مجله مهندسی مکانیک مدرس، فوق‌العاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16، ص‌ص 34-44

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اثر خواص ماتریس متخلخل بر تولید حرارت داخلی درون محفظه اشباع شده با نانوسیال آب-مس

آیدین زهفروش[1]، سیامک حسین پور[2*]

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز

* تبریز، صندوق پستی 1996-51325، hossainpour@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 تیر 1393

پذیرش: 04 شهریور 1393

ارائه در سایت: 06 آبان 1393

کلید واژگان:

جابه‌جایی طبیعی

محیط متخلخل

نانوسیال

تولید حرارت داخلی

چکیده

در مقاله حاضر به بررسی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس درون محفظه بسته‌ای که قسمتی از آن با ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی پر شده است پرداخته می‌شود. نانوسیال مورد استفاده محلول مس-آب است که برای تعیین خصوصیات آن از مدل‌های ماکسول و برینکمن استفاده شده است. به‌دلیل سرعت‌های پایین نانوسیال، از معادله دارسی-برینکمن جهت مدل‌سازی محیط متخلخل استفاده می‌شود. به‌منظور به‌دست آوردن بیشترین برداشت انرژی از منبع حرارتی وابسته به دما، پارامترهای مختلفی مانند عدد رایلی، کسرحجمی نانوسیال، تخلخل ماتریس متخلخل و نسبت هدایت محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش کسر حجمی نانوسیال سبب افزایش نوسلت در تمامی تخلخل‌ها می‌شود که این افزایش در تخلخل‌های پایین‌بیشتر خواهد شد. تغییرات نسبت هدایت ماتریس متخلخل تنها در تخلخل‌های پایین اثرگذار بوده و سبب هدایت سریع حرارت تولید شده و افزایش دو برابری نوسلت خواهد شد. همچنین، تغییرات تخلخل سبب ایجاد نقطه مینیمم برای نوسلت در تخلخل‌های دامنه 0/4 تا 0/6 خواهد شد. با افزایش رایلی نفوذ نانوسیال به درون ماتریس متخلخل افزایش یافته و با خنک شدن ماتریس نوسلت بیشتری در تمامی دامنه تخلخل به‌دست می‌آید.

Porous Matrix properties effect on the internal heat generation in a square cavity saturated with Cu-Water nanofluid

Aydin Zehforoosh[1], Siamak Hossainpour[2*]

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Sahand, Iran
* P.O.B. 51325-1996 Tabriz, Iran, hossainpour@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 July 2014
Accepted 26 August 2014
Available Online 28 October 2014

Keywords:
Natural Convection
Porous Media
Nanofluid
Internal Heat Generation

ABSTRACT

In this paper, natural convection of Cu-Water nanofluid inside an enclosure which is partially filled with porous media, with internal heat generation has been studied numerically. Cu-water nanofluid was used where Maxwell and Brinkmen models determine its properties. Due to the low velocity of nanofluid, Darcy-Brinkman equation was used for the modeling of porous media. In order to gain the maximum energy from the temperature dependent heat source, different parameters such as Rayleigh number, volume fraction of nanoparticles, porosity of porous matrix and heat conduction ratio have been investigated. The results show that increasing the volume fraction of nanofluid increases Nusselt number at all porosities and Nusselt further increases at lower porosities. Changes of thermal conductivity ratio were effective only at low porosities and cause fast conduction of generated heat and two-fold increase in Nusselt number. Moreover, the porosity changes at different thermal conductivity ratio cause minimum Nusselt at the porosity of 0.4 to 0.6. Increasing Rayleigh number will lead to nanofluid penetration increase into the porous matrix and with further matrix cooling greater increase in Nusselt number in all porosity ranges will be achieved.

1- مقدمه

پدیده انتقال حرارت جابه‌جایی در محفظه پر شده با ماده متخلخل به‌دلیل وابستگی میدان سرعت با انتقال حرارت جابه‌جایی و هدایتی، نظر بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است. همچنین، استفاده از نانوسیال درون محفظه، به‌دلیل تقویت انتقال حرارت، می‌تواند روشی موثر در تقویت انتقال انرژی باشد. نتایج بررسی مسائل مربوط به محفظه پر شده با ماده متخلخل و اشباع از نانوسیال می‌تواند بسیاری از مشکلات مربوط به خنک‌کاری قطعات الکترونیک[1]، واکنش‌های گرمازای درون راکتورها با بستر متخلخل[2]، مدیریت انتقال حرارت تولیدی توسط زباله‌های اتمی دفن شده[2]، اثر تولید حرارت متابولیک در بافت‌ها[3]، ارسال نانوذرات داروئی در خون[3] و غیره را برطرف نماید.

مدل‌سازی نانوسیال در یک محفظه برای اولین بار توسط خانافر و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

A. Zehforoosh, S. Hossainpour, Porous Matrix properties effect on the internal heat generation in a square cavity saturated with Cu-Water nanofluid, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 16, pp. 34-44, 215 (In Persian)

همکاران[4] مطرح شد. آن‌ها اثر جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس، بر افزایش انتقال حرارت درون محفظه مستطیلی دوبعدی را برای بازه‌های مختلف اعداد گراشوف و نسبت‌های حجمی بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که انتقال حرارت در محفظه برای هر مقدار عدد گراشوف با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. کیم و همکاران[5] به‌طور تحلیلی، با استفاده از جابه‌جایی رایلی-برنارد، ناپایداری جابه‌جایی نانوسیال‌ها در جابه-جایی طبیعی را مطالعه کردند و افزایش در ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به‌دلیل وجود نانوذرات را گزارش دادند. ایستمن و همکاران[6] مشاهده کردند که آب-اکسیدآلومینیوم و آب-مس با جزء حجمی نانوذره 5% به‌ترتیب هدایت گرمایی را 29% و 60% افزایش دادند. زی و همکاران[7] نشان دادند که اتیلن‌گلیکول-اکسیدآلومینیوم با جزء حجمی نانوذره 5% هدایت گرمایی را 30% افزایش داد. محمودی و مزروعی[8] محفظه مربع شکل که بلوک عایق مربعی شکلی در وسط آن قرار گرفته بود را در اعداد رایلی، ابعاد مربع عایق و کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش اندازه مربع عایق درونی در رایلی‌های پائین سبب کاهش نوسلت میانگین شده، اما در رایلی‌های بالا اثر اندازه مربع بی تاثیر خواهد بود. با مطالعه عددی، که توسط شیخزاده و همکاران[9] در محفظه مستطیلی پرشده با نانوسیال انجام گرفت، مشاهدات قبلی تائید شده و نتایج به‌دست آمده به‌صورت رابطه‌ای بین عدد نوسلت، رایلی و کسر حجمی نانوذرات ارائه شده است.

واکر و هومزی[10] با درنظر گرفتن معادلات مختلف ماده متخلخل به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی درون محفظه مستطیلی پرشده با ماده متخلخل پرداختند. آن‌ها مدل دارسی را انتخاب کردند و نتایج به‌دست آمده از مدل‌های مختلف تطابق خوبی با هم داشتند. پرسد و کولاکی[11] به‌صورت عددی جریان انتقال حرارت طبیعی درون محفظه متخلخل مستطیلی را در حالت پایا بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش نسبت ابعاد، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. انتقال حرارت طبیعی درون محفظه پرشده با ماده متخلخل و تولید حرارت یکنواخت به‌صورت پایا توسط دوو و بیلگن[12] برای دامنه وسیعی از عدد رایلی و نسبت ابعاد هندسی مورد مطالعه قرار گرفت و با توجه به عدد رایلی و نسبت ابعاد هندسی مدل-های مختلف انتقال حرارت تعریف شدند. میالی و میرکین[13] به بررسی تولید حرارت وابسته به دمای محلی در محفظه متخلخل پرداختند. نتایج آن-ها نشان داد که در رایلی‌های پائین فقط یک گردابه درون محفظه تشکیل می‌شود و با افزایش مختصر رایلی گردابه‌ها به‌سمت وسط دیواره‌های عمودی منحرف می‌شوند. طهماسبی و همکاران[14] به بررسی محفظه پرشده با ماده متخلخل با تولید حرارت پرداختند. دیواره‌های عمودی به‌صورت دما ثابت، با دماهای مختلف و دیواره‌های افقی به‌صورت عایق درنظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که افزایش تولید حرارت درون محفظه و عدد رایلی، گردابه‌های ایجاد شده درون محفظه را به‌ترتیب متقارن و غیرمتقارن می‌کند. از طرفی افزایش هر دو عامل سبب افزایش مقدار نوسلت خواهد شد.

همچنین، برخی از محققان به مطالعه محفظه‌ای که مقداری از آن‌ها با ماده متخلخل پرشده بود پرداختند. سیت و تانگ[15] محفظه مستطیلی با نسبت ابعاد پنج به یک را که به‌صورت ناقص و کامل توسط فوم نیکل و فوم پلاستیک پر شده بود، به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش ماده متخلخل به‌صورت لایه لایه از منبع گرم تا سرد مقدار مینیممی برای انتقال حرارت به‌دست می‌آید. بکرمن و همکاران[16] مدلی از محفظه که با لایه‌ای از ماده متخلخل پر شده بود را مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که اگر سیال بتواند وارد لایه متخلخل شود میدان سرعت و حرارت را به‌طور کلی تحت تاثیر قرار خواهد داد. همچنین، نفوذ سیال به درون ماده متخلخل به‌شدت به حاصلضرب اعداد رایلی و دارسی بستگی دارد.

