



بررسی عددی تأثیر ته‌نشینی نانوذرات بر میدان‌های جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک محفظه

قنبرعلی شیخزاده^{*}، مهدی ملامهدی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۶ آذر ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۳ بهمن ۱۳۹۴
پذیرش: ۹ اسفند ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۲۶ مرداد ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

شبیه‌سازی عددی
نانوسیال
ترموفرسیس
حرکت براونی
ته‌نشینی

چکیده: در این تحقیق میدان‌های جریان، انتقال حرارت و انتقال جرم نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم به‌عنوان مخلوطی دوجزئی در محفظه‌ای مربعی با لحاظ مکانیزم‌های حرکت براونی، ترموفرسیس و ته‌نشینی در بازه زمانی ۳۰ روزه به‌صورت عددی بررسی شده است. دیواره سمت چپ محفظه گرم، دیواره سمت راست آن سرد و اختلاف دمای بین آنها ۸ کلون می‌باشد. دیواره‌های افقی نیز عایق در نظر گرفته شده‌اند. برای لحاظ تغییرات کسر حجمی نانوذرات با گذشت زمان از مدلی تجربی استفاده شده است. معادلات مومنتوم، انرژی و انتقال ذرات با استفاده از روش حجم محدود و به کمک الگوریتم سیمپلر حل شده‌اند. کسر حجمی اولیه نانوذرات برابر ۰/۰۲۵، ۰/۰۷۷ و ۰/۱۳، مدت زمان قرارگیری تحت امواج فراصوت ۱، ۲ و ۳ ساعت و محدوده اعداد رایلی از ۱۰^۲ تا ۱۰^۵ می‌باشد. نتایج حاصل شده نشان می‌دهند که ضریب بهبود با گذشت زمان و ته‌نشینی نانوذرات در اعداد رایلی ۱۰^۲ و ۱۰^۳ کاهش می‌یابد. اما این ضریب با گذشت زمان در اعداد رایلی ۱۰^۴ و ۱۰^۵ و کسر حجمی ۰/۰۲۵ کاهش، در کسر حجمی ۰/۱۳ افزایش و در کسر حجمی ۰/۰۷۷ با توجه به افزایش هم‌زمان ضریب هدایت حرارتی و لزجت دارای نقطه بحرانی می‌باشد، به‌طوری که ضریب بهبود تا قبل از نقطه بحرانی افزایش و بعد از آن کاهش می‌یابد. همچنین نتایج عددی نشان می‌دهند که با در نظر گرفتن سرعت ته‌نشینی نانوذرات، گرادیان غلظت در نزدیکی دیواره‌های سرد و گرم افزایش یافته و عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

رسیدند که در هر عدد گراشهف با افزایش کسر حجمی نانوذرات، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد، اما پوترا و همکاران [۲] با افزایش کسر حجمی نانوذرات، کاهش عدد ناسلت مربوط به جابه‌جایی طبیعی را در یک استوانه افقی به‌صورت تجربی گزارش کردند. در بررسی دیگری ون و دینگ [۳] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید تیتانیم را در فضای بین دو دیسک به‌صورت تجربی بررسی نمودند. آنها برای پایداری نانوذرات در سیال به جای استفاده از سورفکتانت^۱ از نیروی دافعه الکترواستاتیک^۲ استفاده کردند. اگرچه قطر واقعی نانوذرات در این حالت بیشتر از مقدار اولیه آنها می‌باشد، اما نانوسیال ایجاد شده در این حالت بسیار پایدار است. همچنین بر اساس نتایج آنها، به‌کارگیری نانوذرات باعث کاهش ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی با توجه به شرایط در نظر گرفته شده توسط آنها می‌شود. ابوندا و همکاران [۴] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در یک حلقه را به روش عددی و با به‌کارگیری نانوسیال‌های مختلف بررسی کردند. آنها بهبود انتقال حرارت را با افزایش کسر حجمی نانوذرات در تمام اعداد رایلی گزارش نمودند. بر اساس نتایج آنها در عدد رایلی ۱۰^۴ تأثیر استفاده از نانوذرات نسبت به سایر اعداد رایلی کمتر می‌باشد. در بررسی دیگری ابوندا و همکاران [۵] تأثیر خواص متغیر نانوسیال را بر جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مستطیلی به روش عددی بررسی نمودند. آنها لزجت و ضریب

