نحوه استناد به این مقاله: کمال‌زاده، علیرضا؛ قلم‌باز، محمد (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تغییرات عدد لویس و پارامتر ترموفروسیس بر انتقال نانوذرات در یک محفظه‌ی متوازی‌الاضلاع. تبدیل انرژی، ۱(۴)، ۲۷-۳۳.

بررسی تأثیر تغییرات عدد لویس و پارامتر ترموفروسیس بر انتقال نانوذرات در یک محفظه‌ی متوازی‌الاضلاع

علیرضا کمال‌زاده [۱]، محمد قلم‌باز [۲و*]

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲]استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: اردیبهشت ۹۵، بازنگری: تیر ۹۵، پذیرش: تیر ۹۵

چکیده

یکی از کاربردهای علم نانو کنترل انتشار آلاینده‌ها می‌باشد. در عصر حاضر، آلودگی‌های موجود در هوا از جمله آئروسل‌ها یکی از جدیدترین مواردی هستند که مورد توجه قرار گرفته‌اند. از آنجایی که پژوهش‌های اندکی در زمینه‌ی مدل‌سازی فیلتراسیون نانوذرات و استفاده از گرادیان دما درون محفظه‌ها صورت گرفته است لذا در مقاله‌ی حاضر، تأثیر تغییرات عدد لویس (Ln) سیال حاوی نانوذره و پارامتر ترموفروسیس بر مشخصه‌های انتقال حرارت و غلظت ذرات در جریان جابجایی طبیعی جریان آرام درون یک محفظه‌ی بسته مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش مقدار Ln تا 10^3، موجب کاهش عدد شروود متوسط می‌شود و برای سایر مقادیر Ln، مقدار عدد شروود متوسط تقریبا ثابت باقی می‌ماند. عدد ناسلت متوسط برای استوانه‌ی دایره‌ای نیز یک چنین رفتار مشابهی داشت در صورتی که برای دیواره‌ی سمت چپ عدد ناسلت متوسط تقریبا ثابت باقی ماند. نتایج به طور واضح نشان می‌دهند که با کاهش Ln مقدار غلظت ذرات در زمان نهایی کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داد که به ازای مقادیر مختلف پارامتر ترموفروسیس، اعداد ناسلت و شروود متوسط ,غلظت نهایی نانوذرات تغییر معناداری ندارد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** m.ghalambaz@iaud.ac.ir

کلمات کلیدی: نانوذرات، عدد لویس، پارامتر ترموفروسیس، فیلتراسیون.

۱- مقدمه

یکی از کاربردهای علم نانو کنترل انتشار آلاینده‌ها می‌باشد. در عصر حاضر، آلودگی‌های موجود در هوا یکی از جدیدترین خطراتی است که هم سلامتی انسان‌ها را به خطر انداخته است و هم تأثیرات مخربی بر روی تجهیزات و پروسه‌های تولیدی می‌گذارد. یکی از موارد مهم آلودگی در این حوزه ذراتی به نام آئروسل [۱] می‌باشد. در حال حاضر استفاده از فیلترهای الیافی یکی از متداول‌ترین روش‌های فیلتراسیون آئروسل‌ها می‌باشد. وقتی اندازه‌ی ذرات در مقیاس میکرومتر باشد به راحتی توسط فیلترها قابل حذف هستند ولی وقتی ابعاد آن‌ها زیر میکرومتر باشد فیلترکردن آن‌ها مشکل می‌شود؛ زیرا به راحتی می‌توانند از منافذ فیلترهای معمولی فرار کنند. ساخت فیلترهایی با منافذ در ابعاد نانومتر نیاز به تکنولوژی پیشرفته و روش‌های نوین دارد و از طرفی نیز وجود منافذ در ابعاد نانو باعث ایجاد افت فشارهای شدید در سیستم‌های فیلترینگ متداول می‌گردد که این افت فشار با بارگذاری آئروسل جامد افزایش می‌یابد. از طرفی افت فشار با کاهش اندازه‌ی منافذ افزایش می‌یابد [۲-۱]. از اینرو پیش از طراحی یک سیستم مناسب برای جلوگیری از انتشار نانوذرات در محیط، لازم است که ابتدا مکانیزم‌های مؤثر بر انتقال آئروسل‌ها شناسایی شده و تأثیر هر مکانیزم بر انتقال نانوذرات تحلیل شود. وانگ و همکاران [۳] و میز و همکاران [۴] فیلتراسیون نانوذرات به علت پخش براونی را بررسی کرده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نیروی براونی [۲] یک نقش مهم در نشست و بازدهی فیلتراسیون دارد. همچنین بازده جمع‌آوری فیلتر با افزایش قطر ذرات، کاهش می‌یابد. اکبر و همکاران [۵] انتقال ذرات با قطرهایی در محدوده‌ی $50nm$-$1\mu m$ در جابجایی آزاد جریان آرام [۳] هوا در محفظه‌های مربعی کوچک را به طور عددی بررسی نمودند. نتایج نقش مهم ترموفروسیس [۴] و پراکندگی براونی را برای ذرات با اندازه‌ی