مطالعات کمی در مورد ماده متخلخل پرشده با نانوسیال موجود است. نیلد و کوزنتسوف[17] به مطالعه مسئله چنگ و مینکاویس[18] برای جریان لایه مرزی جابه‌جایی طبیعی بر روی صفحه عمودی نیمه بینهایت که درون ماده متخلخل قرار گرفته و با نانوسیال پرشده است پرداختند. احمد و پاپ[19] لایه مرزی جابه‌جایی ترکیبی[1] بر روی صفحه عمودی قرار گرفته درون ماده متخلخل و پر شده با نانوسیال را بررسی کردند. آن‌ها از مدل مطرح شده توسط تیواری و داس[20] استفاده کردند.

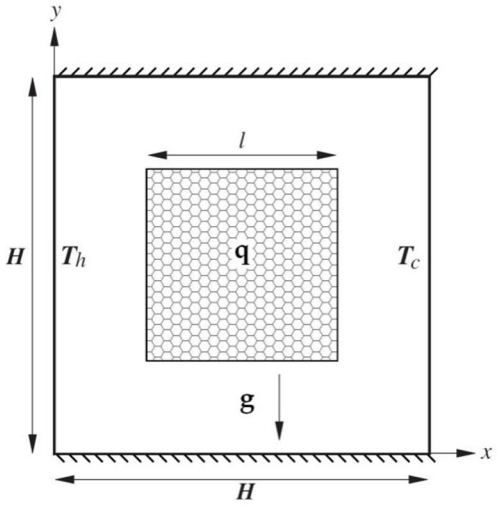
چیانگ سان و آیون پاپ[21] از معدود افرادی بودند که به مطالعه انتقال حرارت جابه‌جایی درون محفظه متخلخل پر شده با نانوسیال پرداخته‌اند. آن‌ها محفظه مثلثی قائم الزاویه شکلی را درنظر گرفتند که منبع حرارتی دما ثابت بر روی دیواره عمودی آن قرار گرفته و کل وتر آن به‌صورت منبع دما پائین انتخاب شده است. آن‌ها نتیجه گرفتند بیشترین مقدار عدد نوسلت زمانی حاصل می‌شود که از بیشترین مقدار عدد رایلی و یا بزرگ‌ترین اندازه منبع حرارتی استفاده شود. همچنین، کوچک کردن نسبت‌های هندسی و یا پائین آوردن منبع حرارتی گرم روی دیواره سبب بهبود انتقال حرارت می‌شود. با توجه به مطالعاتی که تاکنون انجام گرفته، بررسی‌ها در این زمینه مراحل اولیه خود را سپری می‌کنند و به‌کارگیری نانوسیال به‌عنوان سیال عامل انتقال حرارت در حضور ماتریس متخلخل قدمتی کمتر از چند سال را داراست. قابل ذکر است که تنها به تعداد انگشت شماری مطالعه در مورد محفظه متخلخل پر شده با نانوسیال انجام گرفته است و طبق آخرین بررسی مطالعه‌ای در زمینه بررسی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال درون محفظه شامل حجمی از ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی انجام نگرفته است.

در مقاله حاضر به بررسی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال درون محفظه بسته‌ای که قسمتی از آن با ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی پر شده است پرداخته شده است. با توجه به اینکه تولید حرارت داخلی درون ماتریس متخلخل تابعی از دما است، جهت بیشترین برداشت انرژی از این منبع و همچنین کنترل دمایی ماتریس، دامنه‌های مختلفی از نفوذپذیری ماتریس، ضریب هدایت حرارتی، اعداد رایلی و کسر حجمی نانوذرات معلق مورد بررسی قرارگرفته شده و اثر هر پارامتر در مقدار میدان‌های سرعت و حرارت و در نتیجه مقدار انرژی دریافتی از دیواره‌ها به‌دست آمده است.

2- مدل‌سازی عددی

هندسه مورد بررسی، محفظه‌ای مربعی با طول ضلع H است که بلوک متخلخل مربعی با طول $H/2$ در مرکز آن قرار گرفته است. بلوک متخلخل دارای تولید حرارت داخلی است که این حرارت تولید شده تابعی از اختلاف دما است. دیواره چپ در دمای بالای T_h و دیواره راست در دمای پایین T_c نگه داشته شده است و دیواره‌های بالا و پایین محفظه، عایق درنظر گرفته شده‌اند. محفظه به‌اندازه کافی عمیق است، به‌طوری که بتوان مسئله را دوبعدی فرض کرد. فضای محفظه توسط نانوسیال آب-مس پرشده که مشخصات نانوذرات مس و آب به‌عنوان سیال پایه در جدول 1 آورده شده است. نمایی از مسئله مورد بررسی در شکل 1 نمایش داده شده است.

1- Mixedconvection



شکل 1 محفظه قسمتی پرشده با ماده متخلخل با تولید حرارت

جدول 1 خواص فیزیکی برای سیال آب و نانوذره مس[8]

	β	k	c_p	μ	ρ
	K^{-1}	$Wm^{-1}K^{-1}$	$Jkg^{-1}K^{-1}$	$kgm^{-1}s^{-1}$	kgm^{-3}
آب	21×10^{-5}	0/613	4179	0/000881	997/1
مس	$1/67\times10^{-5}$	401	385	-	8933

در مطالعه حاضر، جریان آرام، غیرقابل تراکم و نانوسیال نیوتونی درنظر گرفته شده و از ترم‌های اتلاف صرف‌نظر شده است. همچنین، ذرات نانو و آب در تعادل حرارتی بوده و اندازه نانوذرات به قدری کوچک است که می‌توان از سرعت لغزشی بین ذرات نانو و سیال صرف‌نظر کرد. تمامی خواص نانوسیال به‌غیر از چگالی آن هم در ترم نیروی شناوری ثابت فرض شده که آن نیز با تقریب بوزینسک[1] تغییر می‌نماید که جهت جاذبه مطابق شکل 1 در جهت منفی محورy قرار داد. همچنین، ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی، به‌صورت همگن، کاملا اشباع از نانوسیال و در تعادل دمایی محلی با نانوسیال درنظر گرفته شده و فرض می‌شود ابعاد نانوذرات در برابر سوراخ‌های ماتریس متخلخل بسیار کوچک است.

2-1- معادلات حاکم

جهت ارائه معادلات حاکم بر نانوسیال و ماتریس متخلخل از پارامتر دو-مقداری δ استفاده شده است که به‌ترتیب در بررسی نانوسیال و ماتریس متخلخل مقادیر صفر و یک را می‌گیرد. با توجه به فرضیات بالا معادلات بی-بعد پیوستگی، مومنتم و انرژی در مسئله حاضر به‌صورت روابط (1) تا (4) خواهند بود[22].

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \tag{1}$$

$$\left(\frac{\delta}{\varepsilon^2}-(\delta-1)\right)\left[U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}\right]= -\frac{\partial P}{\partial X}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f}\left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right]+\delta\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f Da}U \tag{2}$$

$$\left(\frac{\delta}{\varepsilon^2}-(\delta-1)\right)\left[U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}\right]= -\frac{\partial P}{\partial Y}+\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f}\left[\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right]+\delta\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}\alpha_f Da}V +\frac{\beta_{nf}}{\beta_f}Ra_f Pr_f\theta \tag{3}$$

$$U\frac{\partial\theta}{\partial X}+V\frac{\partial\theta}{\partial Y}= (\delta(R_{keff}-1)+1)\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}\left[\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right]+\delta\frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f}q\theta^{-1} \tag{4}$$

در معادله (4) منبع تولید انرژی مربوط به محیط متخلخل در سمت راست دیده می‌شود. این منبع نسبت عکس با دمای بی‌بعد داشته یعنی با برداشت انرژی و کاهش دمای ماتریس متخلخل، انرژی بیشتری تولید و جایگزین می‌شود. پارامترهای بدون بعد استفاده شده در روابط بالا به‌صورت زیر تعریف شده‌اند[23].

$$X=\frac{x}{H},Y=\frac{y}{H},U=\frac{uH}{\alpha_f},V=\frac{vH}{\alpha_f},Da=\frac{K}{H^2}$$

$$R_k=\frac{k_s}{k_f},R_{keff}=\frac{k_{eff}}{k_{nf}},P=\frac{pH^2}{\rho_{nf}\alpha_f^2},Pr_f=\frac{\nu_f}{\alpha_f}$$

$$\theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},Ra_f=\frac{g\beta_f H^3(T_h-T_c)}{\nu_f\alpha_f},q=\frac{Q_0H^2}{\Delta T^2(\rho c)_{nf}\alpha_{nf}}$$

در معادلات بالا Da عدد دارسی و بی‌بعد شده نفوذپذیری ماتریس متخلخل K و q بی‌بعد شده تولید حرارت داخلی Q_0 است. R_{keff} نسبت ضریب هدایت گرمایی موثر در محیط متخلخل به ضریب هدایت گرمایی سیال پایه بوده و معادله (5) بیانگر ارتباط k_{eff} با k_{nf} و k_s است.

$$k_{eff}=\varepsilon k_{nf}+(1-\varepsilon)k_s \tag{5}$$

همچنین، با فرض اینکه محیط متخلخل از اجسام کروی با قطر متوسط d تشکیل شده است، می‌توان تغییرات نفوذپذیری نسبت به تخلخل را توسط رابطه شماره (6) اورگن[24] به‌دست آورد.

$$K=\frac{d^2\varepsilon^3}{175(1-\varepsilon^2)} \tag{6}$$

جهت به‌دست آوردن چگالی، ظرفیت حرارتی و ضریب انبساط حرارتی به‌ترتیب از روابط (7) تا (9) استفاده شده است[25].

$$\rho_{nf}=\varphi\rho_p+(1-\varphi)\rho_f \tag{7}$$

$$(\rho c)_{nf}=\varphi(\rho c)_p+(1-\varphi)(\rho c)_f \tag{8}$$

$$(\rho\beta)_{nf}=\varphi(\rho\beta)_p+(1-\varphi)(\rho\beta)_f \tag{9}$$

لزجت دینامیکی نانوسیال از رابطه (10) بریکمن[26] به‌دست می‌آید.