سیالات رایج مورد استفاده در انتقال حرارت شامل آب، روغن، تولوئن و اتیلن گلیکول می‌باشند. این سیالات به دلیل ضریب هدایت حرارتی پایین نیاز به روش‌هایی برای بهبود خواص حرارتی دارند. به همین دلیل محققان روش‌هایی مانند اضافه نمودن ذرات جامد در حد میکرومتر و نانومتر به سیال پایه را به دلیل بالاتر بودن ضریب هدایت حرارتی جامدات نسبت به سیالات پیشنهاد نمودند. اما مشکل اصلی در به‌کارگیری این روش، رسوب‌گذاری و ته‌نشینی شدن نانوذرات با گذشت زمان در محفظه مورد بررسی می‌باشد. هرچند که سوسپانسیون‌های حاوی ذرات جامد با ابعاد نانومتر، دارای ضریب انتقال حرارت بالاتر، پایداری بیشتر و رسوب‌گذاری کمتر نسبت به سوسپانسیون‌های حاوی ذرات جامد با ابعاد میکرومتر می‌باشد، اما باز هم پدیده ته‌نشینی در سوسپانسیون‌های آنها مشاهده می‌شود.

در بیشتر مطالعات عددی که تاکنون در مورد تأثیر به‌کارگیری نانوسیالات در بهبود انتقال حرارت انجام شده است، فرض بر این است که میان نانوذرات و مولکول‌های سیال پایه لغزش وجود ندارد و توزیع نانوذرات در نانوسیال کاملاً یکنواخت است. از جمله کارهای انجام شده با این فرض می‌توان به تحقیقات متعددی [۶-۱] اشاره نمود. خانافر و همکاران [۱] جریان جابه‌جایی آزاد نانوسیال داخل یک محفظه مربعی را به روش عددی بررسی کردند. آنها با بررسی اثر افزودن نانوذرات اکسید مس به سیال آب به این نتیجه

1 Surfactant
2 Electrostatic

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Sheikhz@kashanu.ac.ir

هدایت حرارتی مربوط به نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس را وابسته به دما در نظر گرفتند. بر اساس نتایج گزارش شده توسط آنها در اعداد رایلی بالا ضریب انتقال حرارت وابستگی بیشتری به مدل در نظر گرفته شده برای لزجت دارد. همچنین آنها برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم گزارش نمودند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات به بیش از ۵ درصد، در اعداد رایلی بالا، عدد ناسلت کاهش و در اعداد رایلی پایین این عدد افزایش می‌یابد. مطالعه تجربی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-آلومینیوم در یک استوانه عمودی نیز توسط علی و همکاران [۶] انجام شد. بر اساس نتایج آنها ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات تا یک مقدار مشخص افزایش و با افزایش بیشتر کسر حجمی، کاهش می‌یابد. به طوری که حتی ضریب انتقال حرارت نانوسیال کمتر از آب خالص می‌شود. هو و همکاران [۷] با استفاده از روش شبکه بولتزمن و روش تجربی جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک محفظه مربعی مورد مطالعه قرار دادند و تطابق مناسب نتایج عددی و تجربی را گزارش نمودند. بر اساس یافته‌های آنها مشاهده گردید که انتقال حرارت در کسرهای حجمی پایین نانوذرات حساسیت بیشتری به مدل در نظر گرفته شده برای ضریب هدایت حرارتی نسبت به لزجت دارد، اما در کسرهای حجمی بالای نانوذرات این حساسیت عکس می‌گردد. آنها همچنین بیان نمودند که نیروی محرکه ناشی از اختلاف دمایی صفحات گرم و سرد بیشترین سهم را در توزیع نانوذرات دارد و توزیع کسر حجمی نانوذرات برخلاف توزیع چگالی فاز آب می‌باشد و گزارش کردند که عدد ناسلت در غلظت‌های ۱٪ و ۲٪ درصد وزنی، بیشتر و در غلظت‌های بالاتر، کمتر از آب خالص می‌باشد.

