

# مطالعه عددی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محیط متخلخل مربعی شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن

احمد رضا رحمتی\* و رضا حاج زمان  
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۲۱ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۱۰/۲۹)

DOI: 10.18869/acadpub.jcme.35.2.47

**چکیده** - در این تحقیق برای اولین بار انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص ثابت و متغیر در محیط متخلخل مربعی شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی می‌شود. دیواره‌های افقی محفظه عایق بوده و دیواره عمودی سمت چپ گرم و دیواره عمودی سمت راست سرد است. مطالعه در اعداد رایلی  $10^2$ ،  $10^4$ ،  $10^5$ ،  $10^6$ ، اعداد دارسی  $10^{-2}$ ،  $10^{-4}$ ، ضرایب تخلخل  $0/4$ ،  $0/6$ ،  $0/9$  و کسر حجمی نانوذرات  $0$ ،  $0/01$ ،  $0/02$ ،  $0/03$  انجام شده است. به منظور در نظر گرفتن اثر محیط متخلخل از مدل دارسی-فورشیمر استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد حضور محیط متخلخل سرعت نانوسیال و در نتیجه قدرت جریان را کاهش می‌دهد. با کاهش عدد دارسی و ضریب تخلخل انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی ضعیف شده و رفتار جابه‌جایی طبیعی نانوسیال به هدایت حرارتی نزدیک می‌شود. با افزایش عدد رایلی قدرت جریان در محفظه زیاد می‌شود و باعث افزایش عدد ناسلت متوسط خواهد شد. در همه موارد مورد مطالعه افزایش کسر حجمی نانوذرات موجب بهبود در انتقال حرارت می‌شود. در مدل خواص ثابت با افزایش کسر حجمی نانوذرات مقدار عدد ناسلت متوسط بیشتر از مدل خواص متغیر افزایش پیدا می‌کند. نتایج نشان می‌دهد روش شبکه بولتزمن توانایی شبیه‌سازی جریان در محیط‌های متخلخل را دارد.

واژه‌های کلیدی: محیط متخلخل، نانوسیال، جابه‌جایی طبیعی، روش شبکه بولتزمن.

## Numerical Study of Natural Convection Heat Transfer of Nanofluid in a Square Shaped Porous Media using Lattice Boltzmann Method

A. R. Rahmati\* and R. Hajzaman

Department of Mechanical Engineering, Kashan University

**Abstract:** In this study, for the first time natural convection heat transfer of  $Al_2O_3$ -water nanofluid with constant and variable properties is investigated within square shape porous media using the lattice Boltzmann method. The horizontal walls of the cavity are insulated, and left and right vertical walls are hot and cold, respectively. The Study have been carried out for Rayleigh numbers of  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ , Darcy numbers of  $10^{-2}$ ,  $10^{-4}$ , porosity coefficients of 0.4, 0.6, 0.9 and solid volume fraction of 0, 0.01, 0.02 and 0.03. In order to consider the effect of porous media, Darcy-Forchheimer model is used. The results show that the

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ar\_rahmati@kashanu.ac.ir

presence of the porous media decreases the velocity of nanofluid and consequently decreases the strength of the flow. With decreasing Darcy number and porosity coefficient, natural convection heat transfer weakens and the mechanism of natural convection of nano-fluids tends to that of thermal conduction. With increasing Rayleigh number, the strength of flow in cavity and average Nusselt number increases. In all cases studied, increase in volume fraction improves heat transfer. In constant properties model, by increasing solid volume fraction, average Nusselt number increases more than that of variable properties model. The results show that Lattice Boltzmann method has the ability to simulate flow in porous media.

**Keywords:** Porous media, Nanofluid, Natural convection, Lattice Boltzmann method.

## فهرست علائم

w	ضریب وزنی	C	سرعت ذرات ( $ms^{-1}$ )
	علائم یونانی	Da	عدد دارسی
$\alpha$	ضریب پخش حرارتی ( $ms^{-2}$ )	F	تابع توزیع
$\beta$	ضریب انبساط حرارتی ( $k^{-1}$ )	F	نیروی حجمی ( $kgms^{-2}$ )
$\varepsilon$	ضریب تخلخل	g	شتاب ثقل ( $ms^{-2}$ )
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )	g	تابع توزیع
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $ms^{-2}$ )	H	عرض و طول محفظه (m)
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )	k	ضریب هدایت حرارتی ( $wm^{-1}k^{-1}$ )
$\varphi$	کسر حجمی نانوذرات	M	شماره آخرین گره در جهت عمودی
	زیرنویس‌ها	n	شماره آخرین گره در جهت افقی
c	سرد	p	فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
h	گرم	Pr	عدد پراتل
i	شماره لینک مدل شبکه	Ra	عدد رایلی
nf	نانو سیال	T	دما ( $K^{\circ}$ )
p	ذره	u	سرعت افقی ( $ms^{-1}$ )
		v	سرعت عمودی ( $ms^{-1}$ )

## ۱- مقدمه

الکتريکی، طراحی بهینه کوره‌ها و کلکتورهای خورشیدی، رشد کریستال در مایعات، ایمنی و عایق‌بندی راکتورهای هسته‌ای، تکنولوژی عایق‌های متخلخل و پروسه‌های مربوط به نگهداری مواد غذایی تنها بخشی از کاربردهای این موضوع است.

دیوال دیویس [۱] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را برای هوا در یک محفظه به صورت عددی با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار داد. در این محفظه

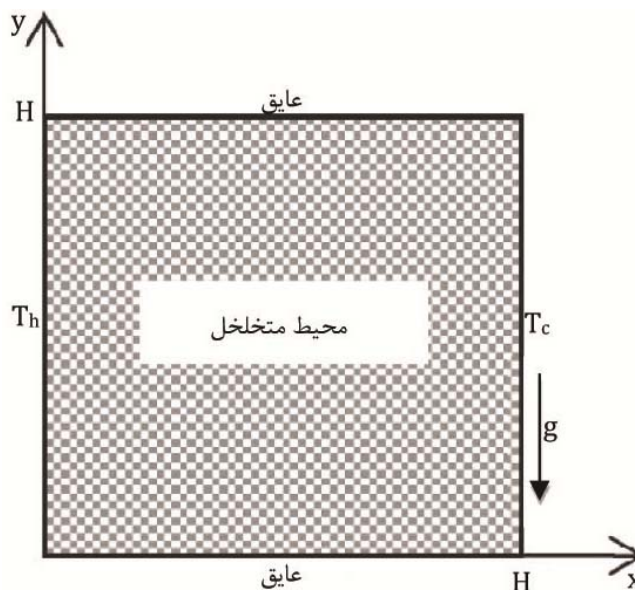
مطالعه فیزیک جریان در محیط متخلخل از مسائل پیچیده و مهم در عرصه‌های علمی و مهندسی است. در مکانیک سیالات بحث دینامیک جریان سیال در یک محیط متخلخل یک موضوع نسبتاً قدیمی است و تئوری اصلی آن از قرن نوزدهم سرچشمه می‌گیرد. با این حال بحث انتقال حرارت جابه‌جایی در محیط متخلخل از اواخر قرن بیستم مورد توجه قرار گرفت. انتشار آلاینده‌ها در زمین، خنک کاری وسایل