$$\mu_{nf}=\frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \tag{10}$$

در کار حاضر، با فرض اندازه یکسان و کروی بودن ذرات نانو ضریب هدایتی نانوسیال با تقریب ماکسول[27] به‌صورت رابطه (11) محاسبه شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f}=\frac{(k_p+2k_f)-2\varphi(k_f-k_p)}{(k_f+2k_p)+\varphi(k_f-k_s)} \tag{11}$$

شرایط مرزی بی‌بعد برای دیواره‌های محفظه به‌صورت روابط (12) تا (14) است.

$$X=0,U=V=0,\theta=1 \tag{12}$$

$$X=0,U=V=0,\theta=0 \tag{13}$$

$$Y=0,Y=1,U=V=\frac{\partial\theta}{\partial Y}=0 \tag{14}$$

همچنین، به‌دلیل استفاده از سیال مایع با سرعت حرکت بسیار پایین، می‌توان از شرط عدم لغزش در صفحه مشترک نانوسیال و ماتریس متخلخل با استفاده از روابط (15) تا (17) استفاده کرد[28].

$$T_{nf}=T_{PM},k_{nf}\frac{\partial T_{nf}}{\partial n}=k_{eff}\frac{\partial T_{PM}}{\partial n} \tag{15}$$

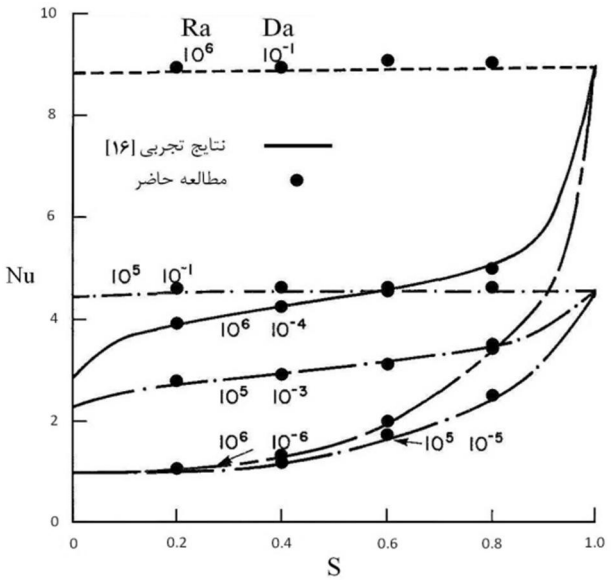
$$U_{nf}=U_{PM},V_{nf}=V_{PM},P_{nf}=P_{PM} \tag{16}$$

$$\mu_{nf}\frac{\partial U_{nf}}{\partial n}=\mu_{eff}\frac{\partial U_{PM}}{\partial n}$$

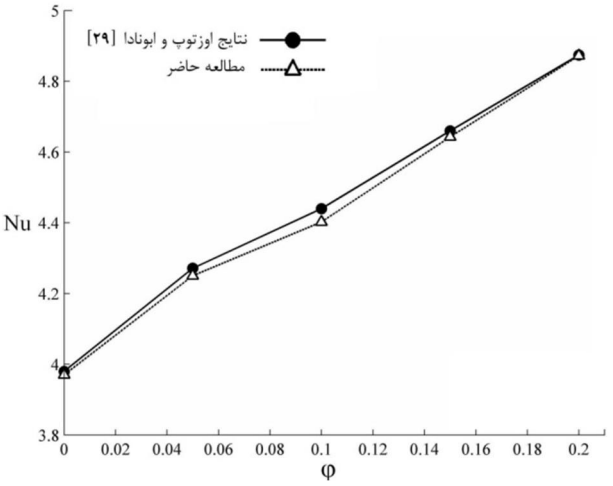
$$\mu_{nf}\left(\frac{\partial V_{nf}}{\partial n}+\frac{\partial U_{nf}}{\partial t}\right)=\mu_{eff}\left(\frac{\partial V_{PM}}{\partial n}+\frac{\partial U_{PM}}{\partial t}\right) \tag{17}$$

برای به‌دست آوردن نوسلت محلی روی دیواره چپ و راست به‌ترتیب از روابط (18) و (19) استفاده می‌شود[29].

1- Boussinesq approximation



شکل 2 اعتبارسنجی با نتایج محفظه قسمتی پر شده ماده متخلخل



شکل 3 اعتبارسنجی با نتایج محفظه پرشده با نانوسیال

جدول 2 مجموع نوسلت‌های دیواره گرم و سرد در شبکه‌های مختلف

شبکه	Φ	40×40	60×60	80×80	100×100	120×120
Nu	0/0	13/8848	13/6893	13/5903	13/5362	13/5360
	0/1	14/5259	14/3532	14/3007	14/2776	14/2702
	0/2	15/3456	15/1862	15/1137	15/0956	15/0934

$$Nu_L = -\frac{k_{nf}}{k_f}\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)_{X=0} \quad (18)$$

$$Nu_R = -\frac{k_{nf}}{k_f}\left(\frac{\partial\theta}{\partial X}\right)_{X=1} \quad (19)$$

که مقدار کلی حرارت بی‌بعد تولید شده درون محفظه از مجموع نوسلت دیواره‌های چپ و راست و با رابطه (20) به‌دست می‌آید.

$$Nu = \int_0^1 (Nu_L + Nu_R)\, dY \quad (20)$$

2-2- روش حل عددی

جهت حل عددی از کد فلوئنت[1] استفاده شده است. معادلات براساس روش حجم محدود و روش سیمپل[2] جداسازی شده‌اند. همچنین، از الگوریتم پیزو[3] جهت حل معادله فشار استفاده شده است. حل معادلات تا رسیدن تمامی باقی مانده‌ها به مقدار 10^{-6} ادامه یافته است.

2-3- اعتبارسنجی

اعتبارسنجی در دو مرحله و با مقایسه نتایج حاصل از کد با مقادیر به‌دست آمده از محفظه قسمتی پرشده با ماده متخلخل و سیال خالص[16] و محفظه پر شده با نانوسیال آب-مس با دیوار سرد سمت راست و دیواری با منبع گرم محدود در چپ [29] انجام گرفته است.

در شکل 2، مقادیر نوسلت به‌دست آمده از روش عددی با نوسلت حاصل از محفظه قسمتی پر شده با ماده متخلخل مقایسه شده است. مقادیر نوسلت در Pr=1، R_k=1 و C=0/55 به‌دست آمده است و S نشان‌دهنده فضای پر نشده با ماده متخلخل در راستای محور افقی است. همچنین، مقایسه مقادیر نوسلت در محفظه پرشده با نانوسیال با مقادیر عددی در کسر حجمی مختلف و $Ra=10^5$ در شکل 3 انجام گرفته است که می‌توان بیشترین خطا را در کسر حجمی 0/1 برابر با 0/8% مشاهده کرد.

2-4- بررسی استقلال از شبکه

جهت بررسی استقلال از شبکه، 5 شبکه 40×40، 60×60، 80×80، 100×100 و 120×120 در شرایط $Ra=10^5$، ε=0/4، R_k=1 و q=1000 در کسر حجمی‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت آرایش 100×100 انتخاب شده است، به‌طوری که شبکه انتخاب شده عدم وابستگی نتایج به مش‌بندی را تامین می‌کند. نتایج حاصل از بررسی شبکه در جدول 2 آورده شده است.

3- نتایج حل

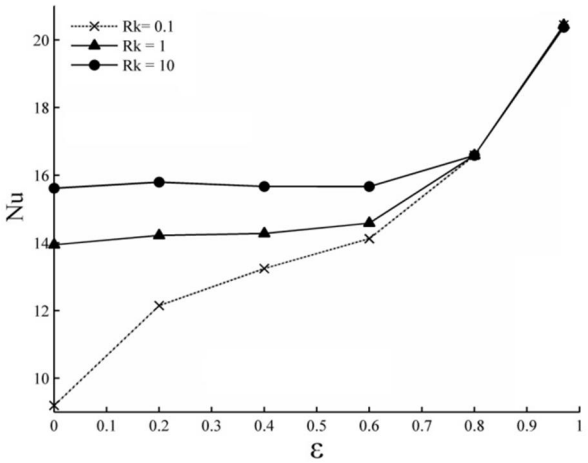
3-1- اثر تغییرات نسبت هدایت در تخلخل‌های مختلف

اثر تغییرات نسبت ضرایب هدایتی در تخلخل‌های مختلف بر روی میدان‌های سرعت و حرارت در $Ra=10^5$، φ=0/1 و q=1000 مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 4، مشاهده می‌شود که تغییر مقادیر نسبت هدایت (R_k) در تخلخل‌های پایین تاثیر قابل ملاحظه‌ای داشته، ولی، با افزایش مقدار تخلخل، نسبت هدایت رفته رفته اثر خود را ازدست می‌دهد. در حقیقت، سه اثر متفاوت در نمودار مقابل دیده می‌شود که با همپوشانی این آثار تغییرات نوسلت در محفظه شکل می‌گیرد.

