسر حجمی نانو سیال منجر به اغتشاش بیشتر و برهم خوردن لایه مرزی حرارتی می شود که افزایش انتقال حرارت را به دنبال دارد. بنابراین با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و کاهش سرعت، عدد ناسلت افزایش یافته است.



شکل (7) مقایسه عدد ناسلت در امتداد کانال به ازای کسر حجمی های مختلف

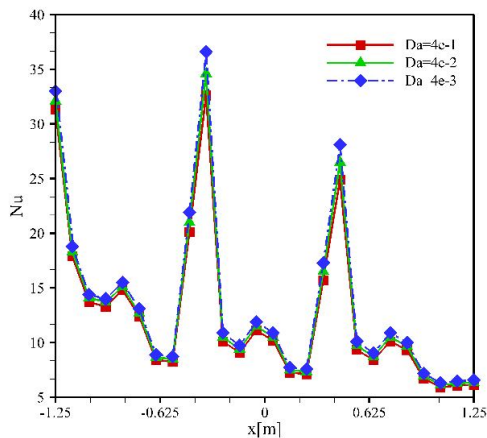
شکل 8 ضریب انتقال حرارت جابجایی در امتداد کانال را به ازای تغییرات کسر حجمی های مختلف نانو ذرات نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش کسر حجمی نانو ذره،



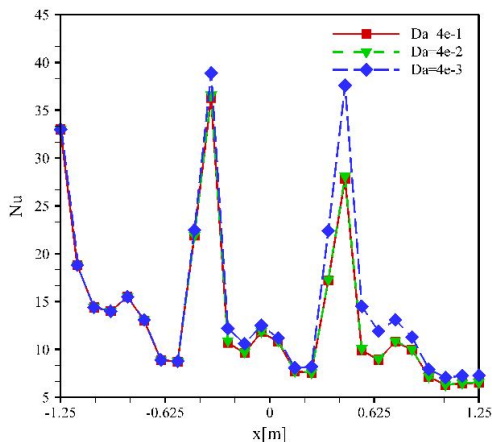
شکل (5) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در امتداد کانال به ازای اعداد دارسی مختلف

عدد دارسی بیانگر میزان نفوذپذیری محیط متخلخل است. برای بررسی انتقال حرارت مسئله نتایج به ازای نسبت ضریب هدایت حرارتی موثر محیط متخلخل به ضریب هدایت حرارتی سیال برابر $K_{eff} = 9\%$ و عدد رینولدز 200 در کسر حجمی 0/01 از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم ارائه شده است. نمودار عدد ناسلت در امتداد کانال برای اعداد دارسی مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. از نمودار مشخص است که با کاهش عدد دارسی عدد ناسلت در محیط متخلخل افزایش می یابد. در این حالت که تمام سطح مقطع کانال از ماده متخلخل پر شده است، با کاهش عدد دارسی و در واقع کاهش نفوذپذیری لایه متخلخل، سیال از درون محیط متخلخل نمی تواند عبور کند و لایه متخلخل، سیال را بیشتر از درون خود خارج و به سمت دیواره ها می راند و سبب کاهش اختلاف دمای بالک سیال و دمای دیواره می شود و بنابراین انتقال حرارت افزایش می یابد.

ضریب انتقال حرارت در گلوگاه جریان و همچنین محیط متخلخل افزایش قابل توجهی دارد ولی در ناحیه محدب اندکی افزایش می‌یابد که با توجه به رابطه ضریب هدایت گرمایی نانو سیال، با افزایش کسر حجمی ذرات، هدایت حرارتی نانو سیال زیاد می‌شود و که نتیجه آن افزایش ضریب انتقال حرارت است



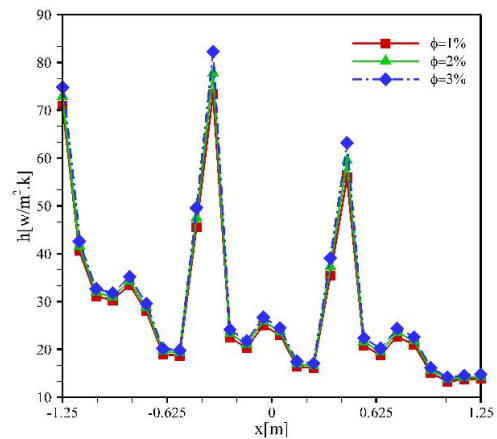
شکل (9) مقایسه عدد ناسلت در طول کانال به ازای اعداد دارسی مختلف در کسر حجمی 2%



شکل (10) مقایسه عدد ناسلت در طول کانال به ازای اعداد دارسی مختلف در کسر حجمی 3%

5- نتیجه گیری

در لوله سینوسی عدد ناسلت موضعی در هر طول موج در قسمت همگرا بیشتر از قسمت واگرا است. دلیل آن سرعت متوسط و گرادیان سرعت بالاتر در قسمت همگرا است که انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. برعکس آن، جریان معکوس نزدیک دیوار در قسمت محدب گرادیان سرعت پایینی دارد که نرخ انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. حداقل عدد ناسلت موضعی در بالادست جریان با فاصله کمی از حداکثر سطح مقطع در هر طول موج رخ می‌دهد. با افزایش فاصله محوری و تعداد طول موج، دامنه تغییرات عدد ناسلت با کاهش گرادیان دما در دیوار افزایش



شکل (8) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابجایی در امتداد کانال به ازای کسر حجمی های مختلف

بیشینه مقدار عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی در کسر حجمی 1% برای اعداد دارسی مختلف به صورت جدول 2 می‌باشد.

