



## بررسی عددی اثر نانوسیال بر انتقال حرارت در لوله‌ی حاوی ماده متخلخل جزئی با جریان سیال مغشوش

علیرضا جمارانی<sup>1</sup>، مهدی معرفت<sup>2\*</sup>، مجید اسحق نیموری<sup>3</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل، آمل

\* تهران، صندوق پستی 14115-143، maerefat@modares.ac.ir

### اطلاعات مقاله

یادداشت پژوهشی

دریافت: 11 اردیبهشت 1395

پذیرش: 25 خرداد 1395

ارائه در سایت: 15 تیر 1395

کلید واژگان:

انتقال حرارت

جریان مغشوش

ماده متخلخل

نانوسیال

### چکیده

در مطالعه‌ی حاضر، تأثیر استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم بر روی انتقال حرارت در لوله‌ی حاوی ماده متخلخل جزئی و جریان مغشوش بصورت عددی بررسی شده است. بدین منظور لوله‌ی حرارتی در چهار ساختار مختلف مطالعه شده است: بدون ماده متخلخل، آکنده از ماده متخلخل، آرایش مرزی و مرکزی ماده متخلخل. نتایج حل عددی نشان می‌دهد که استفاده از ذرات نانو با تغییر خواص ترموفیزیکی سیال پایه، در کلیه حالات فوق انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد؛ اگرچه با استفاده از نانوسیال نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی در محیط متخلخل کمتر از ناحیه‌ی تمیز (بدون ماده متخلخل) است؛ در نتیجه، در آرایش مرزی ماده متخلخل، انتقال حرارت بهبود کمتر و در آرایش مرکزی بهبود بیشتری می‌یابد.

## Numerical investigation of nanofluid's effect on heat transfer in a pipe partially filled with porous material in a turbulent fluid flow

Alireza Jamarani<sup>1</sup>, Mehdi Maerefat<sup>1\*</sup>, Majid Eshagh Nimvari<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of engineering, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran

\* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, maerefat@modares.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Research Note

Received 30 April 2016

Accepted 14 June 2016

Available Online 05 July 2016

Keywords:

Heat Transfer  
Turbulent Flow  
Porous Material  
Nanofluid

### ABSTRACT

In the present study, effect of nanofluid aluminum oxide-water on heat transfer in a pipe partially filled with porous material in a turbulent flow is investigated numerically. In this regard, the heat pipe is studied in four structures: without porous material, filled with porous material, boundary and central arrangement of porous material. The results of numerical solution show that use of nano particles with changing thermo physical base fluid's properties, enhances heat transfer in all of the above structures. However, by using nanofluid, heat conduction enhancement ratio in porous medium is lower than clear medium (without porous material). As a result, heat transfer enhancement in boundary arrangement is less and in central arrangement it is more.

### 1- مقدمه

از ذرات نانو نیز سبب تغییر خواص ترموفیزیکی سیال عامل شده و در بهبود انتقال حرارت موثر است [2].

در ارتباط با اثرات ماده متخلخل جزئی بر نرخ انتقال محمودی و همکاران در سال 2011 بصورت تحلیلی و عددی انتقال حرارت درون لوله و یا کانال حاوی ماده متخلخل جزئی را برای جریان سیال آرام بررسی نمودند [4,3]. نتایج آن‌ها نشان داد که برای حالتی که ماده متخلخل به دیواره لوله یا کانال چسبیده باشد (آرایش مرزی)، با افزایش ضریب هدایت حرارتی ماده متخلخل می‌توان انتقال حرارت را بهبود بخشید. همچنین برای حالتی که ماده متخلخل در مرکز لوله یا کانال قرار می‌گیرد (آرایش مرکزی)، دبی

امروزه در صنعت بهبود عملکرد و بهینه‌سازی مصرف انرژی سامانه‌های حرارتی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از ماده متخلخل و یا ذرات نانو دو روش نوینی است که برای بهبود عملکرد سیستم‌های حرارتی حاوی جریان سیال کاربردی می‌باشد. محیط متخلخل به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت و همچنین دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالاتر نسبت به سیال عامل، انتقال حرارت را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد. به ویژه استفاده از ماده متخلخل در حالت جزئی به دلیل تغییر توزیع سرعت و ضخامت لایه مرزی افزایش نرخ انتقال حرارت شدیدی را در پی خواهد داشت [1]. استفاده