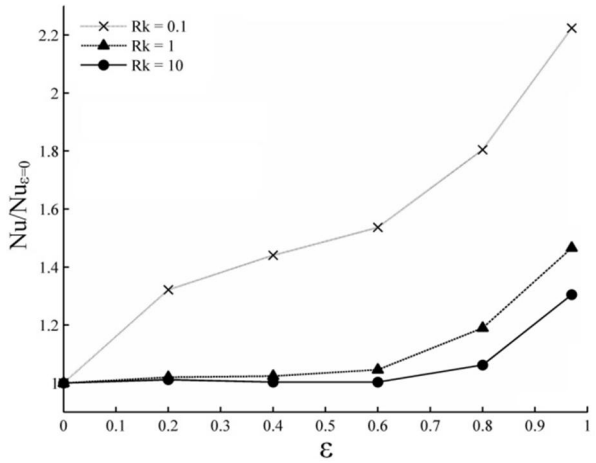
پارامتر اصلی تاثیرگذار در مقادیر نوسلت، ضریب هدایت حرارتی ماتریس متخلخل،k_sاست. در تخلخل‌های بالا به‌دلیل مقاومت کمتر در برابر جریان و در نتیجه قدرت نفوذ بیشتر سیال به درون ماده متخلخل احتیاج چندانی به ضریب هدایتی بالای ماتریس متخلخل جهت انتقال حرارت تولید شده نخواهد بود، چرا که جابه‌جایی سیال انتقال حرارت را انجام داده و در چنین شرایطی می‌توان جابه‌جایی طبیعی را رژیم حاکم بر جریان محفظه دانست. با کاهش دمای ماتریس متخلخل تولید حرارت بیشتری انجام گرفته و در نهایت نوسلت بیشتری به‌دست خواهد آمد.

با کاهش مقدار تخلخل مقاومت در برابر نفوذ نانوسیال بیشتر شده و در نتیجه حرارت درون ماتریس متخلخل از طریق هدایت حرارتی به جریان جابه‌جایی نانوسیال منتقل می‌شود. بنابراین، k_s نقش مهمی را ایفا کرده و در نتیجه، با توزیع و یکنواخت‌سازی دما درون ماتریس، سبب کاهش دمای محلی شده و در نهایت سبب تولید حرارت بالاتر و افزایش نوسلت خواهد شد. با توجه به اینکه در تخلخل‌های پایین هدایت حرارتی رژیم حاکم درون محفظه خواهد بود، پس، با افزایش هرچه بیشتر k_s، توزیع یکنواخت‌تر دما و در نتیجه تولید حرارت بیشتری را شاهد خواهیم بود.

1- Fluent
2- SIMPLE
3- PISO



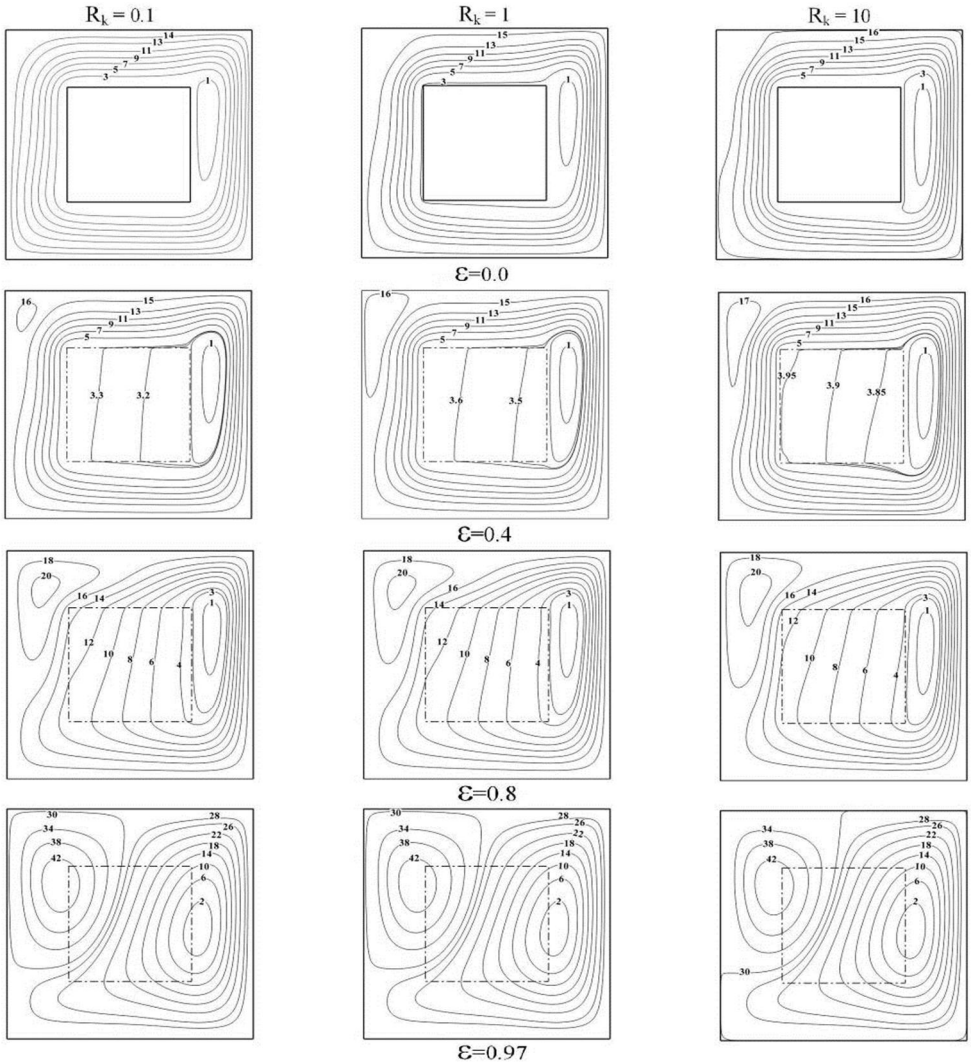
شکل 4 مقدار نوسلت کل در تخلخل و نسبت هدایت مختلف



شکل 5 مقدار فاکتور نوسلت کل در تخلخل و نسبت هدایت مختلف

اثر سوم مربوط به ماتریس بدون تخلخل است که مانند قرارگیری بلوک کامل در وسط محفظه است. به‌دلیل اثر عدم لغزش سرعت بر روی دیواره بلوک و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره، مقدار تنش برشی افزایش یافته و در نتیجه روند انتقال حرارت را کاهش خواهد داد که این باعث گرم شدن بلوک و در نهایت کاهش مقدار حرارت تولیدی و نوسلت خواهد شد.

جهت بررسی اثر استفاده از ماده متخلخل به جای بلوک جامد فاکتور نوسلت به‌صورت $Nu/Nu_{\varepsilon=0}$ تعریف شده است که نشان‌دهنده میزان نوسلت در حالت وجود ماتریس متخلخل به مقدار نوسلت در حالت قرارگیری بلوک جامد است. نتایج حاصل از بررسی این فاکتور در نسبت ضرایب هدایتی و تخلخل‌های مختلف در شکل 5 آورده شده است.



شکل 6 تغییرات خطوط جریان در تخلخل و نسبت ضرایب هدایتی مختلف

با توجه به تفسیر بالا، می‌توان نتیجه گرفت که جنس ماده متخلخل در تخلخل‌های بالا تاثیر چندانی نخواهد داشت، ولی در تخلخل‌های پایین هرچه ماتریس متخلخل رساناتر باشد، توزیع یکنواخت‌تر دما و در نتیجه تولید حرارت و نوسلت بیشتری به‌دست خواهد آمد.

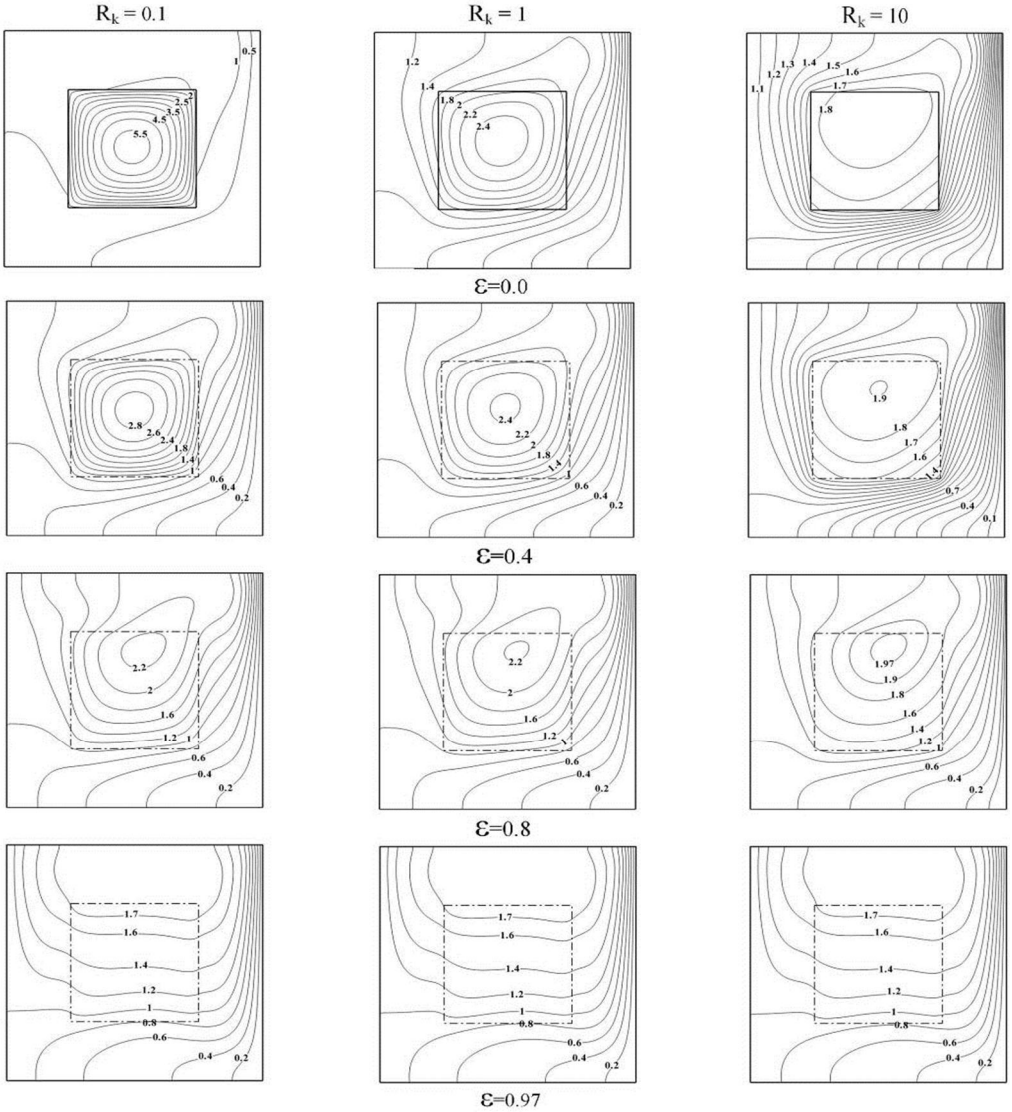
در تخلخل‌های پایین، به‌دلیل حاکم بودن رژیم هدایتی، اثر ضریب هدایت حرارتی موثر ماتریس متخلخل بیشتر بوده که سبب توزیع بیشتر حرارت خواهد شد و طبق رابطه 5 در نسبت‌های هدایتی بالا بیشترین مقدار آن در تخلخل صفر به‌دست خواهد آمد. بنابراین، در نسبت‌های هدایتی بیشتر از 1 و تا تخلخل 0/6، که در آن رژیم هدایتی حاکم است، مقدار فاکتور نوسلت تغییر چندانی نخواهد یافت، ولی، با تغییر به رژیم جابه‌جایی، اثر هدایت حرارتی کم رنگ شده است. لذا، رشد فاکتور، یعنی افزایش نوسلت جابه‌جایی به نوسلت هدایتی، را شاهد خواهیم بود.