دیواره‌های افقی عایق و دیواره عمودی سمت چپ گرم و سمت راست سرد است. براساس یافته‌های این محقق، با افزایش عدد رایلی، عدد ناسلت متوسط، سرعت‌های بیشینه افقی و عمودی در محفظه، افزایش پیدا می‌کند. نیتیاراسو و همکاران [۲] انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی طبیعی را در محیط متخلخل، مورد بررسی قرار دادند. آنها برای مدل‌سازی محیط متخلخل از روابط داریسی، فورشمیر، بریکمن و مدل عمومی (بریکمن-فورشمیر) بهره بردند. براساس نتایج آنها رابطه داریسی برای اعداد رایلی پایین مناسب است. از طرفی برای اعداد رایلی و داریسی پایین، عدد ناسلت میانگین اغلب به مقادیر ضریب تخلخل، عدد داریسی و رایلی وابسته است. گو و ژائو [۳] انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی طبیعی را در یک محفظه با محیط متخلخل با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد ارزیابی قرار دادند. براساس یافته‌های این محققین با افزایش عدد داریسی و ضریب تخلخل عدد ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند. ستا و همکاران [۴] جابه‌جایی طبیعی را در یک محیط متخلخل، داخل محفظه مربعی با دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های عمودی دما ثابت به وسیله روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. آنها اثرات محیط متخلخل را به وسیله یک نیروی خارجی در محفظه لحاظ کردند. ستا و همکاران [۴] نشان دادند که با افزایش عدد رایلی در تمام ضرائب تخلخل و اعداد داریسی، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. شکوهمند و همکاران [۵] جابه‌جایی اجباری را برای جریان آرام در یک کانال با محیط متخلخل مورد بررسی قرار دادند. آنها اثر تخلخل را به صورت نیروی خارجی لحاظ کردند و پروفیل سرعت و عدد ناسلت را برای جریان آرام کاملاً توسعه یافته درون کانال به دست آوردند. آنها نشان دادند که در کانال با کاهش عدد داریسی عدد ناسلت افزایش می‌یابد از طرفی هم نمی‌توان عدد داریسی را به صورت قابل توجهی کاهش داد چون در این صورت به پمپ با توان بیشتری نیاز خواهد بود.

حق‌شناس و همکاران [۶] جابه‌جایی طبیعی را در یک محیط متخلخل در محفظه باز با استفاده از روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار دادند. در این محفظه باز دیواره‌های افقی عایق و دیواره عمودی سمت چپ دما ثابت در نظر گرفته شد. براساس نتایج آنها با افزایش عدد رایلی در تمام ضرائب تخلخل، عدد ناسلت متوسط افزایش پیدا کرد. لای و یانگ [۷] اثرات نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را روی انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی، در محفظه مربعی مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از سه مدل برای شبیه‌سازی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم استفاده کردند. براساس یافته‌های آنها با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت متوسط در هر سه مدل افزایش پیدا کرد. لیو و همکاران [۸] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را در محیط متخلخل در دو محفظه مربعی با شرایط مرزی مختلف با استفاده از روش شبکه بولتزمن با ضریب تخفیف چندتایی مورد بررسی قرار دادند. در محفظه اول دیواره‌های افقی عایق است و دیواره عمودی سمت چپ گرم و دیواره عمودی سمت راست سرد است. در این تحقیق اثرات تخلخل به صورت یک نیروی خارجی در نظر گرفته شد. در محفظه دوم تمامی دیواره‌ها، دما ثابت و سرد است و یک چشمه حرارتی در محفظه قرار دارد. در این کار سرعت‌های افقی و عمودی بیشینه و عدد ناسلت متوسط در محدوده اعداد رایلی  $10^3$  تا  $10^9$  به دست آورده شد و خطوط جریان و هم‌دما به‌ازای اعداد داریسی  $10^{-2}$ ،  $10^{-4}$ ،  $10^{-6}$  رسم شد. هدف از این تحقیق بررسی اثر حضور محیط متخلخل بر میدان جریان و انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در محفظه مربعی است. پس از انتخاب روابط مناسب برای تعیین خواص نانوسیال، معادلات دیفرانسیل حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل و شرایط مرزی حاکم بر آن تعیین می‌شود.

## ۲- هندسه و معادلات حاکم

شکل (۱) هندسه موردنظر را به همراه شرایط مرزی آن نشان



شکل ۱- نمای شماتیک هندسه مورد بررسی و شرایط مرزی آن

• معادله پیوستگی:

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

• معادلات مومنتوم:

$$u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v}{\varepsilon} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (\varepsilon P) \right] + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] + \left[ -\varepsilon \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} k} v - \frac{\gamma \gamma \delta}{\sqrt{150 \varepsilon} k} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} v + \beta_{nf} g \varepsilon (T - T_m) \right] \quad (2)$$

$$u \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{\varepsilon} \right) + v \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u}{\varepsilon} \right) = -\frac{1}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon P) \right] + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] + \left[ -\varepsilon \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} k} u - \frac{\gamma \gamma \delta}{\sqrt{150 \varepsilon} k} (u^2 + v^2)^{\frac{1}{2}} u \right] \quad (3)$$

معادله انرژی:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

اثرات محیط متخلخل به صورت یک نیروی خارجی در نظر

می‌دهد. دیواره‌های افقی محفظه عایق بوده، دیواره عمودی در سمت چپ در دما ثابت  $T_h$  و دیواره عمودی سمت راست در دمای ثابت  $T_c$  ( $T_h > T_c$ ) قرار دارد.

برای رسیدن به معادلات حاکم، یک مدل پیوسته برای محیط متخلخل که بر پایه مفهوم حجم مشخصه اولیه بنا شده است، ایجاد می‌شود. یک مرجع دکارتی تعریف می‌شود و یک المان حجم به اندازه کافی بزرگ (نسبت به حجم حفره‌ها) مورد بررسی قرار می‌گیرد تا میانگین‌گیری قابل اعتمادی حاصل شود. معادلات حاکم براساس فرضیات زیر به صورت دو بعدی در دستگاه مختصات دکارتی و برای نانوسیال نوشته شده است [۲ و ۱۱]:

(۱) محیط همگن است، به عبارت دیگر مواد جامد و سیال نشت کرده در منافذ به صورت یکنواخت در سرتاسر محیط متخلخل توزیع شده است. (۲) محیط همسانگرد است. (۳) سیال غیرقابل تراکم و جریان دائم است. (۴) در هر نقطه از محیط متخلخل، ماتریس جامد در حال تعادل حرارتی با سیال موجود در منافذ است. (۵) از تقریب بوزینسک استفاده می‌شود.

$10^{-23} \times 1/38$  است.

در این کار از مدل بریکمن [۱۴] برای شبیه‌سازی لزجت دینامیکی نانوسیال استفاده شد:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2/5}} \quad (11)$$

چگالی و ضریب انبساط حجمی نانوسیال با استفاده از رابطه (۱۲) و (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۵]:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (12)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (13)$$

برای محاسبه ظرفیت گرمای ویژه و ضریب پخش گرمایی نانوسیال می‌توان از رابطه (۱۴) و (۱۵) بهره برد [۱۶]:

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (14)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (15)$$

#### ۴- مدل شبکه بولتزمن

در روش شبکه بولتزمن از مدل دوبعدی نه سرعتی یا به اصطلاح D2Q9 که در شکل (۲) نشان داده شده است، استفاده شد [۱۷]. بردارهای سرعت و ضرایب وزنی برای این مدل به صورت رابطه (۱۶) و (۱۷) تعریف می‌شود [۱۸ و ۱۹]:

$$c_i = \begin{cases} (0,0) & i=0 \\ \left[ \cos\left((i-1)\frac{\pi}{2}\right), \sin\left((i-1)\frac{\pi}{2}\right) \right] & i=1,2,3,4 \\ \left[ \sqrt{2} \left[ \cos\left((i-5)\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4}\right), \sin\left((i-5)\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{4}\right) \right] \right] & i=5,6,7,8 \end{cases} \quad (16)$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{4}{9} & i=0 \\ \frac{1}{9} & i=1,2,3,4 \\ \frac{1}{36} & i=5,6,7,8 \end{cases} \quad (17)$$