Please cite this article using:

A. Jamarani, M. Maerefat, M. Eshagh Nimvari, Numerical investigation of nanofluid's effect on heat transfer in a pipe partially filled with porous material in a turbulent fluid flow, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 255-258, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

مننوم، انرژی، انرژی جنبشی اغتشاشی و نرخ اتلاف آن بر اساس معادلات ارائه شده در تحقیقات پیشین پدراس و دلموس اعمال می‌گردد [11]. این معادلات به صورت کامل در مطالعات گذشته‌ی نویسندگان حاضر ارائه شده‌است [12,13]. برای شبیه‌سازی اغتشاش در محیط متخلخل نیز از مدل فلاح و همکاران استفاده گردید [14]. همچنین با استفاده از نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم خواص جدید سیال عامل شامل چگالی، گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی بترتیب بصورت روابط (1) تا (4) تصحیح می‌گردد و در معادلات حاکم از این خواص استفاده می‌گردد [15,16]:

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

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_p \quad (2)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4\overline{Re}^{0.4}Pr^{0.66}\left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10}\left(\frac{k_p}{k_f}\right)^{0.03}\phi^{0.66} \quad (3)$$

$$\overline{Re} = \frac{2\rho_f k_B T}{\pi\mu_f^2 d_p} \quad ; \quad Pr = \left(\frac{\mu C_p}{k}\right)_f \quad (3)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87(d_p/d_f)^{-0.3}\phi^{1.03}} \quad (4)$$

رابطه‌ی (3) و (4) برای شرایط غلظت حجمی ذرات نانو از 0.2 تا 9 درصد معتبر است. همچنین رابطه‌ی (3) برای دمای نانوسیال در بازه‌ی 294 تا 324 کلوین و رابطه‌ی (4) در بازه‌ی 293 تا 323 درجه کلوین معتبر است. در روابط (1) تا (4)،  $T_{fr} = 273.16$  دمای انجماد سیال آب،  $\phi$  درصد حجمی ذرات نانو،  $k$  ضریب هدایت حرارتی،  $\rho$  چگالی،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $C_p$  ظرفیت گرمایی،  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $Pr$  عدد پرانتل را نشان می‌دهد. همچنین  $d_p$  قطر ذرات نانو و  $d_f$  قطر معادل مولکولی سیال است که در این مطالعه بترتیب برابر با 25 و 0.3 نانومتر در نظر گرفته شده است. زیر نویس  $f$ ،  $nf$  و  $p$  نیز نشانگر سیال و نانوسیال و ذرات نانو است. همچنین خصوصیات ترموفیزیکی ذرات اکسید آلومینیوم بصورت زیر است [17]:

$$\rho_p = 3970 \text{ kg m}^{-3}; (C_p)_p = 765 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}; k_p = 36 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

ضریب هدایت حرارتی در نانوسیال در جریان مغشوش و همچنین ضریب هدایت حرارتی کل معادله انرژی بترتیب از رابطه‌های (5) و (6) حاصل می‌شود. رابطه‌ی (6) که برای استفاده از ماده متخلخل فلزی با ضریب هدایت بالا در سیال پایه‌ی آب می‌باشد استفاده شده که در آن  $k_s$  برابر با ضریب هدایت ماده متخلخل است [18]:

$$k_{nf,tur} = \left(k_{nf} + C_{p,nf} \frac{\mu_{nf}\phi}{\sigma_T}\right); \sigma_T = 0.9 \quad (5)$$

$$k_{eff} = \phi k_{nf,tur} + 0.195(1 - \phi)^{0.763}k_s \quad (6)$$

### 2-3- شرایط مرزی و حل عددی

از آنجا که لوله‌ی حرارتی مورد مطالعه متقارن محوری است لذا می‌توان فضای حل را تنها در دو بعد طولی و شعاعی در نظر گرفت. بر روی دیواره لوله شرط عدم لغزش و دما ثابت لحاظ می‌گردد. در محور تقارن لوله، گرادیان کلیه‌ی متغیرها در جهت شعاعی برابر با صفر است. در ورودی لوله، جریان با سرعت و دمای یکنواخت وارد می‌گردد. در خروجی لوله نیز با اعمال شرط توسعه‌یافتگی، گرادیان تمامی متغیرها در جهت محوری برابر با صفر است. همچنین برای سطح مشترک بین ماده متخلخل و سیال تمیز، شرط پیوستگی برای تمام متغیرها در نظر گرفته می‌شود.