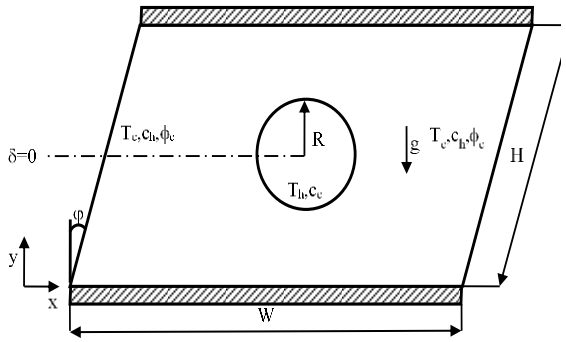
[1]-Aerosol
[2]-Brownian force
[3]-Laminar flow
[4]-Thermophoresis

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]

کمتر از میکرون تأیید می‌کنند. بونجیورنو [۶] انتقال حرارت جابجایی را در سیالات حاوی نانوذرات بررسی نموده است. او به هفت مکانیزم لغزش اشاره نموده و نتیجه گرفته است که در نبود اثرات آشفتگی؛ اثر براونی و ترموفروسیس دارای اهمیت هستند. گوها و سامانتا [۷] انتقال و نشست ذرات آئروسل بر روی صفحات افقی و عمودی با در نظر گرفتن جابجایی طبیعی[1] آرام، پراکندگی براونی و ترموفروسیس را تحلیل نمودند. نتایج نشان می‌دهند که سرعت نشست با افزایش قطر ذرات کاهش می‌یابد. کین و همکاران [۸] انتقال حرارت جابجایی به صورت دوپخشی در یک محفظه‌ی مستطیلی را به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها در کار خود اثرات تغییر عدد پرانتل و لویس را بررسی و بحث کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که اعداد ناسلت و شروود با افزایش پرانتل افزایش می‌یابند. آن‌ها بیان کرده‌اند که ناسلت با افزایش لویس برای لویس کوچکتر از ۰/۳۵؛ کاهش و با افزایش لویس برای لویس بزرگتر از ۰/۳۵؛ افزایش می‌یابد. الفرهانی و توران [۹] انتقال جرم و انتقال حرارت جابجایی طبیعی دوپخشی در یک حفره‌ی مستطیلی شیبدار را بررسی نمودند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد زمانی که عدد لویس افزایش می‌یابد عدد ناسلت کاهش و عدد شروود افزایش می‌یابد. کویسلتی و همکاران [۱۰] جابجایی طبیعی دو پخشی در یک محفظه با نسبت تناظر ثابت را بررسی کردند. آن‌ها تأثیر پارامترهای متغیر مانند عدد رایلی، نسبت شناوری و عدد لویس را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش عدد لویس نرخ‌های انتقال جرم و حرارت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در نهایت با توجه به این که بررسی پژوهش‌های انجام گرفته در جهان نشان می‌دهد که پژوهش‌های اندکی در زمینه‌ی مدل‌سازی فیلتراسیون نانوذرات و استفاده از گرادیان دما درون محفظه‌ها صورت گرفته است لذا در مقاله‌ی حاضر، به بررسی تأثیر نیروهای براونی و ترموفروسیس بر مشخصه‌های انتقال حرارت و غلظت ذرات در شبیه‌سازی جابجایی طبیعی جریان آرام پرداخته شده است.

۲- بیان مسئله

انتقال جرم و انتقال حرارت جابجایی طبیعی دو پخشی جریان آرام و ناپایا در یک محفظه‌ی متوازی‌الاضلاع با زاویه‌ی انحراف ۱۵° پر شده با سیال حاوی نانوذره مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات عدد لویس سیال حاوی نانوذره و پارامتر ترموفروسیس بر اعداد ناسلت و شروود متوسط و نیز میزان غلظت نانوذرات درون محفظه مورد بررسی قرار گرفته است. سیال مورد نظر، تراکم ناپذیر، نیوتنی و جریان نیز به صورت دو بعدی می‌باشد. استوانه‌ی دایره‌ای ($R=0.2m$) در مرکز محفظه قرار گرفته و شرط عدم نفوذ نانوذرات در آن برقرار است. در حالت بی‌بعد $H=W=1$ می‌باشد. دیواره‌های بالا و پایین آدیاباتیک بوده و از نظر غلظت نفوذناپذیر هستند. شکل (۱) هندسه، سیستم مختصات و شرایط مرزی را به طور شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۱): شکل شماتیک مسئله