گرفته شد. این نیرو به همراه نیروی شناوری به صورت برداری در رابطه (۵) آورده شده است:

$$\mathbf{F} = -\frac{\varepsilon V}{k} \mathbf{u} - \frac{1/\gamma_5}{\sqrt{150} \varepsilon k} |\mathbf{u}| \mathbf{u} + \varepsilon \beta_{nf} \mathbf{g} (T - T_m) \quad (5)$$

اولین عبارت در معادله (۵)، عبارت دارسی است. داریسی رابطه‌ای خطی را برای سرعت سیال بیان می‌کند، این عبارت تا وقتی اعتبار دارد که سرعت به اندازه کافی کوچک، یا به اصطلاح جریان خزشی باشد. مجموع عبارت اول و دوم، عبارت فورشمیر نام دارد. با افزایش سرعت دیگر نمی‌توان از عبارت دارسی استفاده کرد و از عبارت فورشمیر که اثرات درگ غیرخطی ناشی از حضور ماده متخلخل را بیان می‌کند استفاده می‌شود و در نهایت هم آخرین عبارت، اثرات نیروی شناوری است [۱۰].

#### ۳- نوع و مدل انتخاب شده برای شبیه‌سازی نانوسیال

نانوسیالی که برای شبیه‌سازی انتخاب شد، نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم است. خواص این نانوسیال در جدول (۱) آمده است. مدل‌هایی که برای شبیه‌سازی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم انتخاب شد، مدل ماکسول [۱۱] برای خواص ثابت، و مدل پاتل [۱۲] برای خواص متغیر است:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} \quad (6)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \left[ 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + C k_p Pe \frac{A_p}{k_f A_f} \right] \quad (7)$$

$$\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f}{d_p} \frac{\phi}{1-\phi} \quad (8)$$

$$Pe = \frac{u_p d_p}{\alpha_f} \quad (9)$$

$$u_p = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_p} \quad (10)$$

در رابطه (۷) C ثابت تجربی است و برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم  $25000$  است.  $u_p$  سرعت حرکت براونی نانوذرات است.  $k_B$  ثابت بولتزمن است و مقدار آن

جدول ۱- خواص فیزیکی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم [۱۲ و ۱۳]

خواص فیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم
ظرفیت گرمای ویژه (J/kg <sup>o</sup> k)	۴۱۷۹	۷۶۵
چگالی (kg/m <sup>۳</sup> )	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
ضریب هدایت حرارتی (w/m <sup>o</sup> k)	۰/۶۱۳	۴۰
ضریب انبساط حجمی (۱/°k)	۲۱×۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۸۵×۱۰ <sup>-۵</sup>
لزجت دینامیکی (kg/m.s)	۸/۵۵×۱۰ <sup>-۴</sup>	-

در رابطه (۱۹) فرکانس برخورد،  $\omega_m$  از معادله (۲۰) به دست می آید [۲۲].  $F_i$ ، نیروی خارجی به واسطه وجود محیط متخلخل است:

$$\omega_m = \frac{1}{3v + 0.5} \quad (20)$$

از طرفی  $f_i^{eq}$  از رابطه (۲۱) به دست می آید [۲۳ و ۲۴].

$$f_i^{eq} = w_i \rho \left[ 1 + \alpha c_i \mathbf{u} + \frac{\alpha}{2\varepsilon} (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{\alpha}{2} \frac{(\mathbf{u})^2}{\varepsilon} \right] \quad (21)$$

در معادله (۲۱) بردار سرعت  $\mathbf{u}$  با استفاده از یک بردار سرعت موقتی به نام  $\mathbf{v}$  که اثرات محیط متخلخل را در معادله لحاظ می کند، به دست می آید:

$$\mathbf{v} = \sum_{i=0}^A \frac{\mathbf{c}_i f_i}{\rho} + \frac{1}{2} \varepsilon \beta_{nf} \mathbf{g} (T - T_m) \quad (22)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{v}}{c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |\mathbf{v}|}} \quad (23)$$

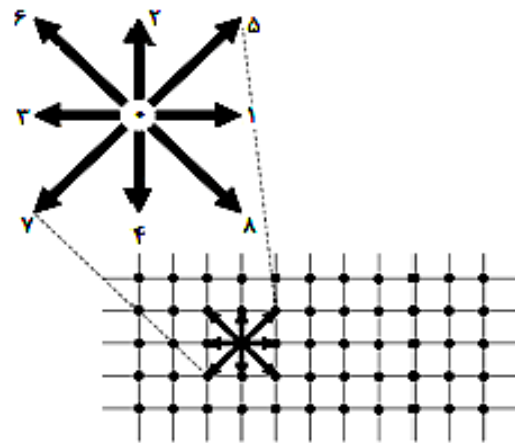
که مقادیر ثابت  $c_0$  و  $c_1$  به صورت رابطه (۲۴) تعریف می شود [۲۵]:

$$c_0 = \frac{1}{2} \left( 1 + \varepsilon \frac{1}{2k} \right), \quad c_1 = \frac{\varepsilon}{2} \frac{1/\gamma_5}{\sqrt{150 \cdot \varepsilon^2 k}} \quad (24)$$

در رابطه (۲۴)،  $\varepsilon$  ضریب تخلخل و  $k$  نفوذپذیری در محیط متخلخل است و با استفاده از عدد بدون بعد دارسی که به صورت رابطه (۲۵) تعریف می شود، به دست می آید [۲۶]:

$$Da = \frac{k}{H^2} \quad (25)$$

نیروی خارجی  $F_i$  که در معادله بولتزمن وجود دارد بیانگر



شکل ۲- آرایش شبکه برای مدل دو بعدی نه سرعتی، مدل D2Q9

در شبیه سازی با استفاده از روش شبکه بولتزمن، باید پارامترهای کنترل کننده در جابه جایی طبیعی مانند عدد رایلی و پرانتل مشخص شود. در این حالت برای شبیه سازی میدان جریان و میدان دما از دو تابع توزیع  $f$  و  $g$  استفاده می شود [۲۰]:

$$Ra = \frac{g \beta_f (T_h - T_c) H^2}{\alpha_f \nu_f}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad (18)$$

معادله بولتزمن با در نظر گرفتن نیروی خارجی، برای تابع توزیع  $f_i$  به صورت رابطه (۱۹) نوشته می شود [۲۱].

$$f_i(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}, t + \Delta t) - f_i(\mathbf{x}, t) = -\omega_m \left[ f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) \right] + \Delta t F_i \quad (19)$$

#### ۴-۱-۱- شرط مرزی کمانه کردن

شرط مرزی کمانه کردن برای مدل سازی، شرط مرزی جامد ساکن یا متحرک، شرط عدم لغزش یا جریان بر روی موانع مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش کاملاً ساده است به این صورت که ذرات ورودی به سمت مرز جامد به سمت دامنه جریان برگشت داده می‌شود.