اما امروزه بیشتر محققین اعتقاد دارند که توزیع نانوذرات در سیال پایه به دلیل وجود مکانیزم‌هایی مانند نفوذ براونی، ترموفریسیس و تهنشینی نمی‌تواند یکنواخت باشد و میان نانوذرات و مولکول‌های سیال پایه لغزش وجود دارد. مطالعات انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که لحاظ کردن مکانیزم‌های انتقال نانوذرات باعث کاهش اختلاف نتایج به دست آمده از روش عددی با روش تجربی می‌شود. کو و کلینسترو [۸] اثرات مکانیزم‌های انتقال ذرات شامل حرکت براونی، ترموفریسیس و اسموفریسیس^۱ را بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بررسی کردند. آنها اثرات مکانیزم‌های مذکور را به یک مدل استاتیکی برای ضریب هدایت حرارتی مانند مدل ماکسول اضافه کردند و با مقایسه اثرات هر یک از این مکانیزم‌ها به این نتیجه رسیدند که حرکت براونی از اهمیت بیشتری برخوردار بوده و با افزایش قطر نانوذرات اهمیت آن بیشتر می‌شود. بونجیورنو [۹] هفت نوع فرآیند انتقال نانوذرات که در اثر لغزش میان سیال پایه و نانوذرات ایجاد می‌شوند را معرفی نمود. او نشان داد که مکانیزم‌های ترموفریسیس و حرکت براونی از اهمیت بیشتری نسبت به سایر مکانیزم‌ها برخوردار هستند. او همچنین برای تحلیل میدان جریان و انتقال حرارت نانوسیال، معادلات بقای جرم، مومنتوم، انرژی و انتقال ذرات در نظر گرفت و با تحلیل بدون بعد معادلات اظهار نمود که اثر توزیع ذرات

بر میدان انتقال حرارت قابل صرف نظر کردن می‌باشد. پاکروان و یعقوبی [۱۰] با لحاظ کردن مکانیزم‌های مختلف انتقال نانوذرات یعنی حرکت براونی، ترموفریسیس و دوفور در جابه‌جایی طبیعی نانوسیال، نتایج خود را با مطالعات مختلف نظری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها اثر دوفور باعث کاهش انتقال حرارت نسبت به مدل همگن می‌گردد. آنها همچنین نشان دادند که عدد ناسلت محاسبه شده با داده‌های تجربی تطابق مناسبی دارد. در بررسی دیگری [۱۱] آنها تأثیر حرکت نانوذرات را بر جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم مورد بررسی قرار دادند. بر اساس نتایج آنها مشاهده گردید که سرعت لغزشی بین نانوذرات باعث توزیع ناهمگون نانوذرات می‌شود. لذا بر اساس یافته‌های آنها در نظر گرفتن نانوسیال به صورت تک فاز فرض دقیقی نیست و رفتار نانوسیال متفاوت از سیال پایه می‌باشد. آنها همچنین کاهش عدد ناسلت را با افزایش کسر حجمی نانوذرات گزارش کردند. در بررسی دیگری شیخ‌زاده و همکاران [۱۲] تأثیر مکانیزم‌های انتقال نانوذرات را بر جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که اثر دوفور بر انتقال حرارت قابل صرف نظر کردن می‌باشد. آنها از دو مدل همگن و انتقالی برای ارزیابی خواص نانوسیال استفاده نمودند. نتایج آنها بیانگر کاهش میزان انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانوذرات در هر دو مدل می‌باشد، اما مدل انتقالی کاهش بیشتری را نسبت به مدل همگن پیش‌بینی می‌کند. گروسی و همکاران [۱۳] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی و ترکیبی نانوسیال آب-آلومینیوم اکسید را در یک محفظه مربعی با استفاده از مدل بونجیورنو بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که برای هر عدد رایلی یک کسر حجمی بهینه وجود دارد که میزان انتقال حرارت در آن بیشینه است. آنها همچنین مشاهده کردند که در اعداد رایلی کم، توزیع نانوذرات ناهمگون و در اعداد رایلی بالا، این توزیع به‌طور تقریبی همگون می‌باشد. اسلامیان و همکاران [۱۴] اثر ترموفریسیس بر جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی پر شده از نانوسیال را به روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که عدد ناسلت با افزایش عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. این افزایش در عدد رایلی 10^6 برای کسر حجمی ۱۰٪ کمتر از ۲۰٪ است و با در نظر گرفتن پدیده ترموفریسیس عدد ناسلت حدود ۱۰٪ افزایش می‌یابد. دستمالچی و همکاران [۱۵] پدیده پخش مضاعف جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک محفظه مربعی متخلخل بررسی کردند. آنها در مطالعه خود، با لحاظ کردن اثرات ترموفریسیس و حرکت براونی به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