معادلات حاکم برای جریان به روش غیرهمگن و با استفاده از مدل بونجیورنو بدست آمده و برای زمان ۰/۰۱-۰ ثانیه با بازه‌ی 1×10^{-4} s و با استفاده از کدنویسی کامسول تحت نرم‌افزار متلب حل می‌شوند. این معادلات شامل شش معادله‌ی پیوستگی، معادلات مومنتوم در راستای افقی و عمودی، معادله‌ی انرژی (حرارت)، معادله‌ی غلظت فاز ثانویه (بخار هوا) و معادله‌ی غلظت نانوذرات می شوند [۶ و ۱۱]. تغییرات چگالی با دما با استفاده از از تقریب بوزینسک بیان شده است. فرم نهایی و بی‌بعد معادلات مذکور به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{\partial U}{\partial X}+\frac{\partial V}{\partial Y}=0 \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau}+U\frac{\partial U}{\partial X}+V\frac{\partial U}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial X}+\Pr\left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 U}{\partial Y^2}\right) \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \tau}+U\frac{\partial V}{\partial X}+V\frac{\partial V}{\partial Y}=-\frac{\partial P}{\partial Y}+\Pr\left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 V}{\partial Y^2}\right)+Ra_T\Pr\left(\theta+N_c C-N_\varphi \Phi\right) \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau}+U\frac{\partial \theta}{\partial X}+V\frac{\partial \theta}{\partial Y}=\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \tau}+U\frac{\partial C}{\partial X}+V\frac{\partial C}{\partial Y}=\frac{1}{Le}\left(\frac{\partial^2 C}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial Y^2}\right) \qquad (۵)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}+U\frac{\partial \Phi}{\partial X}+V\frac{\partial \Phi}{\partial Y}=\frac{1}{Ln}\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2}\right)+\frac{Nt}{LnNb}\left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}+\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right) \qquad (۶)$$

معادلات (۶-۱) با استفاده از تعاریف زیر بدست آمده‌اند:

[1]-Natural convection

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]

$$X=\frac{x}{H},Y=\frac{y}{H},U=\frac{uH}{\alpha_{nf}},V=\frac{vH}{\alpha_{nf}},P=\frac{pH^2}{\rho_{nf}\alpha_{nf}^2},$$
$$\theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},C=\frac{c-c_c}{c_h-c_c},\Phi=\frac{\phi-\phi_c}{\phi_0},\tau=\frac{t\alpha_{nf}}{H^2}$$
(۷)

پارامترهای بی‌بعد آشکار شده در معادلات (۶-۱) نیز به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\Pr=\frac{\upsilon_{nf}}{\alpha_{nf}}$$ (۸)

$$Ra_T=\frac{\rho_{bf}(1-\phi_0)g\beta_T H^3(T_h-T_c)}{\rho_{nf}\upsilon_{nf}\alpha_{nf}}$$ (۹)

$$N_c=\frac{\beta_c(c_h-c_c)}{\beta_T(T_h-T_c)}$$ (۱۰)

$$N_\phi=\frac{(\rho_p-\rho_{bf0})\phi_0}{(1-\phi_0)\rho_{bf}\beta_T(T_h-T_c)}$$ (۱۱)

$$Le=\frac{\alpha_{nf}}{D}$$ (۱۲)

$$Ln=\frac{\alpha_{nf}}{D_B}$$ (۱۳)

$$Nt=\frac{(\rho c_p)_p D_T(T_h-T_c)}{(\rho c_p)_{nf}T_c\alpha_{nf}}$$ (۱۴)

$$Nb=\frac{(\rho c_p)_p D_B\phi_0}{(\rho c_p)_{nf}\alpha_{nf}}$$ (۱۵)

شرایط مرزی به صورت بی‌بعد در زیر آمده‌اند:

استوانه‌ی دایره‌ای به ترتیب در دما و غلظت $\theta=1$ ، $C=0$ خواهد بود و

$$n.\nabla\Phi=-\frac{Nt}{Nb}n.\nabla\theta$$ (۱۶)

سایر شرایط مرزی برای دیواره‌های جانبی و دیواره‌های بالا و پایین به همراه شرایط اولیه در فرم بی‌بعد خود در روابط (۱۹-۱۷) آمده‌اند:

$$U=V=0,\quad \theta=0,\quad C=1,\quad \Phi=0\quad \text{at}\quad 0\le X\le\sin(\varphi),\ 1\le X\le 1+\sin(\varphi)$$ (۱۷)

$$U=V=0,\quad \frac{\partial\theta}{\partial Y}=\frac{\partial C}{\partial Y}=0,\quad \Phi=0\quad \text{at}\quad Y=0,\ Y=\cos(\varphi)$$ (۱۸)

$$\theta=0,\ C=0,\ \Phi=1-\frac{\phi_c}{\phi_0}\ \text{at}\ \tau=0$$ (۱۹)