با توجه به شکل (۳) بالا معادلات شرط مرزی کمانه کردن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} f_{\lambda}^{n,m} &= f_{\phi}^{n+1,m-1} \\ f_{\phi}^{n,m} &= f_{\psi}^{n,m-1} \\ f_{\psi}^{n,m} &= f_{\delta}^{n-1,m-1} \end{aligned} \quad (33)$$

#### ۴-۱-۲- شرط مرزی عایق

زمانی که یک مرز از هندسه مورد نظر عایق است بیانگر این نکته است که هیچ انتقال حرارتی در جهت عمود بر آن سطح وجود ندارد و بنابراین طبق قانون فوریه می‌توان نوشت:

$$\frac{dT}{dy} = 0 \quad (34)$$

حال اگر فرض شود که آن مرز شمالی باشد، می‌توان رابطه (۳۴) را با اختلاف پسر و به صورت زیر نوشت:

$$T(m) = T(m-1) \quad (35)$$

در نهایت برای شبکه دوبعدی و نه سرعتی با توجه به معادله (۳۲) می‌توان نوشت:

$$\sum_{i=0}^{\Lambda} g(i, n, m) = \sum_{i=0}^{\Lambda} g(i, n, m-1) \quad (36)$$

در رابطه (۳۶) یکی از حالت‌های تساوی این است که تک تک عبارت‌های دو طرف معادله با هم برابر باشد.

#### ۵- شبیه‌سازی عددی

در این قسمت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در هندسه و شرایط مورد بررسی، ارائه می‌شود. ابتدا شبکه‌ای یکنواخت و مناسب بر میدان حل

اثرات نیروی حجمی، ناشی از وجود محیط متخلخل است و با استفاده از رابطه (۲۶) به دست می‌آید:

$$F_i = w_i \rho (1 - \phi / \phi_m) \left[ \nu (c_i \cdot F) + \frac{\rho}{\epsilon} (u \cdot F : c_i c_i) - \frac{\nu}{\epsilon} (u \cdot F) \right] \quad (26)$$

در معادله (۲۶)  $F$  از رابطه (۵) به دست می‌آید.

معادله بولتزمن برای تابع توزیع  $g$  به صورت رابطه (۲۷) نوشته می‌شود:

$$g_i(\mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}, t + \Delta t) - g_i(\mathbf{x}, t) = -\omega_s \left[ g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t) \right] \quad (27)$$

$\omega_s$  در رابطه (۲۷) از معادله (۲۸) به دست می‌آید و تابع توزیع تعادلی به صورت رابطه (۲۹) تعریف می‌شود:

$$\omega_s = \frac{1}{\nu \alpha + \phi / \phi_m} \quad (28)$$

$$g_i^{eq} = w_i T \left[ 1 + \nu (c_i \cdot u) \right] \quad (29)$$

خواص ماکروسکوپی از قبیل چگالی، سرعت و دمای سیال به صورت روابط (۳۰)، (۳۱) و (۳۲) محاسبه می‌شود:

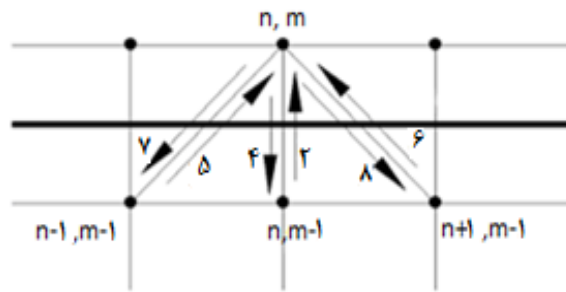
$$\rho(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^{\Lambda} f_i(\mathbf{x}, t) \quad (30)$$

$$\rho(\mathbf{x}, t) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^{\Lambda} c_i f_i(\mathbf{x}, t) \quad (31)$$

$$T(\mathbf{x}, t) = \sum_{i=0}^{\Lambda} g_i(\mathbf{x}, t) \quad (32)$$

#### ۴-۱-۳- شرایط مرزی در روش شبکه بولتزمن

یکی از مهمترین و تعیین کننده ترین موضوعات در شبیه‌سازی جریان با استفاده از روش شبکه بولتزمن، دقت در مدل‌سازی شرایط مرزی است. تعیین شرایط مرزی برای معادلات ناویر-استوکس به نوعی آسان و ساده است ولی برای شبکه بولتزمن این گونه نیست. در این روش توابع توزیع ورودی به دامنه حل باید بر روی مرزها مشخص شود. بنابراین برای یک شرط مرزی معین، معادلات مناسبی به منظور محاسبه توابع توزیع بر روی مرزها نیاز است.



شکل ۳- رفتار گره‌های دیواره با روش کمانه کردن

منطبق می‌شود و سپس به منظور اعتبارسنجی نتایج برنامه محاسباتی تهیه شده، سه شبیه‌سازی عددی انجام و نتایج حاصل از آن با نتایج ارائه شده در متون علمی در دسترس مقایسه می‌شود.

#### ۱-۵- استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن شبکه‌ای مناسب که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در شبکه‌هایی با تعداد نقاط مختلف، برای عدد داری  $10^{-2}$ ، ضریب تخلخل  $0/6$ ، عدد رایلی  $10^4$  در کسر حجمی  $0/01$  محاسبه شده و در جدول (۲) مقایسه شده‌اند. با بررسی عدد ناسلت در جدول (۲) مشخص می‌شود که تعداد نقاط  $100 \times 100$  برای مسئله مناسب است.

#### ۲-۵- اعتبار سنجی برنامه

در ابتدا صحت عملکرد برنامه محاسباتی با نتایج دیوال دیویس [۱] در جدول (۳) بررسی می‌شود. برای این منظور در صورتی که ضریب تخلخل نزدیک به یک ( $\epsilon=0/9999$ ) و عدد داری، عدد بزرگی ( $Da=10^7$ ) لحاظ شود، می‌توان اثرات محیط متخلخل را نادیده گرفت و به شرایط در نظر گرفته شده در کار دیوال دیویس رسید. در شبیه‌سازی دوم، جریان انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربعی شکل با در نظر گرفتن اثر محیط متخلخل برای اعداد رایلی، داری و ضریب تخلخل ( $\epsilon=0/6$ ) انجام می‌شود. با این کار

می‌توان به شرایط در نظر گرفته شده در کار نیتاراسو و همکاران [۲] که براساس روش حجم محدود است و همچنین به شرایط ستا و همکاران [۴] که براساس روش شبکه بولتزمن است، رسید. همانطور که در جدول (۴) مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج با کار نیتاراسو و همکاران و ستا و همکاران ناچیز است. نهایتاً هم جریان انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک حفره مربعی شکل با در نظر گرفتن نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و ضریب تخلخل نزدیک به یک ( $\epsilon=0/9999$ ) و عدد داری  $10^7$  در اعداد رایلی  $10^3$  تا  $10^6$  شبیه‌سازی می‌شود. با این کار می‌توان اثرات محیط متخلخل را به نوعی نادیده گرفت و به شرایط در نظر گرفته شده در کار لای و یانگ [۷] رسید. جدول (۵) نتایج کار حاضر و نتایج عددی کار لای و یانگ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود درصد اختلاف بین نتایج با کار لای و یانگ کمتر از ۳ درصد است. پس از اطمینان از صحت عملکرد برنامه محاسباتی، به حل مسئله مورد بررسی در این تحقیق، پرداخته می‌شود.