پدیده تهنشینی به دلیل ارتباط ذاتی آن با اصول فیزیک غیرتعادلی و همچنین اهمیت ارتباط آن با بسیاری از کاربردهای صنعتی، یکی از زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه بسیاری از محققان می‌باشد، اما به دلیل پیچیدگی در توصیف اثر متقابل نانوذرات مطالعات زیادی در مورد آن انجام نشده است. هو و همکاران [۱۶] جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم را در

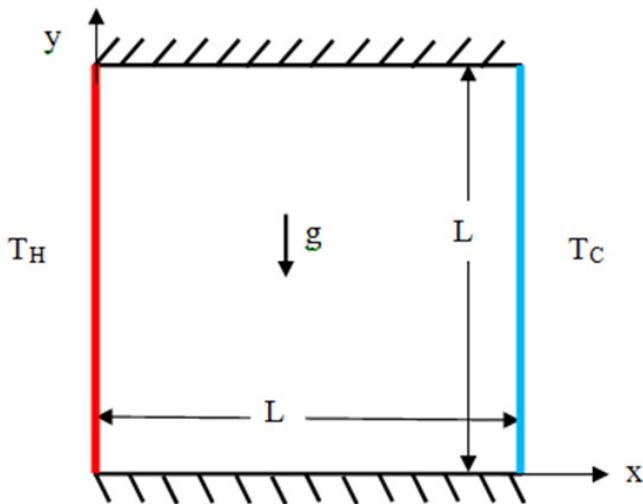


Fig. 1. Schematic of the cavity.

شکل ۱: طرحواره محفظه مورد بررسی

جدول ۱: قطر متوسط نانوذرات در نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با توجه به مدت زمان قرارگیری تحت امواج فراصوت [۱۸]

Table 1. Average diameters of the Al₂O₃ nanoparticles for different ultrasonic dispersion times [18].

قطر متوسط نانوذرات (nm)	کسر حجمی نانوذرات	مدت زمان قرارگیری تحت امواج فراصوت (hr)	۱	۲	۳
۶۶	۰/۰۰۲۵	۱	۲	۳	۴۴
۸۶	۰/۰۰۷۷	۱	۲	۳	۶۶
۱۱۸	۰/۰۱۳	۱	۲	۳	۸۸

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات اکسید آلومینیوم در دمای ۳۱۰ کلوین [۱۹]

Table 2. Thermo-physical properties of base fluid and nanoparticles at 310 K [19].

خواص ترموفیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم
ρ (kg/m ³)	۹۹۳	۳۹۷۰
c_p (J/kg-k)	۴۱۷۸	۷۶۵
k (W/mK)	۰/۶۲۸	۴۰
$\beta \times 10^4$ (K ⁻¹)	۳/۶۲	۰/۸۵
$\mu \times 10^4$ (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	۶/۹۵	-
d (nm)	۰/۳۸۵	متغیر

این معادلات شامل بقای جرم (۱)، بقای مومنتوم در راستای x (۲)، بقای مومنتوم در راستای y (۳)، بقای انرژی (۴) و انتقال نانوذرات (۵) می‌باشند که به صورت روابط زیر در نظر گرفته می‌شوند [۱۷ و ۲۰].