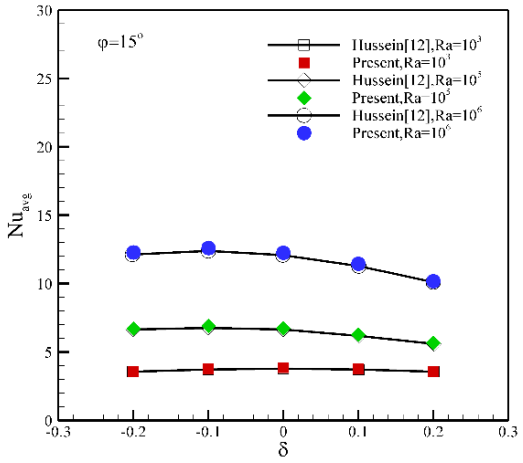
اعداد ناسلت و شروود متوسط نیز از طریق روابط ۲۰ و ۲۱ بدست می‌آیند:

$$\overline{Nu}=\frac{1}{H}\int_0^H\left(\frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_s dn$$ (۲۰)

$$\overline{Sh}=\frac{1}{H}\int_0^H\left(\frac{\partial C}{\partial n}\right)_s dn$$ (۲۱)

۳- اعتبارسنجی

به منظور بررسی صحت کد نوشته شده برای هندسه‌ی نشان داده شده در شکل (۱)، بخش انتقال حرارت کار انجام شده (پارامتر ناسلت) مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل (۲) می‌توان دید که تطابق بسیار مناسبی بین نتایج بدست آمده توسط کد نوشته شده و نتایج گزارش شده توسط حسین [۱۲] وجود دارد.



شکل (۲): اعتبارسنجی عدد ناسلت متوسط در اعداد رایلی و موقعیت‌های عمودی استوانه‌ی دایره‌ای متفاوت برای $\varphi=15^\circ$

۴- استقلال از شبکه حل

مقادیر عدد ناسلت متوسط برای استوانه‌ی دایره‌ای در چهار اندازه شبکه در حالتی که پارامترها در مقادیر پیش‌فرض خود قرار دارند در زمان ۰/۰۱ ثانیه بدست آمده‌اند. همان طور که در جدول (۱) نشان داده شده، اندازه شبکه ۱۵۰×۱۵۰ دارای دقت دو رقم اعشار می‌باشد. بنابراین شبکه با این اندازه و یا بزرگتر برای محاسبات مناسب است.

جدول (۱): استقلال از شبکه حل

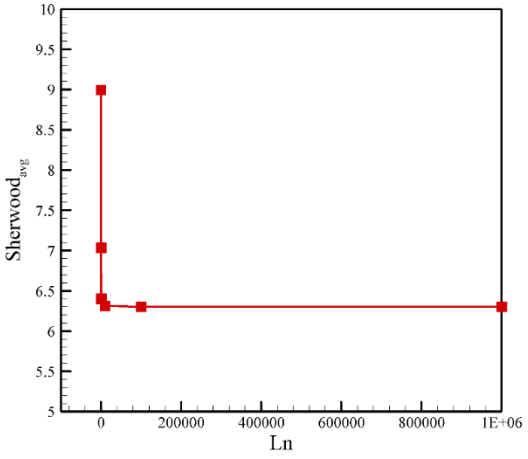
	اندازه شبکه*			
	۵۰×۵۰	۱۰۰×۱۰۰	۱۵۰×۱۵۰	۲۰۰×۲۰۰
$\overline{Nu}$	۸/۲۴۰۸	۸/۲۰۵۸	۸/۲۰۳۴	۸/۲۰۲۵

*Pr=۰/۷۱, Ra_T=۱۰^5, Le=N_c=۱, Ln=۱۰۰۰, Nb=Nt=۰/۰۰۱, N_ϕ=۱۰, t=۰/۰۱s Δt=۱×۱۰$^{-4}$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]