#### ۶- نتایج و بحث

##### ۶-۱- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در $Ra=10^3$ با

##### مدل خواص ثابت

جدول (۶) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^3$  به ازای اعداد داری، کسر حجمی و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در جدول (۶) مشخص است، با کاهش عدد داری، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد و از طرفی هم با افزایش ضریب تخلخل عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند. علت کاهش عدد ناسلت متوسط با کاهش عدد داری این است که، هنگامی که عدد داری کاهش پیدا می‌کند طبق رابطه (۲۵) نفوذپذیری جریان در داخل محیط کاهش می‌یابد و زمانی که جریان نتواند به راحتی در داخل محیط نفوذ کند مکانیزم انتقال حرارت از جابه‌جایی به سمت هدایت می‌رود و با توجه به اینکه ناسلت نسبت انتقال حرارت از طریق جابه‌جایی به هدایت



جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $\phi=0/01$ ,  $Ra=10^4$ ,  $\varepsilon=0/6$ ,  $Da=10^{-2}$

تعداد نقاط	ناسلت متوسط
۶۰×۶۰	۱/۶۰۷
۸۰×۸۰	۱/۵۹۵
۱۰۰×۱۰۰	۱/۵۸۸
۱۲۰×۱۲۰	۱/۵۸۴
۱۴۰×۱۴۰	۱/۵۸۰

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط برای تحقیق حاضر با نتایج دیوال دیویس [۱] در اعداد رایلی مختلف برای  $Pr=0/71$

Ra	دیوال دیویس [۱]	کار حاضر	درصد اختلاف
$10^3$	۱/۱۱۶	۱/۱۳۳	۱/۵۲
$10^4$	۲/۲۳۴	۲/۲۸۵	۲/۲۸
$10^5$	۴/۵۱۰	۴/۶۱۲	۲/۲۶
$10^6$	۸/۷۹۸	۹/۱۲۰	۳/۶۵

جدول ۴- مقایسه عدد ناسلت متوسط به دست آمده در کار حاضر با نتایج نیتاراسو و همکاران [۲]، ستا و همکاران [۴] در  $Pr=1$

Da	Ra	نیتاراسو و همکاران [۲]	ستا و همکاران [۴]	کار حاضر
$10^3$	$10^3$	۱/۰۱۵	۱/۰۱۲	۱/۰۲۵
$10^{-2}$	$10^4$	۱/۵۳۰	۱/۴۹۳	۱/۵۱۹
	$10^5$	۳/۵۵۵	۳/۴۳۳	۳/۵۱۶
	$10^5$	۱/۰۷۱	۱/۰۶۶	۱/۰۸۲
$10^{-4}$	$10^6$	۲/۷۲۵	۲/۶۱۰	۲/۷۸۹

است، با کاهش سهم انتقال حرارت جابه‌جایی و افزایش سهم هدایت ناسلت متوسط کاهش پیدا خواهد کرد.

۲-۶- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در  $Ra=10^4$  با مدل خواص ثابت

جدول (۷) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^4$  به‌ازای اعداد داری، کسر حجمی و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد.

با مشاهده جدول (۷) مشخص می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات در محیط متخلخل ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند. به‌طور کلی افزودن نانوذرات دو اثر مخالف روی عدد ناسلت دارد، یک اثر مطلوب که افزایش ضریب هدایت حرارتی است و یک اثر نامطلوب که افزایش لزجت سیال طبق رابطه (۱۱) است. از طرفی چون محیط مورد بررسی یک محیط متخلخل است دارای یک محدودیت جدی در مقدار اضافه

جدول ۵- مقایسه عدد ناسلت متوسط به دست آمده در کار حاضر با نتایج لای و یانگ [۷] در  $Pr = 5/85$

Ra	$\phi = 0/02$			$\phi = 0/03$		
	لای و یانگ [۷]	کار حاضر	درصد اختلاف	لای و یانگ [۷]	کار حاضر	درصد اختلاف
$10^3$	۱/۱۹۲	۱/۱۸۲	۰/۸۳	۱/۲۲۶	۱/۲۰۵	۱/۷۱
$10^4$	۲/۴۱۸	۲/۴۰۹	۰/۳۷	۲/۴۸۵	۲/۴۵۲	۱/۳۲
$10^5$	۵/۰۰۱	۵/۰۱۱	۰/۱۹	۵/۱۴۰	۵/۱۰۹	۰/۶۰
$10^6$	۹/۶۹۷	۹/۸۲۹	۱/۳۶	۹/۹۶۸	۱۰/۰۳۲	۰/۶۴

جدول ۶- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $Ra = 10^3$

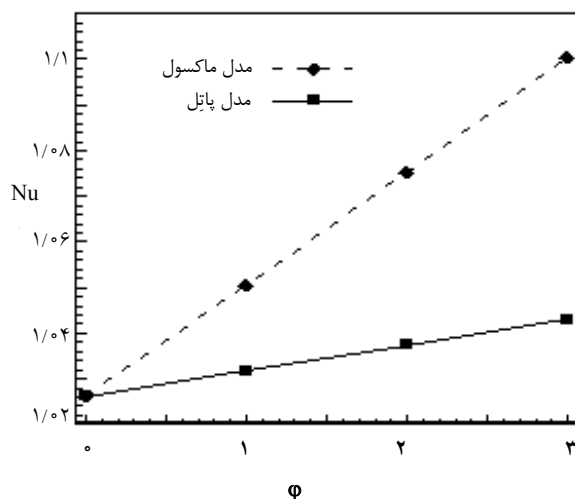
Da	$\phi$ (%)	$\epsilon = 0/4$	$\epsilon = 0/6$	$\epsilon = 0/9$
$10^{-2}$	۰	۳/۳۳۵۳	۳/۷۵۷۷	۴/۱۹۵۰
	۱	۳/۳۸۸۲	۳/۸۱۶۰	۴/۲۷۵۴
	۲	۳/۴۵۰۴	۳/۸۸۶۶	۴/۳۵۴۴
$10^{-4}$	۳	۳/۵۱۱۸	۳/۹۵۶۲	۴/۴۳۱۸
	۰	۱/۰۷۹۰	۱/۰۸۱۸	۱/۰۸۴۵
	۱	۱/۱۰۵۲	۱/۱۰۷۷	۱/۱۱۰۴
	۲	۱/۱۳۴۰	۱/۱۳۶۵	۱/۱۳۸۹
	۳	۱/۱۶۳۴	۱/۱۶۵۸	۱/۱۶۸۳

جدول ۷- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $Ra = 10^4$

Da	$\phi$ (%)	$\epsilon = 0/4$	$\epsilon = 0/6$	$\epsilon = 0/9$
$10^{-2}$	۰	۱/۴۲۷۲	۱/۵۶۱۰	۱/۷۰۱۱
	۱	۱/۴۵۴۲	۱/۵۸۸۹	۱/۷۳۰۲
	۲	۱/۴۸۰۹	۱/۶۱۶۵	۱/۷۵۹۱
$10^{-4}$	۳	۱/۵۰۷۵	۱/۶۴۳۸	۱/۷۸۷۳
	۰	۱/۰۱۳۴	۱/۰۱۳۵	۱/۰۱۳۶
	۱	۱/۰۴۲۰	۱/۰۴۲۱	۱/۰۴۲۲
	۲	۱/۰۷۱۱	۱/۰۷۱۲	۱/۰۷۱۳
	۳	۱/۱۰۰۷	۱/۱۰۰۸	۱/۱۰۰۹

نانوذرات را افزایش زیادی داد چون باعث رسوب و بسته شدن منافذها در محیط متخلخل می شود. به همین دلیل کسر حجمی نانوذرات حداکثر ۰/۰۳ در نظر گرفته شد.

کردن نانوذرات است. با اضافه کردن نانوذرات در هر محیطی بحث ته نشینی ذرات و رسوب مطرح می شود و با توجه به اینکه محیط نیز دارای خلل و فرج است، نمی توان کسر حجمی



شکل ۴- نمودار نحوه تغییرات عدد ناسلت متوسط به دست آمده از مدل خواص ثابت و خواص متغیر برحسب کسر حجمی برای  $Ra=10^3$ ,  $\epsilon=0/6$ ,  $Da=10^{-2}$

افزایش کسر حجمی نانوذرات مقدار عدد ناسلت متوسط نسبت به مدل ماکسول کمتر افزایش پیدا می‌کند. دلیل آن این است که در مدل پاتل اندازه نانوذرات، سیال پایه و حرکت براونی نانوذرات لحاظ شده است در حالی که در مدل ماکسول این ویژگی‌ها لحاظ نشده است.