در مقابل در نسبت‌های هدایتی کمتر از 1 چون با کاهش تخلخل مقدار ضریب هدایت حرارتی موثر ماتریس متخلخل کاهش می‌یابد، حالتی رخ خواهد داد که هیچ یک از رژیم‌های جابه‌جایی و هدایتی موجود نیست و در نتیجه حرارت درون بلوک و ماده متخلخل محبوس خواهد شد.

اما در تخلخل‌های بالا مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار تخلخل تا 0/97 مقدار نوسلت به بیش از 2 برابر رسیده است که علت آن را می‌توان نفوذ نانوسیال به درون ماتریس متخلخل و در نتیجه کاهش دما و تولید حرارت بیشتر دانست.

جهت بررسی خطوط جریان و دما به‌ترتیب شکل‌های 6 و 7 آورده شده‌اند. در شکل‌های حاضر ردیف‌ها نشان‌دهنده تغییرات نسبت‌هدایت و ستون‌ها تغییرات تخلخل را نمایش می‌دهند.

همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، در تخلخل صفر نفوذ سیال به درون منبع حرارتی صورت نمی‌گیرد، ولی با افزایش تخلخل نفوذ بیشتر خواهد شد که رژیم انتقال حرارت را از هدایت به جابه‌جایی تغییر خواهد داد. با کاسته شدن مقاومت ماتریس متخلخل و نفوذ بیشتر نانوسیال به درون آن و از طرفی تولید بیشتر حرارت به‌دلیل کاهش دما، تولید حرارت داخلی افزایش یافته و در نتیجه فرم جریان از حلقه واحد به دو حلقه مجزا تبدیل خواهد شد. همچنین، افزایش نسبت‌هدایت در تخلخل‌های پایین، اثر بیشتری داشته و سبب تولید حرارت بیشتر و در نتیجه افزایش سرعت جریان درون محفظه خواهد شد. ولی در تخلخل‌های بالا به‌دلیل کاهش اثر نسبت‌هدایت خطوط جریان تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارند.



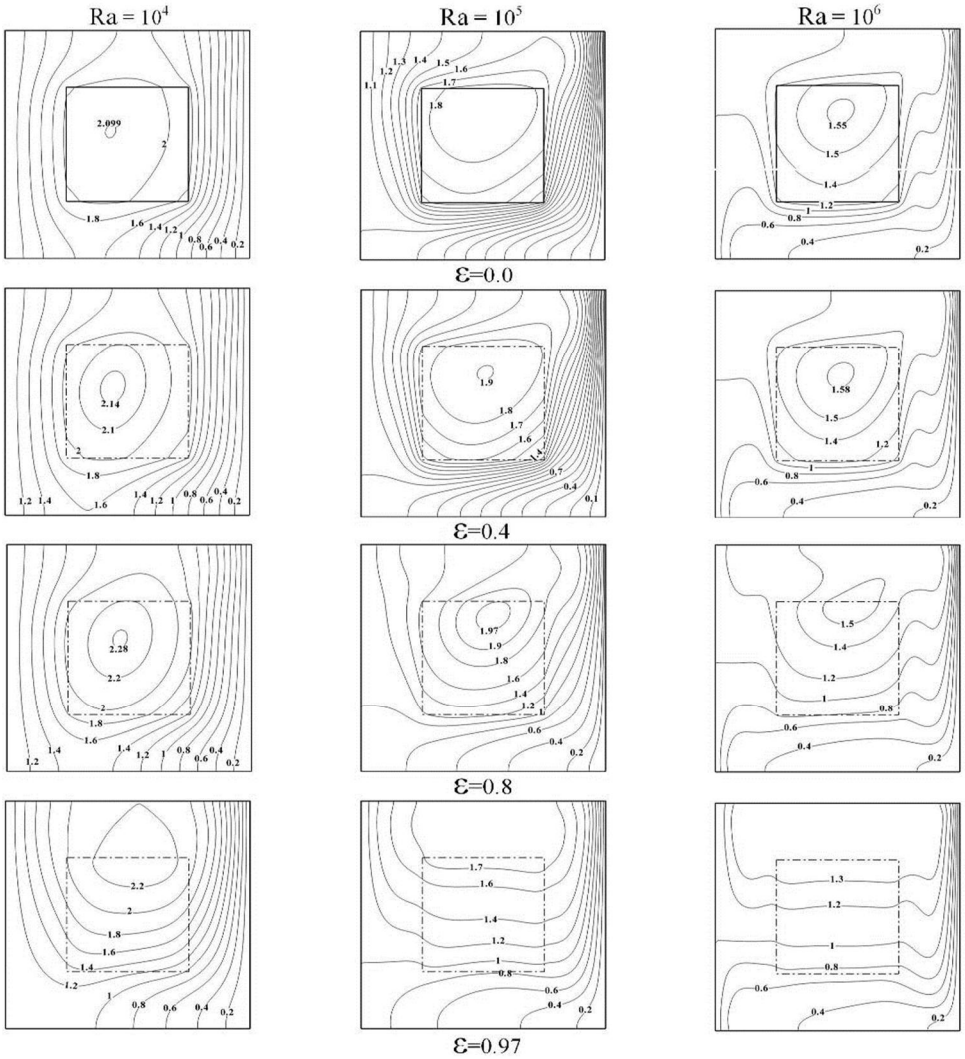
شکل 7 تغییرات خطوط همدما در تخلخل و نسبت ضرایب هدایتی مختلف

اثر افزایش نسبت‌هدایت بر خطوط هم‌دما و در نتیجه توزیع دما درون محفظه در شکل 7 به وضوح قابل مشاهده است. همان‌طور که اشاره شد استفاده از ماده متخلخل عایق در تخلخل‌های پایین سبب محبوس شدن حرارت درون ماتریس متخلخل خواهد شد، ولی افزایش نسبت‌هدایت به آزاد شدن حرارت و کاهش دمای ماتریس متخلخل و در نتیجه تولید حرارت بیشتر کمک خواهد کرد. آن طور که انتظار می‌رود، با افزایش تخلخل و گذر به رژیم جابه‌جایی اثر نسبت‌هدایت کاهش می‌یابد که این امر در تخلخل 0/8 مشاهده می‌شود و در تخلخل حدی 0/97 تقریبا غیرقابل تفکیک است.

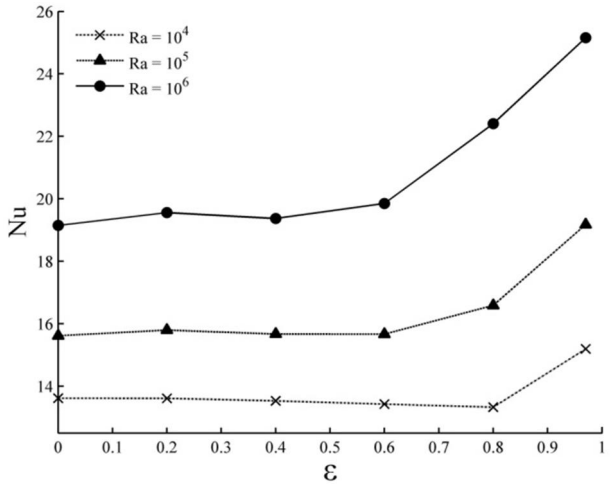
3-2- اثر تغییرات عدد رایلی در تخلخل‌های مختلف

اثر تغییرات عدد رایلی در تخلخل‌های مختلف بر روی میدان‌های سیال و حرارت در R_k=10، φ=0/1 و q=1000 مورد بررسی قرار گرفته است. اثر این تغییرات بر خطوط هم‌دما در شکل 8 آورده شده است. در این شکل ردیف‌ها نشان‌دهنده تغییرات رایلی و ستون‌ها تغییرات تخلخل را نمایش می‌دهند. همان‌طور که از شکل واضح است، افزایش مقدار عدد رایلی سبب افزایش قدرت گردابه‌ها و همچنین سرعت و نفوذ آن‌ها به درون ماتریس متخلخل خواهد شد که این سبب تغییر فرم کلی خطوط هم‌دما از حالت عمودی در رایلی پایین به خطوط نسبتا افقی در رایلی‌های بالا شده است. این تغییر فرم نشان‌دهنده تبدیل انتقال حرارت هدایتی به انتقال حرارت جابه‌جایی است. در تخلخل صفر، سیال توانایی نفوذ به درون ماتریس متخلخل را نداشته، ولی سرعت چرخش آن در اطراف بلوک گرم افزایش می‌یابد که می‌تواند برداشت انرژی بیشتری از سطح بلوک گرم داشته و در نتیجه دمای داخل بلوک را پایین بیاورد. از طرفی این افزایش سرعت، تنش‌های برشی بزرگ‌تر و در نتیجه افت بیشتری را به نانوسیال تحمیل خواهد کرد. با افزایش تخلخل، نانوسیال نفوذ بیشتری را به درون ماتریس متخلخل انجام داده و مستقیما انرژی را به دیوار سرد سمت راست انتقال می‌دهد. از طرفی با نفوذ بیشتر سیال به درون ماتریس متخلخل دما کاهش یافته و تولید حرارت بیشتر می‌شود که این سبب جابه‌جایی بیشتر و افقی‌تر شدن خطوط هم‌دما خواهد شد. با بررسی خطوط هم‌دما مربوط به تخلخل 0/97 در رایلی 10^4 می توان نتیجه گرفت که فقط در این تخلخل است که رژیم جابه‌جایی بر ماتریس متخلخل حاکم شده و می‌تواند نوسلت را افزایش دهد.