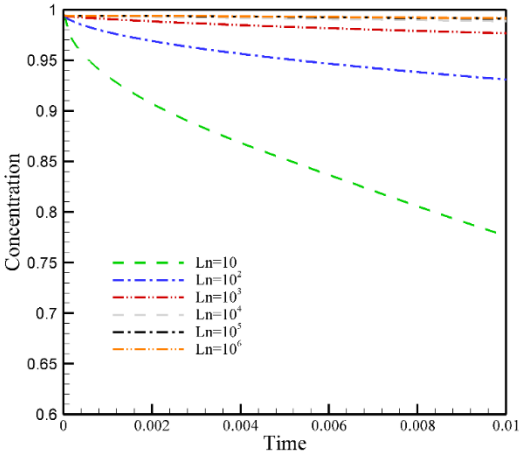
۵- بحث و نتایج

تأثیر پارامتر عدد لویس سیال حاوی نانوذره (Ln) که نسبت نفوذ حرارت به پخش براونی را بیان می‌کند، در محدوده‌ی $۱۰^{۶}$-۱۰ بررسی شده است. اعداد شروود متوسط برای دیواره‌ی سمت چپ در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. با تغییر Ln از ۱۰ به $۱۰^{۲}$ یک کاهش بیشتر در عدد شروود متوسط نسبت به زمانی که Ln از $۱۰^{۲}$ به $۱۰^{۳}$ تغییر می‌کند رخ داده است؛ در صورتی که برای سایر مقادیر Ln، مقدار عدد شروود متوسط تقریبا ثابت باقی می‌ماند.



شکل (۳): نمودار عدد شروود متوسط بر روی دیواره‌ی سمت چپ برای مقادیر مختلف Ln

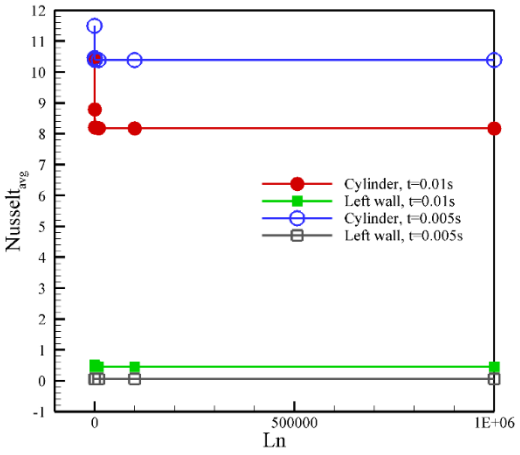
همچنین نمودار تغییرات غلظت نانوذرات درون محفظه بر حسب زمان در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار تغییرات غلظت نانوذرات بر حسب زمان برای مقادیر مختلف Ln

با توجه به این شکل می‌توان مشاهده نمود که با کاهش مقدار Ln و در واقع افزایش ضریب براونی مقدار غلظت نانوذرات در زمان نهایی کاهش می‌یابد. این نمودار به طور واضح نشان می‌دهد که مقادیر بالای ضریب براونی به اندازه‌ی زیادی بر کاهش غلظت نانوذرات مؤثر هستند؛ به طوری که برای مقدار Ln برابر ۱۰ که ضریب براونی در بالاترین مقدار خود می‌باشد، میزان غلظت ذرات در زمان نهایی به ۰/۷۸ می‌رسد. البته برای مقادیر Ln بالاتر از $۱۰^{۳}$ ضریب براونی به اندازه‌ای کوچک می‌شود که دیگر تغییر خاصی در نمودار رخ نمی‌دهد.

شکل (۵) اعداد ناسلت متوسط بر روی استوانه‌ی دایره‌ای و دیواره‌ی سمت چپ برای مقادیر مختلف Ln در زمان‌های ۰/۰۱s و ۰/۰۰۵s را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که برای استوانه‌ی دایره‌ای با کاهش ضریب براونی و پراکندگی نانوذرات به واسطه‌ی آن که به دلیل افزایش عدد لویس سیال حاوی نانوذره اتفاق می‌افتد ابتدا یک کاهش در عدد ناسلت متوسط رخ می‌دهد و پس از آن مقدار عدد ناسلت متوسط تقریبا ثابت باقی می‌ماند.

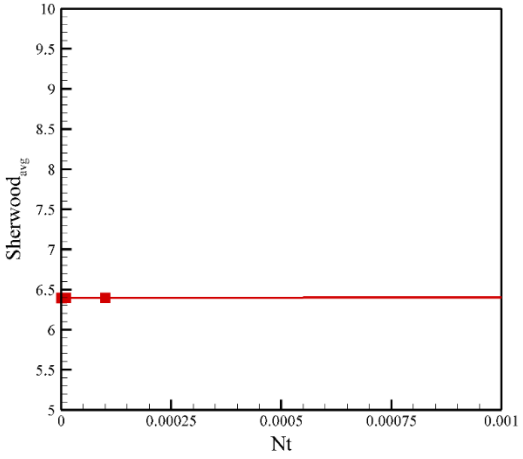


شکل (۵): نمودار عدد ناسلت متوسط بر روی استوانه‌ی دایره‌ای و دیواره‌ی سمت چپ برای مقادیر مختلف Ln در زمان‌های ۰/۰۱s و ۰/۰۰۵s