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

یک محفظه با لحاظ اثرات ته‌نشینی، ترموفریسیس و حرکت براونی به صورت عددی بررسی کردند. نتایج آنها نشان می‌دهد که در یک کسر حجمی مشخص تفاوت بین بیشترین و کمترین مقدار غلظت با افزایش عدد رایلی به دلیل افزایش نیروی بویانسی افزایش می‌یابد. در بررسی دیگری [۱۷] آنها رفتار جریان شناوری نانوسیال‌ها در یک محفظه مربعی با دیواره‌های عمودی عایق، دیواره پایین، سرد و دیواره بالا، گرم را با در نظر گرفتن اثر ترموفریسیس و ته‌نشینی به صورت عددی و تجربی بررسی نمودند. آنها در یک مدل عددی اثرات ترموفریسیس، حرکت براونی و ته‌نشینی را لحاظ کردند و در مدل دیگری هیچ یک از این اثرات را لحاظ نکردند. اختلاف زیادی در نتایج به دست آمده از این دو مدل مشاهده گردید. به طوری که عدد ناسلت متوسط محاسبه شده با روش عددی در صورت لحاظ اثرات حرکت براونی، ترموفریسیس و ته‌نشینی به نتایج تجربی بسیار نزدیک‌تر است. همچنین آنها مشاهده کردند که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی در صورت استفاده از نانوسیال‌هایی با کسر حجمی بیشتر از ۲٪ بیشتر می‌شود.

در مطالعات قبلی انجام شده مربوط به این هندسه، پدیده ته‌نشینی نانوذرات لحاظ نشده است. در مطالعه حاضر با لحاظ کردن سرعت ته‌نشینی نانوذرات و تغییرات کسر حجمی نانوذرات بر حسب زمان بر اساس مدلی تجربی، نتایج به دست آمده برای جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در یک محفظه مربعی در بازه زمانی ۳۰ روزه ارائه می‌گردد تا درک جامع‌تری در مورد استفاده یا عدم استفاده از نانوسیال برای جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه مربعی حاصل شود.

۲- هندسه، معادلات حاکم و شرایط مرزی

هندسه مورد بررسی در این مسئله بر اساس مدل در نظر گرفته شده برای ته‌نشینی نانوذرات مطابق شکل ۱ می‌باشد. محفظه به صورت مربعی با عرض و ارتفاع L فرض می‌شود. دیواره سمت چپ محفظه گرم (T_H) و دیواره سمت راست آن نیز سرد (T_C) می‌باشد. اختلاف دمای بین دو دیواره عمودی 8 K و دیواره‌های پایین و بالای محفظه عایق فرض می‌شوند. محفظه حاوی نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم با کسرهای حجمی اولیه $0/0025$ ، $0/0077$ و $0/013$ می‌باشد که به مدت ۱، ۲ و ۳ ساعت تحت امواج فراصوت برای آماده‌سازی قرار گرفته‌اند. با توجه به کسر حجمی اولیه نانوذرات و مدت زمان قرارگیری تحت امواج فراصوت بر اساس کار تجربی انجام شده توسط رحمان و همکاران [۱۸] الگوی ته‌نشینی نانوذرات متفاوت می‌باشد که در شکل ۲ نشان داده شده است. در جدول ۱، قطر متوسط نانوذرات بر اساس دو عامل گفته شده و در جدول ۲، خواص ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه و نانوذرات اکسید آلومینیوم در دمای 310 K ارائه شده است.