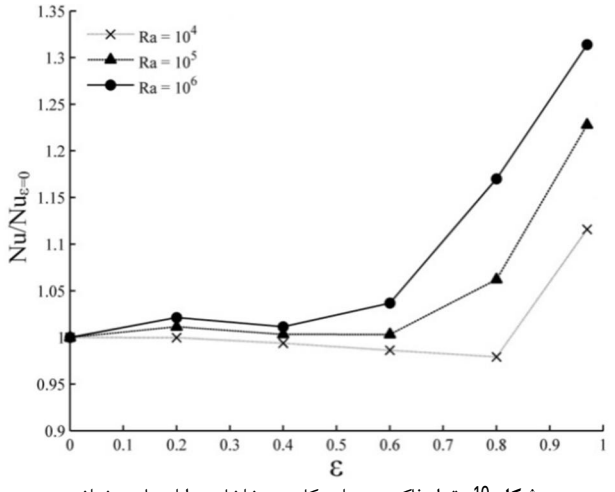
در شکل 9، مقادیر نوسلت به‌ازای اعداد رایلی و تخلخل مختلف نمایش داده شده است. با توجه به توضیح‌های ارائه شده، افزایش رایلی سبب قدرت بیشتر گردابه‌ها و انتقال و تولید بیشتر حرارت درون محفظه در تمامی تخلخل‌ها خواهد شد. از طرفی می‌توان مشاهده کرد که در تمامی رایلی‌ها تاثیر سه اثر ذکر شده و الگوی تغییرات نوسلت پابرجاست. نقطه قابل توجه در شکل 9 انتقال نقطه مینمم منحنی‌ها به تخلخل‌های پایین با افزایش رایلی است.



شکل 8 تغییرات خطوط همدما در تخلخل و رایلی‌های مختلف



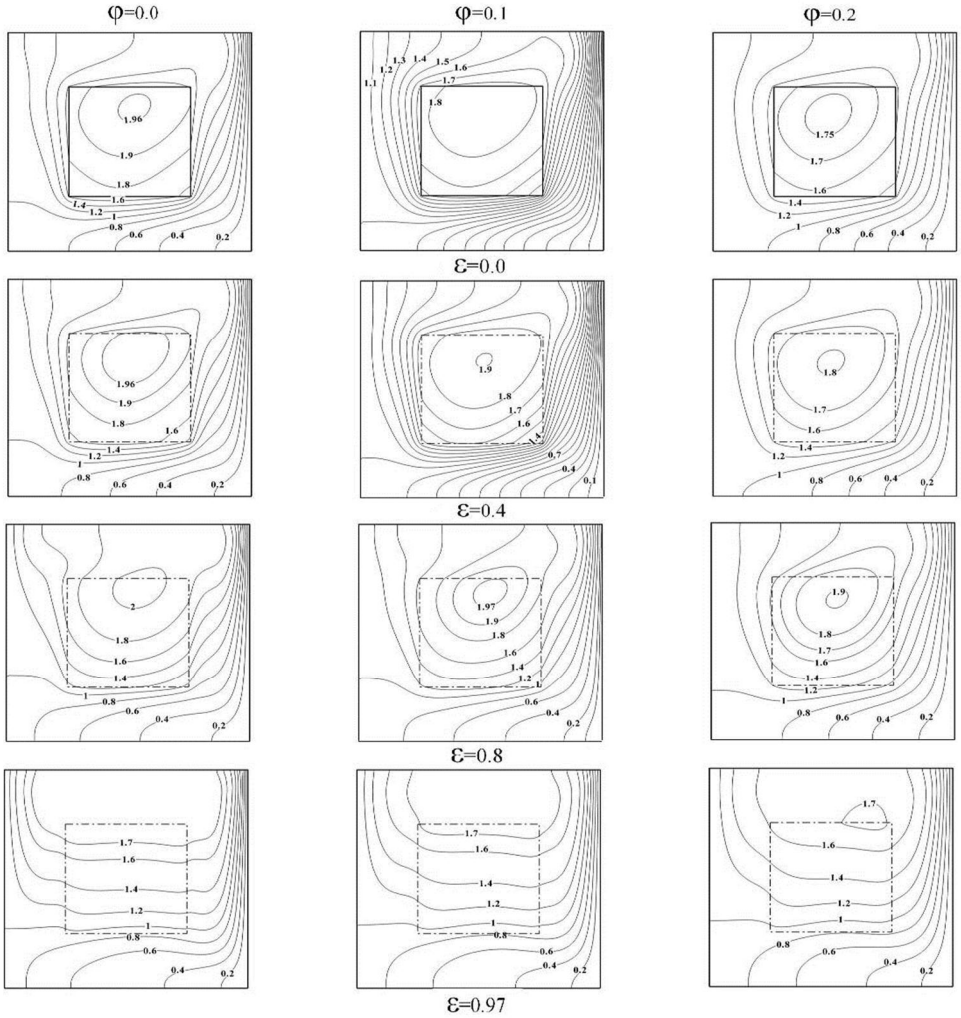
شکل 9 مقدار نوسلت کل در تخلخل و رایلی‌های مختلف



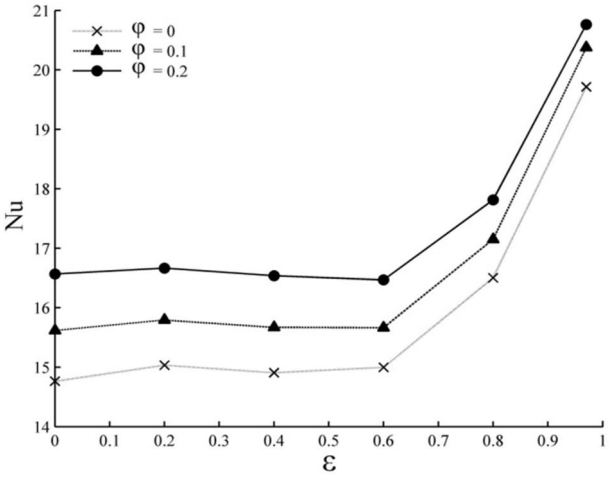
شکل 10 مقدار فاکتور نوسلت کل در تخلخل و رایلی‌های مختلف

بنابراین، در رایلی پایین 10^4 نقطه مینیمم نمودار (که در واقع نقطه تقابل جابه‌جایی و هدایت است) به تخلخل 0/8، در رایلی متوسط 10^5 به تخلخل 0/6 و در رایلی بالای 10^6 به تخلخل 0/4 رسیده است. همچنین، در تخلخل صفر نیز می‌توان مشاهده کرد که با افزایش رایلی و سرعت‌های چرخش اثر تنش برشی نیز در دیواره بلوک بیشتر شده و بنابراین مقادیر نوسلت افت بیشتری خواهد داشت.

در شکل 10، به بررسی فاکتور نوسلت پرداخته شده است. همان‌طور که در بخش بررسی رایلی توضیح داده شد، در رایلی‌های پایین، به‌دلیل قدرت کم گردابه‌ها و نفوذ کم‌تر آن‌ها به درون ماتریس متخلخل، در اکثر تخلخل‌ها (تا تخلخل 0/8) رژیم هدایتی حاکم است. از طرفی، با افزایش تخلخل و بنابه رابطه (5)، ضریب انتقال حرارت هدایتی محیط متخلخل کاهش می‌یابد که این سبب کاهش انتقال حرارت و افت فاکتور نوسلت خواهد شد.



شکل 11 تغییرات خطوط همدما در تخلخل و رایلی‌های مختلف



شکل 12 مقدار نوسلت کل در تخلخل و رایلی‌های مختلف

اما، با افزایش رایلی، دامنه رژیم جابه‌جایی تا تخلخل 0/4 افزایش می‌یابد و تقریبا در تمامی تخلخل‌ها و مخصوصا در تخلخل‌های بالا سبب افزایش فاکتور نوسلت می‌شود. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از تخلخل کمتر در رایلی‌های پایین و تخلخل بالا در رایلی‌های بالا می‌توان بهترین فاکتور نوسلت را به‌دست آورد که این افزایش در تخلخل‌های زیر 0.6 کمتر از 5% و در تخلخل‌های بالای 6/ 0تا 32% قابل افزایش است.