در دیواره‌ی سمت چپ نیز عدد ناسلت متوسط برای هر دو زمان تقریبا ثابت باقی می‌ماند. همچنین می‌توان مشاهده نمود که با افزایش زمان به دلیل تأثیر نیروی براونی و نیز نیروی ترموفروسیس که باعث حرکت نانوذرات از دیواره‌ی گرم به سمت دیواره‌ی سرد می‌شود، عدد ناسلت متوسط برای استوانه‌ی دایره‌ای کاهش یافته و برای دیواره‌ی سمت چپ نیز به دلیل حضور بیشتر نانوذرات نسبت به قبل افزایش می‌یابد. در ادامه تأثیر پارامتر ترموفروسیس (Nt) بر انتقال حرارت و انتقال جرم سیال حاوی نانوذره در محدوده‌ی $۱۰^{-۳}$-$۱۰^{-۱۴}$ بررسی شده است. به ازای مقادیر متفاوت پارامتر ترموفروسیس تأثیر قابل توجهی در توزیع غلظت فاز ثانویه مشاهده نشد. شکل (۶) نمودار تغییر عدد شروود متوسط برای مقادیر مختلف Nt را نشان می‌دهد که به خوبی این نکته را آشکار خواهد کرد.

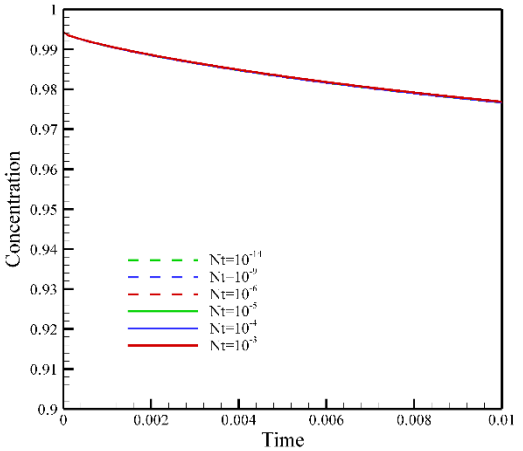
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]



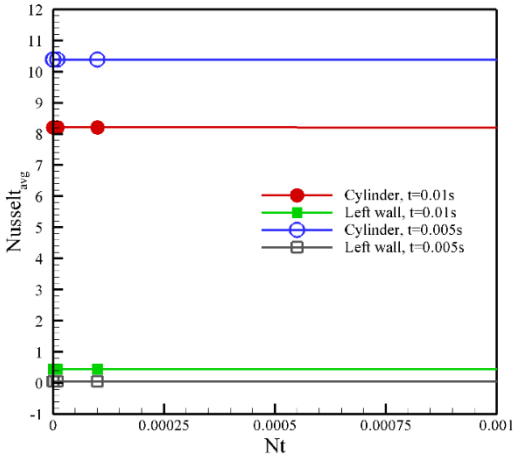
شکل (۶): نمودار عدد شروود متوسط بر روی دیواره‌ی سمت چپ برای مقادیر مختلف *Nt*

هر چند افزایش در Nt منجر به افزایش در ضریب ترموفروسیس (D_T) خواهد شد (به رابطه (۱۴) نگاه شود)؛ اما به دلیل کوچک بودن پارامتر ترموفروسیس و تأثیر کم این پارامتر در معادله‌ی (۶)، افزایش در این پارامتر منجر به تغییر خاصی در توزیع غلظت نانوذرات نخواهد شد. البته این نکته نشان از عدم تأثیر این پارامتر بر رفتار نانوذرات نیست. همان گونه که قبلا در شکل (۵) که مقدار Nt در آن برابر 10^{-3} می‌باشد، اشاره شد که یکی از علل بروز اختلاف در دو نمودار مشابه برای دو زمان متفاوت، وجود نیروی ترموفروسیس می‌باشد. به علاوه، بررسی‌ها نشان می‌دهد که به طور کلی تأثیر نیروی براونی در زمان‌های بسیار کوتاه آشکار می‌شود حال آن‌که مؤثر واقع شدن نیروی ترموفروسیس مستلزم گذشت زمان بسیار بیشتری می‌باشد. شکل (۷) نمودار تغییرات غلظت نانوذرات بر حسب زمان برای مقادیر مختلف پارامتر ترموفروسیس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش این پارامتر بنا به دلایل اشاره شده تغییری در میزان غلظت نهایی نانوذرات رخ نمی‌دهد.