حل معادلات حاکم با استفاده از یک برنامه عددی در نرم‌افزار فترن

جریان سیال در مجاورت دیواره لوله یا کانال بیشتر بوده و در نتیجه انتقال حرارت بهبود می‌یابد. دهقان و همکاران با ارائه حل تحلیلی - تقریبی، انتقال حرارت درون لوله‌ی آکنده از ماده متخلخل را برای رژیم جریان آرام مطالعه نمودند [5]. برای جریان مغشوش نیز نیموری و همکاران انتقال حرارت را در یک کانال با هر دو آرایش مرزی و مرکزی ماده متخلخل مطالعه نمودند [1]. مطالعات بسیاری نیز در زمینه کاربرد نانوسیال در انتقال حرارت انجام شده‌است. لی و همکاران به بررسی هدایت حرارتی نانوسیال آلومینا نسبت به سیال پایه آب و اتیلن گلیکول پرداخته و نشان دادند که استفاده از نانوسیال، هدایت حرارتی را نسبت به سیال پایه بصورت قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد [6]. ژوان و لی بصورت تجربی، نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب و اکسید تیتانیوم-آب را مورد بررسی قرار داده و رابطه‌ای را برای ناسلت جریان بر اساس پارامترهای غلظت، رینولدز و پرانتل پیشنهاد نمودند [2]. تاجیک جمال‌آباد و همکاران در سال 2014 بصورت تجربی به بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی نانوذرات اکسید آلومینیوم، اکسید مس و اکسید تیتانیوم در سیال پایه آب پرداخته و نتایجشان را بر اساس مدل قانون توانی ارائه نمودند [7]. در زمینه استفاده همزمان از ماده متخلخل و نانوسیال مطالعات بسیار محدود البته تنها برای رژیم جریان آرام و حالت گذرا می‌باشد. حاجی‌پور و ملائی، انتقال حرارت را در لوله عمودی آکنده از ماده متخلخل با جریان نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب بصورت تجربی بررسی نمودند [8]. نظری و همکاران نیز لوله افقی آکنده از ماده متخلخل را با نانو سیال آب-آلومینا بررسی کرده و برای نانوسیال با غلظت‌های حجمی 0.1 و 0.25 درصد، به ترتیب بهبود 1 و 6 درصدی را نسبت به سیال پایه ارائه دادند [9]. مغربی و همکاران نیز بصورت عددی اثر نانوسیال را در کانال حاوی ماده متخلخل بررسی نمودند [10].

با توجه به مطالعات انجام شده، اثر بکارگیری نانوسیال بر انتقال حرارت در لوله‌ی متخلخل جزئی بررسی نشده است. بنابراین در مطالعه‌ی حاضر ماده متخلخل در یک لوله‌ی حرارتی و در حالات مختلف شامل آکنده از ماده متخلخل، آرایش مرزی و آرایش مرکزی قرار می‌گیرد و تاثیر بکارگیری نانوسیال بجای سیال پایه بر روی انتقال حرارت جابجایی در رژیم جریان مغشوش بصورت عددی بررسی می‌شود.

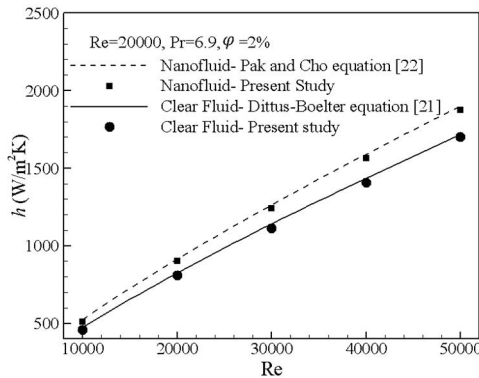
### 2- تعریف مسئله، معادلات و روش حل عددی