#### ۶-۶- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در $Ra=10^6$ با مدل خواص متغیر

جدول (۱۱) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^6$  به‌ازای اعداد دارسی، کسر حجمی و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد. با ارزیابی شکل (۵) می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش عدد دارسی سرعت جریان در داخل محفظه کاهش می‌یابد. دلیل آن این است که با کاهش عدد دارسی قدرت نفوذپذیری سیال در داخل محیط متخلخل کم می‌شود و یا به اصطلاح، قدرت عبوردهی ماده متخلخل کاهش می‌یابد و سیال نمی‌تواند به راحتی در داخل محیط متخلخل حرکت کند، این عامل سبب می‌شود که سرعت سیال در داخل محیط متخلخل کاهش پیدا کند.

#### ۶-۳- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در $Ra=10^5$ با مدل خواص ثابت

جدول (۸) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^5$  به‌ازای اعداد دارسی، کسر حجمی و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد. با بررسی جدول (۸) مشخص می‌شود که با افزایش ضریب تخلخل مقدار ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. ضریب تخلخل بیانگر میزان حفره‌دار بودن (حضور خلل و فرج در یک حجم معین) یک محیط متخلخل است. زمانی که ضریب تخلخل به سمت صفر میل می‌کند محیط از حالت متخلخل به حالت جامد تبدیل می‌شود و انتظار این است که مکانیزم انتقال حرارت به سمت هدایت برود و عدد ناسلت هم کوچک شود. از طرفی هرچه ضریب تخلخل به سمت یک برود، حجم حفره‌های موجود در محیط متخلخل افزایش می‌یابد، در نتیجه انتقال حرارت غالب، جابه‌جایی است که باعث می‌شود عدد ناسلت افزایش پیدا کند.

#### ۶-۴- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در $Ra=10^6$ با مدل خواص ثابت

جدول (۹) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^6$  به‌ازای اعداد دارسی، کسر حجمی نانوذرات و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد. با ارزیابی جداول (۶) تا (۹) مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی، ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند.

#### ۶-۵- بررسی میدان جریان، دما و عدد ناسلت در $Ra=10^3$ با مدل خواص متغیر

جدول (۱۰) عدد ناسلت متوسط را برای رایلی  $10^3$  به‌ازای اعداد دارسی، کسر حجمی و ضرایب تخلخل مختلف نشان می‌دهد. با بررسی اعداد ناسلت به دست آمده از جدول (۱۰) می‌توان دریافت که در مدل خواص متغیر پاتل، همانند مدل خواص ثابت ماکسول، با افزایش ضریب تخلخل و عدد دارسی ناسلت متوسط افزایش پیدا می‌کند.

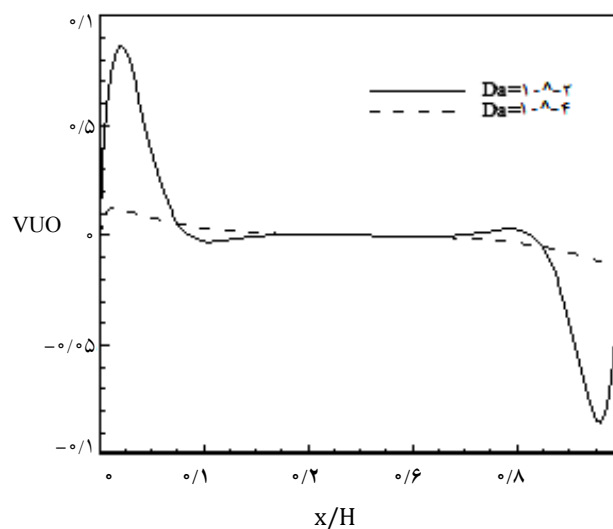
با مشاهده شکل (۴) می‌توان دریافت که در مدل پاتل با

جدول ۸- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $Ra=10^5$

$\varepsilon=0/9$	$\varepsilon=0/6$	$\varepsilon=0/4$	$\phi$ (%)	Da
1/0320	1/0262	1/0216	0	$10^{-2}$
1/0562	1/0505	1/0460	1	
1/0808	1/0752	1/0708	2	
1/1058	1/1004	1/0960	3	
1/0135	1/0134	1/0133	0	$10^{-4}$
1/0381	1/0380	1/0379	1	
1/0631	1/0630	1/0629	2	
1/0885	1/0884	1/0883	3	

جدول ۹- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $Ra=10^6$

$\varepsilon=0/9$	$\varepsilon=0/6$	$\varepsilon=0/4$	$\phi$ (%)	Da
8/7983	7/8366	6/9592	0	$10^{-2}$
8/8338	7/8669	6/9872	1	
8/8714	7/9165	7/0132	2	
8/9034	7/9239	7/0377	3	
2/9213	2/8491	2/7666	0	$10^{-4}$
2/9316	2/8564	2/7917	1	
2/9385	2/8611	2/7957	2	
2/9472	2/8662	2/8016	3	



شکل ۵- نمودار تغییرات سرعت عمودی در موقعیت  $y=H/2$  برای  $Ra=10^6$ ،  $\phi=0/03$ ،  $\varepsilon=0/9$

جدول ۱۰- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $10^3 Ra$

$\varepsilon = 0/9$	$\varepsilon = 0/6$	$\varepsilon = 0/4$	$\phi$ (%)	Da
۱/۰۳۲۰	۱/۰۲۶۲	۱/۰۲۱۶	۰	$10^{-2}$
۱/۰۳۷۴	۱/۰۳۱۷	۱/۰۲۷۰	۱	
۱/۰۴۳۰	۱/۰۳۷۳	۱/۰۳۲۷	۲	
۱/۰۴۸۷	۱/۰۴۳۰	۱/۰۳۸۴	۳	$10^{-2}$
۱/۰۱۳۵	۱/۰۱۳۴	۱/۰۱۳۳	۰	
۱/۰۱۹۰	۱/۰۱۸۹	۱/۰۱۸۸	۱	
۱/۰۲۴۷	۱/۰۲۴۶	۱/۰۲۴۵	۲	
۱/۰۳۰۵	۱/۰۳۰۴	۱/۰۳۰۳	۳	