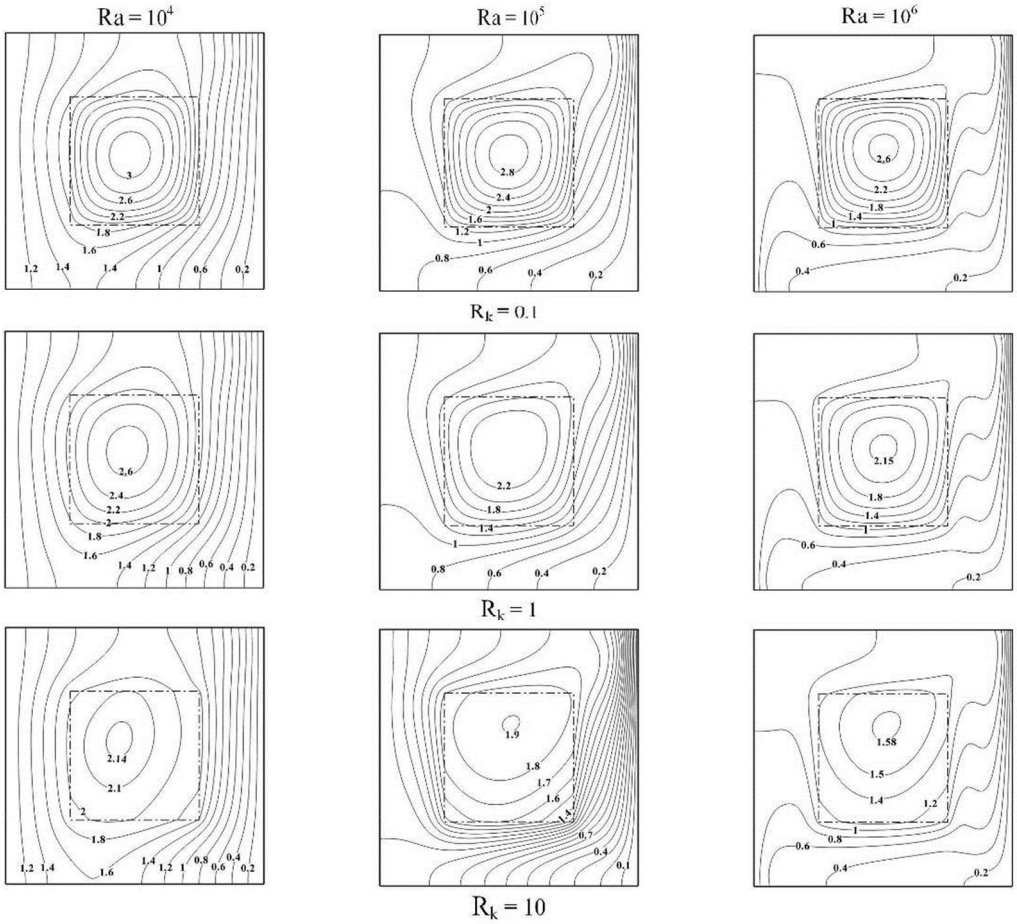
3-2- اثر تغییرات کسر حجمی نانوسیال در تخلخل‌های مختلف

افزودن ذرات نانو به سیال پایه سبب اثر مثبت افزایش ضریب هدایت حرارتی و اثر منفی افزایش لزجت در نانوسیال می‌شود. جهت بررسی این آثار بر خطوط هم-دمای درون محفظه شکل 11 آورده شده است. در این شکل ردیف‌ها تغییرات کسرحجمی نانوسیال و ستون‌ها تغییرات تخلخل را نمایش می‌دهند. اثر تغییرات کسر حجمی نانوسیال در تخلخل‌های مختلف بر روی میدان‌های سیال و حرارت در $Ra=10^5$، $R_k=10$ و q=1000 مورد بررسی قرار گرفته است.

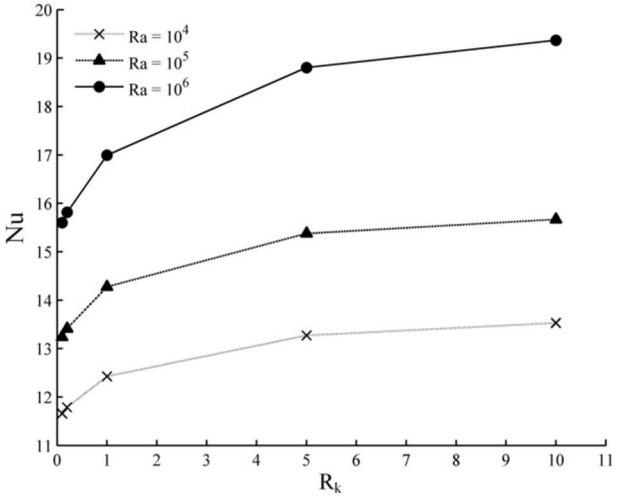
همان‌طور که اشاره شد، افزایش کسر حجمی سبب افزایش ضریب انتقال حرارت شده و در نتیجه دریافت و انتقال حرارت توسط سیال افزایش خواهد یافت. این پدیده سبب کاهش بیشتر دما و تولید حرارت بیشتر و از طرفی افزایش سرعت گردابه‌ها در محفظه خواهد شد. در تمامی تخلخل‌ها با افزایش کسر حجمی، می‌توان شاهد افزایش جابه‌جایی و همچنین کاهش دمای بیشینه محفظه بود. از طرفی افزایش تخلخل اجازه نفوذ نانوسیال به درون ماتریس متخلخل را می‌دهد که این سبب اضافه شدن اثر جابه‌جایی و برداشت بیشتر انرژی می‌شود.

با توجه به شکل 12 می‌توان مشاهده کرد که فرم کلی تغییرات نوسلت نسبت به تخلخل، با افزایش کسر حجمی نانوسیال تغییر نخواهد کرد. همچنین، افزودن کسر حجمی در تمامی تخلخل‌ها سبب افزایش مقدار نوسلت خواهد شد که دلیل آن را می‌توان در افزایش ضریب هدایت حرارتی دانست.

اما نکته قابل توجه در نمودار حاضر، تاثیر بیشتر افزودن نانوسیال در تخلخل‌های پایین است. افزودن نانوذرات سبب افزایش لزجت نانوسیال خواهد شد که با چرخش نانوسیال درون محفظه سبب افزایش مقاومت حرکتی می‌شود.



شکل 13 تغییرات خطوط همدما در ضرایب هدایتی و رایلی‌های مختلف



شکل 14 مقدار نوسلت کل در تخلخل و رایلی‌های مختلف

این مقاومت زمانی بیشتر افزایش خواهد یافت که رژیم جابه‌جایی درون ماتریس متخلخل نیز وارد معادلات شود. با ورود نانوسیال به درون ماتریس متخلخل، معادله دارسی که رابطه مستقیمی با لزجت نانوسیال دارد وارد معادله شده و مقاومت بیشتری را در جریان ایجاد می‌کند. مقاومت دارسی از رشد سریع نوسلت مشابه با تخلخل‌های پایین جلوگیری می کند، از طرفی اثر افزوده شدن ناحیه میانی (ماتریس متخلخل) به محیط چرخش و افت‌های ناشی از تنش‌های برشی ایجاد شده را نمی‌توان بی‌تاثیر دانست.

3-3- اثر تغییرات عدد رایلی در نسبت هدایت مختلف

از آنجایی که اثر نسبت هدایت حرارتی در رژیم هدایتی یعنی تخلخل‌های پایین قابل توجه است، بررسی اثر رایلی و نسبت هدایت در تخلخل پایین انجام گرفته است. مشخصات بررسی عبارت‌اند از ε=0/4، φ=0/1 و q=1000.

شکل 13 نشان‌دهنده خطوط هم‌دماست که ردیف‌ها تغییرات عدد رایلی و ستون‌ها تغییرات نسبت‌هدایت را نمایش می‌دهند. همان‌طور که اشاره شد، افزایش رایلی قدرت گردابه را افزایش داده و در تمامی نسبت هدایتها سبب خنک شدن سطح ماتریس متخلخل و در نهایت سبب خنک شدن ماتریس و تولید حرارت بیشتر می‌شود. افزایش نسبت‌هدایت نیز سبب توزیع یکنواخت‌تر حرارت و خنک شدن بیشتر ماتریس متخلخل شده است. درصورت استفاده از ماتریس متخلخل عایق نسبت به نانوسیال (نسبت ضریب هدایتی پایین) حرارت تولید شده درون ماتریس حبس شده و توانایی تبادل از دیواره‌ها را ندارد، هرچند با افزایش رایلی قدرت نفوذ بیشتر شده و دما کمی افت می‌کند. ولی، در ماده عایق این افت دما چندان قابل توجه نیست، یعنی تاثیر رایلی بر نوسلت میزان قابل توجهی نیست. با استفاده از ماتریس متخلخل هادی نسبت به نانوسیال (نسبت ضریب هدایتی بالا) حرارت تولید شده بلافاصله به دیواره‌های ماتریس رسیده و انتقال می‌یابد که این سبب کاهش دمای ماتریس و در نتیجه تولید حرارت بیشتر می‌شود.

همچنین، حرارت تولید شده خود سبب افزایش قدرت گردابه‌ها و انتقال حرارت بیشتر خواهد شد. افزایش رایلی نیز در ماتریس هادی اثر بیشتری بر کاهش دما و تولید حرارت خواهد گذاشت. در شکل 14 مقادیر نوسلت در نسبت هدایتی 0/1، 0/2، 1، 5 و 10 و رایلی‌های مختلف نمایش داده شده است. افزایش نسبت هدایت سبب توزیع یکنواخت حرارت درون ماتریس متخلخل و در نتیجه تولید حرارت و نوسلت بیشتر در تمام رایلی‌ها خواهد شد. از طرفی افزایش رایلی نیز قدرت گردابه‌ها و انتقال حرارت را افزایش داده که سبب انتقال و تولید بیشتر حرارت شده است.