#### 2-1- تعریف مسئله

در شکل 1 هندسه‌ای از مسئله‌ی مورد مطالعه ترسیم شده است. در شکل 1-a ماده متخلخل در آرایش مرکزی و در شکل 1-b ماده متخلخل در آرایش مرزی قرار گرفته است. پارامتر بی‌بعد  $S$  نسبت اندازه شعاعی ماده متخلخل به شعاع لوله  $(R_p/R)$  است. بنابراین اگر  $S = 0$  باشد حالت لوله‌ی بدون ماده متخلخل و اگر  $S = 1$  باشد حالت لوله‌ی آکنده از ماده متخلخل بوجود می‌آید. در مطالعه‌ی حاضر برای آرایش مرزی  $S = 0.5$  و برای آرایش مرکزی  $S = 0.85$  در نظر گرفته شده است. ماده متخلخل از جنس آلومینیوم و با مقدار نفوذپذیری  $K = 7.5 \times 10^{-7}$  و مقدار تخلخل  $\phi = 0.85$  می‌باشد. نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با دمای یکنواخت 300 کلوین و سرعت یکنواخت (بطوریکه عدد رینولدز نانوسیال برابر با 20000 باشد) وارد لوله‌ی حرارتی می‌شود. دمای دیواره‌ی لوله ثابت و برابر با 323 کلوین است. طول لوله نیز 100 برابر شعاع لوله در نظر گرفته می‌شود.

#### 2-2- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال در ماده متخلخل شامل معادلات پیوستگی،



**Fig. 2** Comparison between results of present study and results of Dittus-Boelter and pak and cho studies

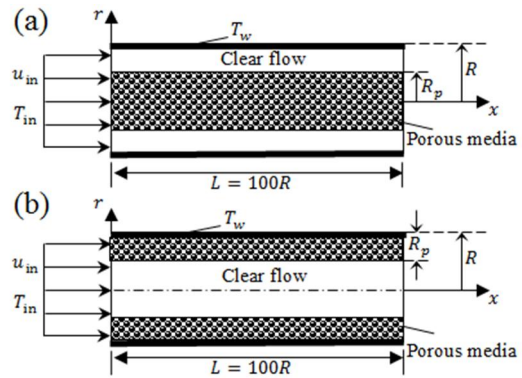
شکل 2 مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات دیتوز-بولتر و پاک و چو

که از مطالعات پیشین حاصل می‌گردد تطابق مناسبی دارد.

در شکل 3-a تأثیر استفاده از نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب 2 درصد بر مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول لوله نشان داده شده‌است. بر طبق نمودارها، در هر چهار حالت مورد مطالعه یعنی لوله بدون ماده متخلخل، آکنده از ماده متخلخل، با آرایش مرزی ماده متخلخل و آرایش مرکزی ماده متخلخل استفاده از نانوسیال انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. برای مشاهده بهتر مقدار بهبود انتقال حرارت در اثر کاربرد نانوسیال، در شکل 3-b نسبت ضرایب انتقال حرارت توسعه‌یافته جریان نانوسیال به جریان سیال آب در چهار حالت مورد مطالعه برای غلظت‌های مختلف ذرات نانو آورده شده‌است. همانطور که در این شکل مشخص است استفاده از جریان نانوسیال در آرایش مرکزی ماده متخلخل، بهبود بیشتری را در انتقال حرارت نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که بهبود انتقال حرارت در دو حالت لوله‌ی حرارتی با آرایش مرزی و نیز آکنده از ماده متخلخل حتی از لوله‌ی بدون ماده متخلخل کمتر است. برای تعیین علت این مورد باید تأثیر ذرات نانو بر ضریب هدایت حرارتی کل را بررسی نمود. در رابطه‌ی (7) که از ادغام دو رابطه‌ی (5) و (6) حاصل شده‌است، ضریب هدایت حرارتی کل ماده متخلخل و نانوسیال آورده شده‌است:

$$k_{eff,nf} = \phi k_{nf} + \phi C_{p,nf} \frac{\mu_t}{\sigma_T} + 0.195(1 - \phi)^{0.763} k_s \quad (7)$$