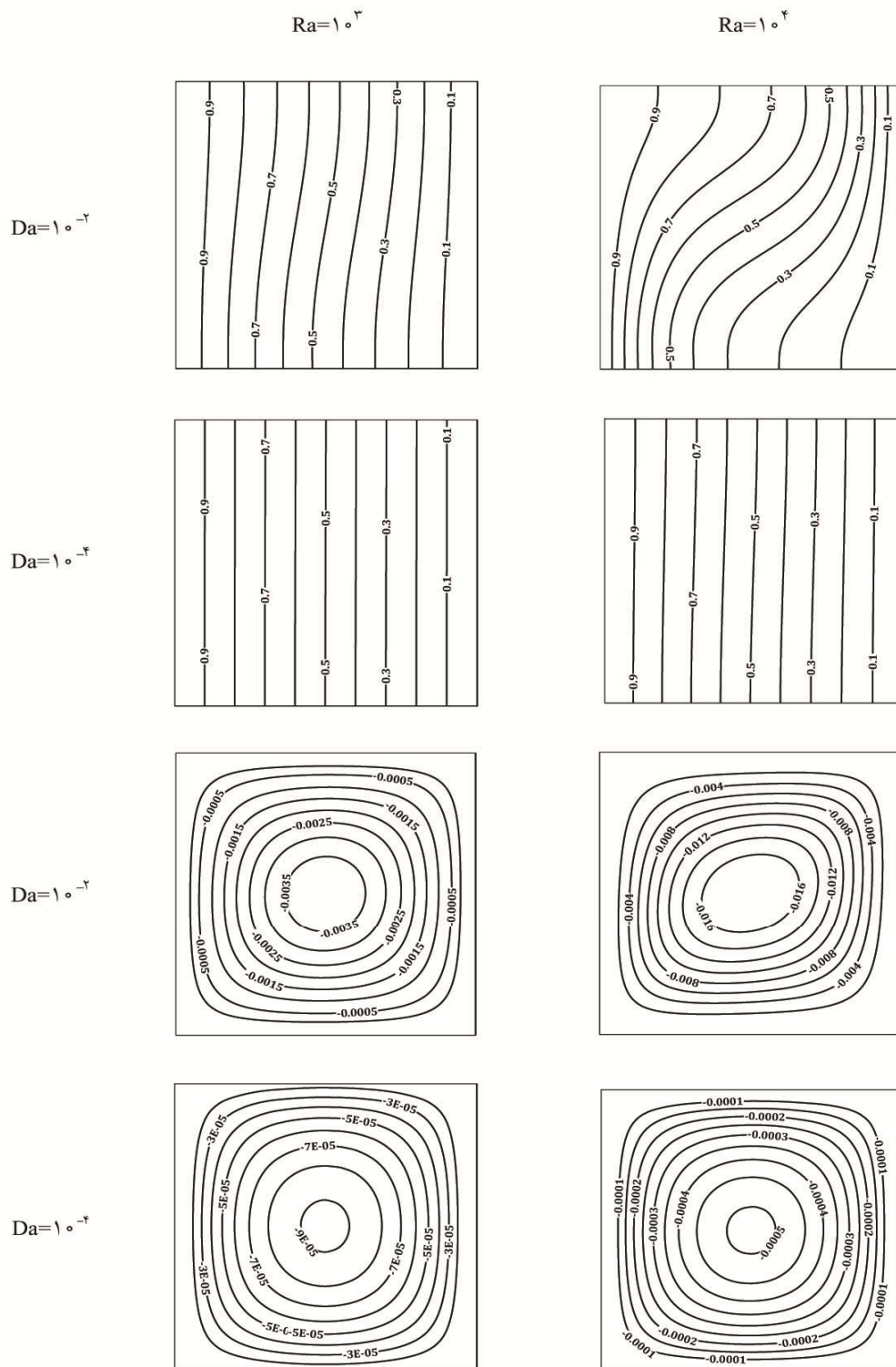
جدول ۱۱- مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در محفظه مربعی برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در  $10^6 Ra$

$\varepsilon = 0/9$	$\varepsilon = 0/6$	$\varepsilon = 0/4$	$\phi$ (%)	Da
۸/۷۹۸۳	۷/۸۳۶۶	۶/۹۵۹۲	۰	$10^{-2}$
۸/۹۸۲۵	۷/۹۹۸۱	۷/۱۰۲۲	۱	
۹/۱۶۶۶	۸/۱۵۸۵	۷/۲۴۴۰	۲	
۹/۳۴۷۱	۸/۳۱۸۸	۷/۳۸۵۰	۳	$10^{-4}$
۲/۹۲۱۳	۲/۸۴۹۱	۲/۷۶۶۶	۰	
۲/۹۵۶۵	۲/۸۷۹۸	۲/۷۹۵۶	۱	
۲/۹۸۹۲	۲/۹۱۲۲	۲/۸۲۹۴	۲	
۳/۰۲۱۲	۲/۹۴۵۰	۲/۸۶۱۵	۳	

## ۷- نتیجه گیری

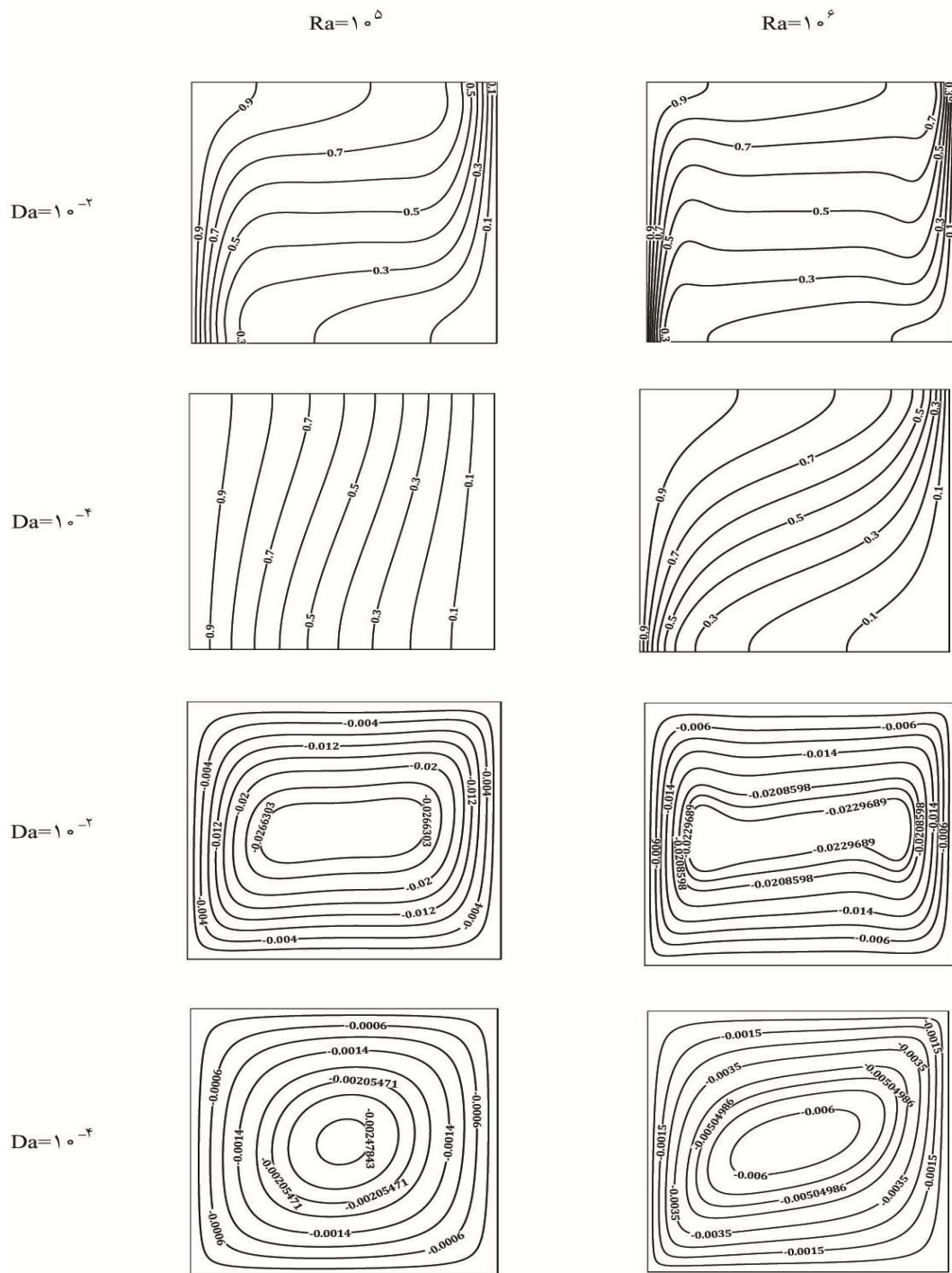
دارسی موجب می شود که قدرت جریان در محفظه کاهش پیدا کند و مکانیزم انتقال حرارت غالب، هدایت شود، که منجر به کاهش عدد ناسلت می شود. از طرفی با افزایش عدد دارسی قدرت جریان داخل محفظه افزایش می یابد که منجر به افزایش عدد ناسلت خواهد شد. (۴) افزایش کسر حجمی نانوذرات در داخل محفظه منجر به افزایش عدد ناسلت و در نتیجه بهبود انتقال حرارت می شود. (۵) کاهش ضریب تخلخل در محفظه باعث می شود که محیط به سمت جامد شدن برود و در این حالت عدد ناسلت و قدرت جریان داخل محفظه کاهش می یابد و از طرفی هم با افزایش ضریب تخلخل حجم حفره های موجود در محفظه افزایش می یابد و به تبع آن عدد ناسلت افزایش خواهد یافت. (۶) با افزایش عدد رایلی خطوط جریان در شکل های (۶) و (۷)