اما نکته قابل ملاحظه در شکل 14 میل کردن نمودارها به‌سمت مقدار خاصی از نوسلت با افزایش هرچه بیشتر نسبت هدایت است. علت این پدیده را می‌توان در محدود بودن یکنواخت شدن دما درون ماتریس متخلخل دانست، به‌طوری که اگر نسبت هدایت به اندازه کافی افزایش یابد، حرارت تولید شده درون ماتریس متخلخل، توزیع شده و پروفیل دمای مشخصی ایجاد می‌شود. با افزایش بیشتر نسبت هدایت این پروفیل دما تغییر خاصی نکرده و در نتیجه تولید حرارت و عدد نوسلت افزایش محسوسی نخواهد یافت.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-مس درون محفظه بسته‌ای که مرکز آن با ماده متخلخل با تولید حرارت داخلی پر شده، پرداخته شده است.

نتایج نشان می‌دهد که تغییر تخلخل ماتریس متخلخل، سبب تغییر در قدرت نفوذ نانوسیال به درون محیط متخلخل شده و تغییرات نسبت هدایت ماتریس متخلخل سبب ایجاد دو رژیم متفاوت جابه‌جایی و هدایتی درون این محیط می‌شود. با افزایش و کاهش تخلخل به‌ترتیب جابه‌جایی و هدایت تقویت می‌شود که این سبب ایجاد نقطه مینیمم در تخلخل‌های بین 0/4 تا 0/6 بسته به پارامترهای دیگر شده است. تغییر نسبت هدایت در تخلخل بالا تاثیری در نوسلت ندارد، ولی افزایش نسبت هدایت در تخلخل پایین می‌تواند نوسلت را تا دو برابر افزایش دهد. از طرفی، با افزایش نسبت هدایت، نوسلت به مقدار خاصی میل می‌کند که علت آن را می‌توان در یکنواخت شدن دما درون ماتریس متخلخل و تغییر ناچیز تولید حرارت با افزایش هرچه بیشتر نسبت هدایت دانست.

با افزایش رایلی در تخلخل‌های بالا نفوذ به درون ماتریس متخلخل افزایش می‌یابد و در تخلخل‌های پایین دیواره خارجی ماتریس متخلخل خنک می‌شود که در هر دو حالت با خنک شدن ماتریس نوسلت بیشتری در تمامی دامنه تخلخل به‌دست می‌آید. همچنین، نتیجه گرفته شد که با استفاده از تخلخل کمتر در رایلی‌های پایین و تخلخل بالا در رایلی‌های بالا می‌توان بهترین فاکتور نوسلت را به‌دست آورد که این افزایش در تخلخل‌های زیر 0/6 کمتر از 5% و در تخلخل‌های بالای 0/6 تا 32% قابل افزایش است.

نتایج نشان می‌دهد که افزایش کسر حجمی نانوسیال آب-مس سبب افزایش نوسلت در تمامی تخلخل‌ها می‌شود، اما در تخلخل‌های پایین، افزایش هدایت حرارتی نانوسیال اثر بیشتری از افزایش لزجت آن داردکه این سبب افزایش بیشتر نوسلت در تخلخل‌های پایین‌تر نسبت به تخلخل‌های بالاتر خواهد شد.

5- فهرست علائم

C_p	ظرفیت حرارتی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
d	قطر اجزای کروی تشکیل‌دهنده ماده متخلخل (m)
Da	عدد دارسی
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
H	ارتفاع محفظه (m)
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
K	نفوذپذیری ماده متخلخل (m^2)
Nu	عدد نوسلت

p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل
q	تولید حرارت بی‌بعد
Ra	عدد رایلی
T	دما (K)
u	سرعت در راستای x (ms^{-1})
v	سرعت در راستای y (ms^{-1})

علایم یونانی

α	ضریب نفوذ حرارتی (m^2s^{-1})
β	انبساط حرارتی (K^{-1})
δ	کمیت دو مقداری استفاده شده در معادلات (2) و (3) و (4)
ε	تخلخل
θ	دمای بی‌بعد
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
φ	کسرحجمی نانوسیال

زیرنویس‌ها

eff	موثر در محیط متخلخل
f	سیال پایه
L	چپ
n	عمود
nf	نانوسیال
p	نانوذره
PM	محیط متخلخل
R	راست
s	ماتریس متخلخل
t	مماس

6- مراجع

[1] D. Nield, A. Bejan, *Convection in Porous Media,* Third Ed. New York:Springer , 2006.

[2] D. L. Youchison, B. E. Williams, R. E. Benander, Porous nuclear fuel element for high-temperature gas-cooled nuclear reactors, Patent No.: US 7,889,146 B1.Date of Patent: Mar. 1, 2011.

[3] K. Vafai, *Porous Media: Applications in Biological Systems and Biotechnology,* New York CRC Press, 2010.

[4] K. Khanafer, K. Vafai, Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 46, pp. 3639–3653, 2003.

[5] J. Kim, Y. T. Kang, C. K Choi, Analysis of convective instability and heat characteristics of nanofluids, *Phys. Fluids,* Vol. 16, pp. 2395-2401, 2004.

[6] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, L. J. Thompson, Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, *Proceeding of the Symposium on Nanophase and Nanocomposite Materials II,* Vol. 457, Materials Research Society, USA, pp. 3-11, 1997.

[7] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *J. Appl. Phys.,* Vol. 91, pp. 4568-4572, 2002.

[8] M. Mahmoodi, S. Mazrouei Sebdani, Natural convection in a square cavity containing a nanofluid and an adiabatic square block at the center, *Superlattices and Microstructures,* Vol. 52, pp. 261-275, 2012.

[9] G. A. Sheikhzadeh, A. Arefmanesh, M. H. Kheirkhah, R. Abdollahi, Natural convection of Cu–water nanofluid in a cavity with partially active side walls, *European Journal of Mechanics B/Fluids,* Vol. 30, pp. 166-176, 2011.

[10] K. L. Walker, G. M. Homsy, Convection in a porous cavity, *J. Fluid Mech.* Vol. 87, pp.449-474, 1978.

[11] V. Prasad, F. A. Kulacki, Convective heat transfer in a rectangular porous cavity–effect of aspect ratio on flow structure and heat transfer, *J. Heat Transfer,* Vol. 106, pp.158-165, 1984.

[12] Z. G. Du, E. Bilgen, Natural convection in vertical cavities with internal heatgenerating porous media, *Heat Mass Transfer,* Vol. 27, pp. 149-155, 1992.

[13] L. R. Mealey, J .H. Merkin, Steady finite Rayleigh number convective flows in a porous medium with internal heat generation, *International Journal of Thermal Sciences,* Vol.48, pp. 1068-1080, 2009.

[14] M. Tahmasebi Kohyani, B. Ghasemi, A. Pasandideh Fard, Heat generation effects on natural convection in porous cavity with different walls temperature, *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT),* Vol. 3, pp. 274-287, 2012.

[15] S. B. Sathe, T. W. Tong, Measurements of natural convection in partially porous rectangular enclosures of aspect ratio 5, *int. comm. heat masstransfer,* Vol. 15, pp. 203-212, 1988.

[16] C. Beckermann, S. Ramadhyani, R. Viskanta, Natural convection Flow and heat transfer between a fluid layer and a. porous layer inside a rectangular enclosure, *Journal of Heat Transfer,* Vol. 109, pp. 363-370, 1987.

[17] D. A. Nield, A. V. Kuznetsov, The Chenge Minkowycz problem for naturalconvective boundary-layer flow in a porous medium saturated by a nanofluid ,*Int. J. Heat Mass Transf,* Vol. 52, pp. 5792-5795, 2009.

[18] P. Cheng, W. J. Minkowycz, Free convection about a vertical flat plateembedded in a porous medium with application to heat transfer from a dike, *J. Geophys. Res,* Vol. 82, pp. 2040-2044, 1977.

[19] S. Ahmad, I. Pop, Mixed convection boundary layer flow from a vertical flatplate embedded in a porous medium filled with nanofluids, *Int. Comm. Heat Mass Tran,* Vol. 37, pp. 987-991, 2010.

[20] R. K. Tiwari, M. K. Das, Heat transfer augmentation in a two-sided lid-drivendifferentially heated square cavity utilizing nanofluids, *Int. J. Heat Mass Transf,* Vol. 50, pp. 2002-2018, 2007.

[21] Q. Sun, I. Pop, Free convection in a triangle cavity filled with a porous medium saturated with nanofluids with flush mounted heater on the wall, *Int. J. Therm. Sci,* Vol. 50, pp. 2141-2153, 2011.

[22] G. Bin Kim, J. Min Hyun, H. Sang Kwak, Buoyant convection in a square cavity partially filled with a heat-generating porous medium, *Numerical Heat Transfer, Part A,* Vol. 40, pp. 601- 618, 2001.

[23] M. A. Teamah, W. M. El-Maghlany, Augmentation of natural convective heat transfer in square cavity by utilizing nanofluids in the presence of magnetic field and uniform heat generation/ absorption, *International Journal of Thermal Sciences,* Vol. 58, pp. 130-142, 2012.

[24] S. Ergun, Fluid flow through packed columns, *ChemicalEngineering Progress,* Vol. 48, pp. 89-94, 1952.

[25] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer,* Vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.

[26] H. C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solutions, *Journal of Chemical Physics,* Vol. 20, pp. 571-581, 1952.

[27] J. C. Maxwell-Garnett, Colours in metal glasses and in metallic films, *Philosophical Transactions of the Royal Society A,* Vol. 203, pp. 385–420, 1904.

[28] C. Beckermann, S. Ramadhyani, R. Viskanta, Natural convection flow and heat transfer between a fluid layer and a porous layer inside a rectangular enclosure, *Journal of Heat Transfer,* Vol. 109, pp. 363, 1987.

[29] H. F. Oztop, E. Abu-Nada, Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow,* Vol. 29, pp. 1326–1336, 2008.