جدول (2) بیشینه مقدار عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت جابجایی در کسر حجمی 1%

Da	محیط متخلخل 1		محیط متخلخل 2	
	Nu	h	Nu	h
4×10^{-1}	32/3460	73/3824	24/6441	55/9092
4×10^{-2}	32/6210	74/0063	24/8647	56/4097
4×10^{-3}	34/8086	78/9691	26/5691	60/2766

- [۷] Fotukian, S., and Esfahany, M.N., *Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute γ -Al₂O₃/water nanofluid inside a circular tube*, International Journal of Heat and Fluid Flow, ۳۱, ۲۰۱۰, pp. ۶۰۶.۶۱۲.
- [۸] Mirmasoumi, S. and Behzadmehr, A., *Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube*, International journal of heat and fluid flow, ۲۹, ۲۰۰۸, pp. ۵۵۷.۵۶۶.
- [۹] Cheng, P., *Heat transfer in geothermal systems*, Advances in heat transfer, ۱۴, ۱۹۷۸, pp. ۱.۱۰۵.
- [۱۰] Poulikakos, D., and Kazmierczak, M., *Forced convection in a duct partially filled with a porous material*, ASME J. Heat Transfer, ۱۰۹, ۱۹۸۷, pp. ۶۵۳.۶۶۲.
- [۱۱] Alkam, M., Al-Nimr, M., and Hamdan, M., *Enhancing heat transfer in parallel-plate channels by using porous inserts*, International Journal of Heat and Mass Transfer, ۴۴, ۲۰۰۱, pp. ۹۳۱.۹۳۸.
- [۱۲] Targui, N., and Kahalerras, H., *Analysis of fluid flow and heat transfer in a double pipe heat exchanger with porous structures*, Energy Conversion and Management, ۴۹, ۲۰۰۸, pp. ۳۲۱۷.۳۲۲۹.
- [۱۳] Pak, B.C., and Cho, Y.I., *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*, Experimental Heat Transfer an International Journal, ۱۱, ۱۹۹۸, pp. ۱۵۱.۱۷۰.
- [۱۴] Xuan, Y., and Roetzel, W., *Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids*, International Journal of heat and Mass transfer, ۴۳, ۲۰۰۰, pp. ۳۷۰۱.۳۷۰۷.
- [۱۵] Brinkman, H., *The viscosity of concentrated suspensions and solutions*, The Journal of Chemical Physics, ۲۰, ۱۹۵۲, pp. ۵۷۱.۵۷۱.
- [۱۶] Hamilton, R., and Crosser, O., *Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems*, Industrial & Engineering chemistry fundamentals, ۱, ۲۰۰۳, pp. ۱۸۷.۱۹۱.
- [۱۷] Manca, O., Nardini, S., and Ricci, D., *A numerical study of nanofluid forced convection in ribbed channels*, Applied Thermal Engineering, ۳۷, ۲۰۱۲, pp. ۲۸۰.۲۹۲.
- [۱۸] Silva, R.A., and de Lemos, M.J., *Turbulent flow in a channel occupied by a porous layer considering the stress jump at the interface*, International Journal of Heat and Mass Transfer, ۴۶, ۲۰۰۳, pp. ۵۱۱۳.۵۱۲۱.

می یابد که به دلیل رشد لایه مرزی حرارتی در طول لوله است. در طول موج اول عدد ناسلت بیشترین مقدار را دارد و توزیع انتقال حرارت، الگوی مشابهی را برای تمام طول موج ها دنبال می کند و همچنین با افزایش عدد دارسی، عدد ناسلت موضعی افزایش می یابد.

6- علائم

H	ارتفاع کانال (m)
k	ضریب هدایت حرارتی (W / m.K)
c _p	ظرفیت گرمایی ویژه (J / kg.K)
Da	عدد دارسی $(Da = \frac{K}{\left(\frac{H}{\tau}\right)^2})$
?	لزجت دینامیکی (kg / m.s)
ν	لزجت سینماتیکی ($\frac{m^2}{s}$)

7- مراجع

- [۱] Ahuja, A.S., *Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. I. Experiments and results*, Journal of Applied Physics, ۴۶, ۱۹۷۵, pp. ۳۴۰۸.۳۴۱۶.
- [۲] Ebrahimnia-Bajestan, E., et al., *Numerical investigation of effective parameters in convective heat transfer of nanofluids flowing under a laminar flow regime*, International journal of heat and mass transfer, ۵۴, ۲۰۱۱, pp. ۴۳۷۶.۴۳۸۸.
- [۳] Bianco, V., Manca, O., and Nardini, S., *Numerical investigation on nanofluids turbulent convection heat transfer inside a circular tube*, International Journal of Thermal Sciences, ۵۰, ۲۰۱۱, pp. ۳۴۱.۳۴۹.
- [۴] Kim, D., et al., *Convective heat transfer characteristics of nanofluids under laminar and turbulent flow conditions*, Current Applied Physics, ۹, ۲۰۰۹, pp. e۱۱۹.e۱۲۳.
- [۵] Bian, Y., et al., *Effects of dimensions on the fluid flow and mass transfer characteristics in wavy-walled tubes for steady flow*, Heat and Mass Transfer, ۴۹, ۲۰۱۳, pp. ۷۲۳.۷۳۱.
- [۶] Heidary, H., and Kermani, M., *Effect of nanoparticles on forced convection in sinusoidal-wall channel*, International Communications in Heat and Mass Transfer, ۳۷, ۲۰۱۰, pp. ۱۵۲۰.۱۵۲۷.