در این تحقیق برای اولین بار به بررسی تأثیر حضور محیط متخلخل بر میدان جریان، دما و عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم با خواص ثابت و متغیر در فرآیند جابه جایی طبیعی داخل محفظه ای مربعی شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن پرداخته شد و قابلیت این روش در شبیه سازی این گونه جریان ها مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به دست آمد. (۱) با افزایش عدد رایلی در محفظه، مکانیزم انتقال حرارت از هدایت به سمت انتقال حرارت جابه جایی می رود و باعث می شود که عدد ناسلت متوسط در محفظه زیاد شود. (۲) افزایش عدد رایلی در محفظه، باعث می شود که سرعت جریان داخل محفظه افزایش پیدا کند و به تبع آن قدرت جریان در محفظه زیاد شود. (۳) کاهش عدد



شکل ۶- خطوط دما ثابت (دو ردیف بالا) و خطوط جریان (دو ردیف پایین) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با

$$Ra=10^3, 10^4, \phi = 0.02, \varepsilon = 0.6 \text{ در خواص ثابت در } Ra=10^3, 10^4, \phi = 0.02, \varepsilon = 0.6$$



شکل ۷- خطوط دما ثابت (دو ردیف بالا) و خطوط جریان (دو ردیف پایین) برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با خواص ثابت در  $\mathcal{E} = 0/6$ ،  $\varphi = 0/02$ ،  $Ra=10^5$ ،  $10^6$

افزایش پیدا می‌کند، که دلیل آن این است که در مدل پاتل اندازه نانوذرات و سیال پایه در نظر گرفته می‌شود و از طرفی هم حرکت براونی نانوذرات لحاظ شده است در حالی که در مدل ماکسول این ویژگی‌ها لحاظ نشده است. (۸) روش شبکه بولتزمن توانایی شبیه‌سازی جریان در محیط متخلخل را به خوبی دارد.

در مرکز محفظه به شکل بیضی در می‌آید و تأثیر جابه‌جایی در خطوط همدمای بیشتر مشخص می‌شود. گرادیان دما نزدیک دیواره‌های عمودی شدیدتر می‌شود؛ در عین حال، خطوط همدمای در مرکز محفظه به طور افقی موازی با دیوار می‌شوند که علت این امر مکانیزم جابه‌جایی و نیروی شناوری است. (۷) در مدل خواص متغیر پاتل با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار عدد ناسلت متوسط نسبت به مدل خواص ثابت ماکسول کمتر

## 1-representative elementary volume scale

## واژه‌نامه

## مراجع

- De Vahl Davis, G., "Natural Convection of Air in a Square Cavity a Bench Mark Numerical Solution", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 3, pp. 249-264, 1983.
- Nithiarasu, P., Seetharamu, K., and Sundararajan, T., "Natural Convective Heat Transfer in a Fluid Saturated Variable Porosity Medium", *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 40, pp. 3955-3967, 1997.
- Guo, Z., and Zhao, T., "Lattice Boltzmann Model for Incompressible Flows through Porous Media", *Physical Review*, Vol. 66, pp. 036304, 2002.
- Seta, T., Takegoshi, E., and Okui, K., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection in Porous Media", *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 72, pp. 195-200, 2006.
- Shokouhmand, H., Jam, F., and Salimpour, M., "Simulation of Laminar flow and Convective Heat Transfer in Conduits Filled with Porous Media Using Lattice Boltzmann Method", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 378-384, 2009.
- Haghshenas, A., Rafatnasr, M., and Rahimian, M., "Numerical Simulation of Natural Convection in an Open-ended Square Cavity Filled with Porous Medium by Lattice Boltzmann Method", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 1513-1519, 2010.
- Lai, F., and Yang, Y., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection Heat Transfer of  $Al_2O_3$ /Water Nanofluids in a Square Enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1930-1941, 2011.
- Liu, Q., He, Y., Li, Q., and Tao, W., "A Multiple-Relaxation-Time Lattice Boltzmann Model for Convection Heat Transfer in Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 761-775, 2014.
- Neild, D., and Bejan, A., *Convection in Porous Media*, 3rd Edition, Springer, 2006.
- Irwan, M., and Azwadi, C., "Simplified Mesoscale Lattice Boltzmann Numerical Model for Predication of Natural Convection in a Square Enclosure Filled with Homogeneous Porous Media", *Wseas Transactions on Fluid Mechanics*, Vol. 5, pp. 186-195, 2010.
- Maxwell, J., *A Treatise on Electricity and Magnetism Unabridged*, Dover, 1954.
- Sheikhzadeh, G., and Nazari, S., "Numerical Study of Natural Convection in a Square Cavity Filled with a Porous Medium Saturated with Nanofluid", *Transport Phenomena in Nano and Micro Scale*, Vol. 1, pp. 138-146, 2013.
- Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., and Lavine, A., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley, 2011.
- Brinkman, H., "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, pp. 571-581, 1952.
- Lai, F., and Yang, Y., "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection Heat Transfer of  $Al_2O_3$ /water Nanofluids in a Square Enclosure", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 1930-1941, 2011.
- Guier, J., Reggio, M., and Vasseur, P., "Natural Convection of Nanofluids in Heated Enclosures using the Lattice Boltzmann Method", *Computational Thermal Sciences*, Vol.3, 2011.
- Mohamad, A., *Lattice Boltzmann Method*, Springer, 2011.
- Rong, F., Guo, Z., Chai, Z., and Shi, B., "A Lattice Boltzmann Model for Axisymmetric Thermal Flows through Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 5519-5527,



- 2010.
19. Hasanpour, A., Sedighi, K., and Farhadi, M., "Effect of Porous Screen on Flow Stabilization and Heat Transfer in a Channel using Variable Porosity Model by the Lattice Boltzmann Method", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 36, pp. 45-58, 2012.
  20. Bejan, A., *Convection Heat Transfer*, 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2004.
  21. Sukop, M., and Thorne, D., *Lattice Boltzmann Modeling*, Springer, 2005.
  22. Lomaazzi, A., *Lattice Boltzmann Method for three Dimentional Fluid Flow Simulation*, Anno Accadmico, 2011.
  23. Wolf-Gladrow, D., *Lattice Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models*, Springer, 2000.
  24. T. Bach, *A Python Environment for Cellular and Lattice Gas Automata*, Boston University, 2005.
  25. Irwan, M., Fudhail, A., Nor Azwadi, C., and Masoud, G., "Numerical Investigation of Incompressible Fluid Flow through Porous Media in a Lid Driven Square Cavity", *American Journal of Applied Sciences*, Vol. 7, pp. 1341-1344, 2010.
  26. Vafai, K., *Hand Book of Porous Media*, Taylor & Francis, 2005.