شکل (۷): نمودار تغییرات غلظت نانوذرات بر حسب زمان برای مقادیر مختلف *Nt*

شکل (۸) نمودار عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف پارامتر ترموفروسیس بر روی استوانه‌ی دایره‌ای و دیواره‌ی سمت چپ را برای زمان‌های ۰/۰۱s و ۰/۰۰۵s نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود در هر کدام از زمان‌های فوق عدد ناسلت متوسط با تغییر پارامتر ترموفروسیس تغییر نکرده است. اعدد ناسلت متوسط برای استوانه‌ی دایره‌ای برای زمان ۰/۰۰۵s در سطح بالاتری از مقادیر متناظر خود در زمان ۰/۰۱s قرار دارند. این رفتار برای دیواره‌ی سمت چپ عکس استوانه‌ی دایره‌ای می‌باشد. رفتار اشاره شده را این‌گونه می‌توان توجیه نمود که با گذشت زمان و مؤثر واقع شدن نیروی ترموفروسیس با توجه به حرکت نانوذرات از مرز گرم (استوانه‌ی دایره‌ای) به طرف مرز سرد (دیواره‌ی سمت چپ)، انتقال حرارت در اطراف استوانه‌ی دایره‌ای کاهش یافته و بر روی مرز سرد افزایش می‌یابد.



شکل (۸): نمودار عدد ناسلت متوسط بر روی استوانه‌ی دایره‌ای و دیواره‌ی سمت چپ برای مقادیر مختلف *Nt* در زمان‌های ۰/۰۱s و ۰/۰۰۵s

۷- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی طبیعی دو پخشی و ناپایا در یک محفظه‌ی بسته‌ی چهار ضلعی پر شده از سیال حاوی نانوذرات در نظر گرفته شده است. معادلات حاکم از روش غیرهمگن با استفاده از مدل بونجیورنو به همراه شرایط مرزی در فرم بی‌بعد خود بدست آمده‌اند و در ادامه با استفاده از روش المان محدود حل شده‌اند. در پژوهش حاضر تأثیر مهم‌ترین پارامترهای بی‌بعد آشکار شده در معادلات مذکور و مرتبط با نیروهای براونی و ترموفروسیس یعنی عدد لویس سیال حاوی نانوذره (Ln) و پارامتر ترموفروسیس (Nt) بر اعداد ناسلت و شروود متوسط و نیز میزان غلظت نانوذرات درون محفظه مورد بررسی قرار گرفته است. مشاهده شد که افزایش مقدار Ln تا 10^3، موجب کاهش عدد شروود متوسط می‌شود در حالی که برای سایر مقادیر Ln، مقدار عدد شروود متوسط تقریبا ثابت باقی می‌ماند. نتایج به طور واضح نشان می‌دهند که با کاهش Ln مقدار غلظت ذرات در زمان نهایی کاهش می‌یابد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]

همچنین می‌توان مشاهده نمود که برای استوانه‌ی دایره‌ای با کاهش ضریب براونی، ابتدا یک کاهش در عدد ناسلت متوسط رخ می‌دهد و پس از آن مقدار عدد ناسلت متوسط تقریبا ثابت باقی می‌ماند؛ در دیواره‌ی سمت چپ نیز عدد ناسلت متوسط برای هر دو زمان تقریبا ثابت باقی ماند. بررسی‌ها نشان داد که به ازای مقادیر مختلف پارامتر ترموفروسیس، عدد ناسلت متوسط بر روی استوانه‌ی دایره‌ای و دیواره‌ی سمت چپ، تغییر نمی‌کند. همچنین به ازای مقادیر متفاوت پارامتر ترموفروسیس تأثیر قابل توجهی در عدد شروود متوسط مشاهده نشد. به علاوه هر چند افزایش در Nt منجر به افزایش در ضریب ترموفروسیس (D_T) می‌شود؛ اما به دلیل کوچک بودن پارامتر ترموفروسیس و تأثیر کم این پارامتر در معادلات حاکم، افزایش در این پارامتر منجر به تغییر خاصی در توزیع غلظت نانوذرات نشده است؛ از اینرو با افزایش این پارامتر، تغییری در میزان غلظت نهایی نانوذرات رخ نمی‌دهد.