بر اساس رابطه‌ی (7)، ذرات نانو با تغییر ضریب هدایت حرارتی سیال ( $k_{nf}$ )، افزایش گرمای ویژه ( $C_{p,nf}$ ) و تغییر در لزجت اغتشاشی ( $\mu_t$ ) می‌تواند سبب بهبود ضریب هدایت حرارتی کل شود. در نتیجه تأثیر ذرات نانو بر عوامل بیان شده و همچنین مقدار ضریب هدایت حرارتی موثر ماده متخلخل، مقدار بهبود ضریب هدایت حرارتی کل از رابطه‌ی (7) مشخص می‌گردد. در شکل 3-c نسبت بهبود ضریب هدایت حرارتی کل در اثر استفاده از نانوسیال 2 درصد به حالت بدون استفاده از ذرات نانو در هر 4 حالت مورد مطالعه و در حالت توسعه‌یافته آورده شده‌است. در این شکل مشخص است که با استفاده از نانوسیال 2 درصد، ضریب هدایت حرارتی کل در همه حالت‌های مورد مطالعه افزایش می‌یابد. در این شکل مشاهده می‌شود که در حالت آرایش مرکزی ماده متخلخل که جریان نانوسیال به راحتی از مجاور دیواره لوله (که محل ورود گرما از لوله به سیال است) عبور می‌کند، ضریب هدایت حرارتی کل بهبود بیشتری می‌یابد و در نتیجه بهبود انتقال حرارت نیز بیشتر است. این در حالیست که در دو آرایش مرزی و نیز آکنده از ماده متخلخل، با قرارگیری ماده متخلخل در مجاورت دیواره لوله و در نتیجه اضافه شدن جمله‌ی هدایت حرارتی مؤثر ماده متخلخل در رابطه‌ی (7)، نسبت بهبود



**Fig. 1** Schematic of the heat pipe with 2 structure of porous media: central arrangement (a) and boundary arrangement (b)

شکل 1 هندسه‌ای از لوله حرارتی با دو ساختار محیط متخلخل: آرایش مرکزی (a) و آرایش مرزی (b)

انجام می‌گردد. گسسته‌سازی معادلات با روش حجم محدود روی یک شبکه‌ی هم‌مکان انجام می‌گردد. ارتباط بین معادلات سرعت و فشار نیز با روش سیمپل برقرار می‌شود. از تابع دیواره استاندارد برای محاسبه‌ی متغیرهای جریان مغشوش در شبکه‌ی مجاور دیواره‌ی لوله استفاده می‌شود. معیار همگرایی برای تمام متغیرها برابر با  $10^{-6}$  در نظر گرفته می‌شود. پایه‌ی اصلی کد فرترن مورد استفاده، توسط پریک برای جریان آرام در یک لوله نوشته شده‌است [19]؛ محمودی و همکاران این کد را برای ماده متخلخل در جریان آرام توسعه داده و در مطالعاتشان استفاده نموده‌اند [20,8]. نیموری و همکاران جریان مغشوش را به آن اضافه نموده [1] و نویسندگان مطالعه‌ی حاضر نیز این کد را برای مطالعه‌ی لوله و مبدل حرارتی دولوله‌ای شامل ماده متخلخل توسعه داده‌اند [13,12].

### 3- نتایج حل عددی و بحث

برای بررسی عدم وابستگی حل عددی به شبکه‌ی محاسباتی، لوله حرارتی با آرایش مرکزی ماده متخلخل با ضخامت بی‌بعد  $S = 0.85$  و بدون ذرات نانو ( $\phi = 0$ )، در نظر گرفته می‌شود. در جدول 1 ضریب انتقال حرارت جابجایی توسعه یافته برای شبکه‌های محاسباتی مختلف آورده شده‌است. مطابق با جدول 1، با افزایش شبکه محاسباتی به بیش از 50 گره در راستای شعاعی و 150 گره در راستای محوری، تغییرات نسبی در نتایج کمتر از یک درصد شده و بنابراین شبکه‌ی  $150 \times 50$  در مطالعه‌ی عددی حاضر مناسب است. در شکل 2، نتایج حل عددی مطالعه‌ی حاضر در عدد رینولدزهای مختلف برای لوله‌ی بدون ماده متخلخل آمده‌است. نتایج مطالعه حاضر با نتایج معادله‌ی دیتوز-بولتر که عدد ناسلت آن بصورت  $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$  است [21] و برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با نتایج پاک و چو که بصورت  $Nu = 0.021Re^{0.8}Pr^{0.5}$  است [22] مقایسه شده‌است. همانطور که در شکل 2 مشخص است، ضریب انتقال حرارت جابجایی توسعه‌یافته در مطالعه‌ی حاضر ( $h_{dev} = Nu k / 2R$ ) با مقدار آن

جدول 1 تأثیر تعداد شبکه محاسباتی بر حل عددی

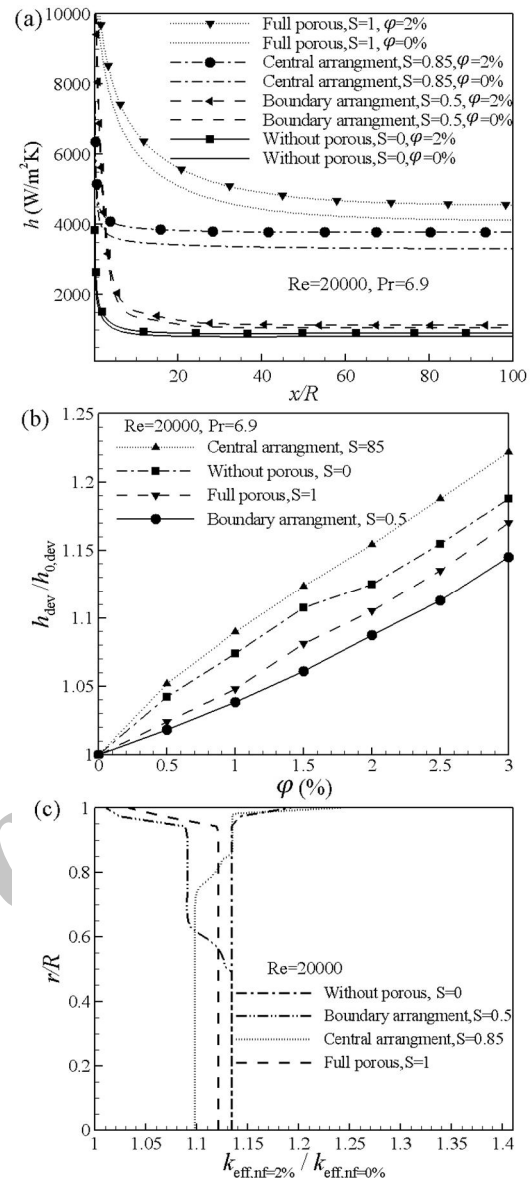
**Table 1** Effect of mesh number on numerical solution

ابعاد شبکه	ضریب انتقال حرارت جابجایی توسعه یافته ( $h_{dev}$ )	خطای نسبی (%)
50×20	2486.96	-
80×30	2898.30	16.54
100×40	3144.37	8.49
150×50	3258.20	3.62
200×60	3285.24	0.83

کل در مجاور دیواره لوله بیشترین بهبود را نشان می‌دهد و بدین ترتیب گرمای ورودی به سیال در این حالت بیشترین افزایش را داراست. در حالتی که ماده متخلخل در مجاورت دیواره لوله قرار می‌گیرد یعنی آرایش مرزی و حالت آکنده از ماده متخلخل، بدلیل ضریب هدایت حرارتی بالای ماده متخلخل، تأثیر ذرات نانو بر روی ضریب هدایت حرارتی کل کمتر بوده و در نتیجه انتقال حرارت جابجایی بهبود کمتری می‌یابد.