فهرست علامت‌ها

غلظت بابعد فاز ثانویه (kg/m^3)	c
غلظت بالای فاز ثانویه (kg/m^3)	c_h
غلظت پایین فاز ثانویه (kg/m^3)	c_c
غلظت بی‌بعد فاز ثانویه	C
ضریب پخش جرمی (m^2/s)	D
ضریب براونی (m^2/s)	D_B
ضریب ترموفروسیس (m^2/s)	D_T
شتاب گرانش (m/s^2)	g
ارتفاع محفظه بسته (m)	H
عدد لویس عادی	Le
عدد لویس سیال حاوی نانوذره	Ln
بردار نرمال	n
نسبت شناوری عادی	N_c
نسبت شناوری سیال حاوی نانوذره	N_ϕ
پارامتر براونی	Nb
پارامتر ترموفروسیس	Nt
عدد ناسلت متوسط	$\overline{Nu}$
فشار (pa)	p
فشار بی‌بعد	P
عدد پرانتل	Pr
شعاع استوانه‌ی دایره‌ای (m)	R
عدد رایلی	Ra
عدد رایلی حرارتی	Ra_T
سطح	s
عدد شروود متوسط	$\overline{Sh}$
زمان (s)	t
دما (K)	T
مؤلفه‌ی بابعد افقی سرعت (m/s)	u
مؤلفه‌ی بی‌بعد افقی سرعت	U
مؤلفه‌ی بابعد عمودی سرعت (m/s)	v
عرض محفظه بسته (m)	W
مؤلفه‌ی بابعد افقی مکان (m)	x
مؤلفه‌ی بی‌بعد افقی مکان	X
مؤلفه‌ی بابعد عمودی مکان (m)	y
مؤلفه‌ی بی‌بعد عمودی مکان	Y
علائم یونانی	
ضریب پخش حرارتی (m^2/s)	α
ضریب انبساط حرارتی سیال پایه (K^{-1})	β_T
ضریب انبساط غلظت فاز ثانویه (K^{-1})	β_c
محل عمودی استوانه‌ی دایره‌ای (m)	δ
کسر حجمی نانوذرات، غلظت نانوذرات	ϕ
کسر حجمی اولیه‌ی نانوذرات	ϕ_0
کسر حجمی پایین نانوذرات	ϕ_c
غلظت بی‌بعد نانوذرات	Φ
زاویه انحراف ضلع عمودی محفظه بسته ($degree$)	φ
ویسکوزیته سینماتیک (m^2/s)	υ
دمای بی‌بعد	θ
چگالی (kg/m^3)	ρ
ظرفیت حرارتی ($kg/m^3\,K$)	(ρc_p)
زمان بی‌بعد	τ
زیرنویس	
حالت مرجع	0
سیال پایه	bf
سرد	c
گرم	h
سیال حاوی نانوذره	nf
نانوذرات	p

مراجع

[1] J. Seok, K. M. Chun, S. Song, S. Lee, Study on the filtration behavior of a metal fiber filter as a function of filter pore size and fiber diameter, Journal of Aerosol Science, 81 (2014) 47-61.

[2] W.W.F. Leung, C.H. Hung, C.H., Skin effect in nanofiber filtration of submicron aerosol, Journal of Separation and Purification Technology, 92 (2012) 174-180.

[3] Q. Wang, B. Maze, H. Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi, A case study of simulating submicron aerosol filtration via lightweight spun-bonded filter media, Chemical Engineering Science, 61 (2006) 4871 – 4883.

[4] B. Maze, Q. Wang, H. Vahedi Tafreshi, B. Pourdeyhimi, A simulation of unsteady-state filtration via nanofiber media at reduced operating pressures, Journal of Aerosol Science, 38 (2007) 550 – 571.

[5] M. K. Akbar, M. Rahman, S.M. Ghiaasiaan, Particle transport in a small square enclosure in laminar natural convection, Journal of Aerosol Science, 40 (2009) 747-761.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]

[6] J. Buongiorno, Convective Transport in Nanofluids. Journal of Heat Transfer, 128(3) (2006) 240.

[7] A. Guha, S. Samanta, Effect of thermophoresis and its mathematical models on the transport and deposition of aerosol particle in natural convective flow on vertical and horizontal plates, Journal of Aerosol Science, 77 (2014) 85-101.

[8] Q. Qin, Z. A. Xia, Z. F. Tian, High accuracy numerical investigation of double-diffusive convection in a rectangular enclosure with horizontal temperature and concentration gradients, International Journal of Heat and Mass Transfer, 71 (2014) 405–423.

[9] K. Al-Farhany, A. Turan, Numerical study of double diffusive natural convective heat and mass transfer in an inclined rectangular cavity filled with porous medium, International Communications in Heat and Mass Transfer, 39 (2012) 174–181.

[10] F. Oueslati, B. Ben-Beya, T. Lili, Double-diffusive natural convection and entropy generation in an enclosure of aspect ratio 4 with partial vertical heating and salting sources, Alexandria Engineering Journal, 52 (2013) 605–625.

[11] A. Behseresht, A. Noghrehabadi, M.,Ghalambaz, Natural-convection heat and mass transfer from a vertical cone in porous media filled with nanofluids using the practical ranges of nanofluids thermo-physical properties, Chemical Engineering Research and Design, 92 (2014) 447–452.

[12] A. K. Hussein, Computational analysis of natural convection in a parallelogrammic cavity with a hot concentric circular cylinder moving at different vertical locations, International Communications in Heat and Mass Transfer, 46 (2013) 126–133.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1395.3.2.4.5]