### 5- مراجع

- [1] M. Nimvari, M. Maerefat, M. El-Hossaini, Numerical simulation of turbulent flow and heat transfer in a channel partially filled with a porous media, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 60, pp. 131-141, 2012.
- [2] Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat transfer*, Vol. 125, No. 1, pp. 151-155, 2003.
- [3] M. Maerefat, S. Y. Mahmoudi, K. Mazaheri, Numerical simulation of forced convection enhancement in a pipe by porous inserts, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 45-56, 2011.
- [4] Y. Mahmoudi, M. Maerefat, Analytical investigation of heat transfer enhancement in a channel partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 12, pp. 2386-2401, 2011.
- [5] M. Dehghan, M. T. Jamal-Abad, S. Rashidi, Analytical interpretation of the local thermal non-equilibrium condition of porous media imbedded in tube heat exchangers, *Energy Conversion and Management*, Vol. 85, pp. 264-271, 2014.
- [6] S. Lee, S. Choi, S. Li, J. Eastman, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Journal of Heat transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 280-289, 1999.
- [7] M. Tajik Jamal-Abad, M. Dehghan, S. Saedodin, M. S. Valipour, A. Zamzamian, An experimental investigation of rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids, *Journal of Heat and Mass Transfer Research (JHMTR)*, Vol. 1, No. 1, pp. 17-23, 2014.
- [8] M. Memari, A. Golmakani, A. M. Dehkordi, Mixed-convection flow of nanofluids and regular fluids in vertical porous media with viscous heating, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol. 50, No. 15, pp. 9403-9414, 2011.
- [9] M. Nazari, M. Ashouri, M. H. Kayhani, Experimental investigation of forced convection of nanofluids in a horizontal tube filled with porous medium, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 109-116, 2014. (in Persian).
- [10] M. J. Maghrebi, M. Nazari, T. Armaghani, Forced convection heat transfer of nanofluids in a porous channel, *Transport in Porous Media*, Vol. 93, No. 3, pp. 401-413, 2012.
- [11] M. H. Pedras, M. J. de Lemos, Macroscopic turbulence modeling for incompressible flow through undeformable porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 6, pp. 1081-1093, 2001.
- [12] A. R. Jamarani, M. Maerefat, M. E. Nimvari, Introducing proper definition of the Nusselt number for fluid flow in pipe partially filled with porous media, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 278-286, 2015. (in Persian).
- [13] A. R. Jamarani, M. Maerefat, M. E. Nimvari, Numerical study of heat transfer in double-tube heat exchanger filled with porous material in a turbulent fluid flow, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 173-184, 2016. (in Persian).
- [14] N. F. Jouybari, M. Maerefat, M. E. Nimvari, A macroscopic turbulence model for reacting flow in porous media, *Transport in Porous Media*, Vol. 106, No. 2, pp. 355-381, 2015.
- [15] M. Corcione, Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, No. 9, pp. 1536-1546, 2010.
- [16] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 1, pp. 789-793, 2011.
- [17] T. L. Bergman, F. P. Incropera, A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat And Mass Transfer*, pp. 823-824, New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [18] V. Calmidi, R. Mahajan, The effective thermal conductivity of high porosity fibrous metal foams, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 121, No. 2, pp. 466-471, 1999.
- [19] J. H. Ferziger, M. Perić, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, pp. 405-408, Berlin: Springer, 2002.
- [20] Y. Mahmoudi, N. Karimi, Numerical investigation of heat transfer enhancement in a pipe partially filled with a porous material under local thermal non-equilibrium condition, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 68, pp. 161-173, 2014.
- [21] Y. A. Çengel, R. H. Turner, J. M. Cimbala, M. Kanoglu, *Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences*, pp. 883-884, New York: McGraw-Hill, 2008.
- [22] B. C. Pak, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental Heat Transfer an International Journal*, Vol. 11, No. 2, pp. 151-170, 1998.



**Fig. 3** Effect of using nanofluid on: convection coefficient (a), enhancement ratio of convection coefficient (b) and enhancement ratio of heat conduction coefficient (c)

شکل 3 تأثیر استفاده از نانوسیال بر: ضریب انتقال حرارت جابجایی در طول لوله (a)، نسبت بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی (b) و نسبت بهبود ضریب هدایت کل (c) هدایت حرارتی در مجاور دیواره کمتر و در نتیجه بهبود انتقال حرارت کمتر است.

### 4- جمع بندی و نتیجه گیری

در مطالعه‌ی حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک لوله‌ی حرارتی حاوی ماده متخلخل آلومینیومی و برای جریان مغشوش انجام گردید که تأثیر آن بر روی انتقال حرارت بشرح زیر می‌باشد: استفاده از نانوسیال سبب بهبود ضریب هدایت حرارتی کل نانوسیال و ماده متخلخل در مقطع لوله می‌شود. این امر در هر چهار حالت مورد مطالعه یعنی لوله حرارتی بدون ماده متخلخل، آکنده از ماده متخلخل، آرایش مرزی و مرکزی ماده متخلخل روی می‌دهد؛ در نتیجه در هر چهار حالت بهبود انتقال حرارت جابجایی مشاهده می‌شود. در حالتی که ماده متخلخل در آرایش مرکزی قرار دارد ضریب هدایت