در این بررسی نانوسیال به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و نانوذرات جامد در نظر گرفته می‌شود. معادلات حاکم بر مسئله با فرض سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم برای جریان آرام و دوبعدی با لحاظ تقریب بوزینسک و مکانیزم‌های انتقال نانوذرات نوشته می‌شوند.

$$\rho_{nf} \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_x \quad (2)$$

$$S_x = -\rho_p \left[1 - 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_{nf}} \right) \varphi \right] V_{s,x} \left(V_{s,x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + V_{s,y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)$$

$$\rho_{nf} \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \left[(1 - \varphi_i) \rho_f (T - T_c) \beta_f g \right] + S_y \quad (3)$$

$$S_y = -\rho_p \left[1 - 2 \left(\frac{\rho_p}{\rho_{nf}} \right) \varphi \right] V_{s,y} \left(V_{s,x} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + V_{s,y} \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)$$

$$(\rho c_p)_{nf} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho_p c_p \left(D_B \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) + D_T \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial \varphi}{\partial x} + v \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_B \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_B \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) \quad (5)$$

در روابط (۴) و (۵) مقدار D_B بر اساس مدل استوکس- انیشیتین [۹]، مقدار D_T بر اساس تقریب امسی [۲۱] و سرعت ته‌نشینی [۱۷] به صورت روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$D_B = \frac{\rho_p k_B T}{3\pi\mu_f d_p} \quad (6)$$

$$D_T = 0.26 \frac{k_f}{2k_f + k_p} \frac{\mu_f}{\rho_f T} \varphi \quad (7)$$

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho_m) g d_p^2}{18\mu_f} (1 - \varphi)^{5.6} e_g^- \quad (8)$$

چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی نانوسیال با استفاده از روابط زیر بر اساس خواص نانوذرات و سیال پایه به دست می‌آیند.

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi) \rho_f + \varphi \rho_s \quad (9)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho c_p)_f + \varphi (\rho c_p)_s \quad (10)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \varphi) (\rho \beta)_f + \varphi (\rho \beta)_s \quad (11)$$

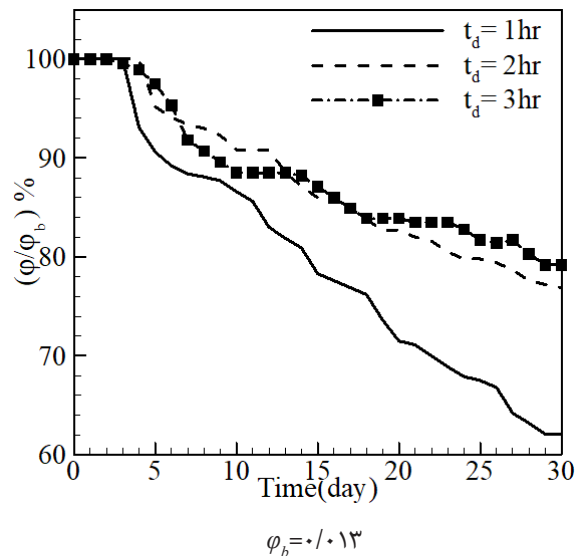
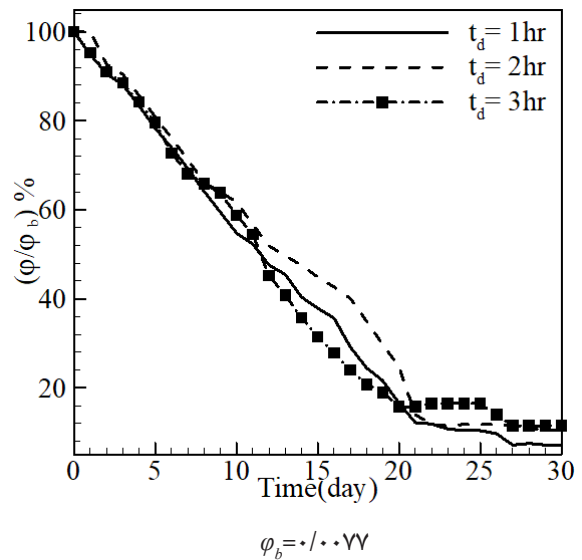
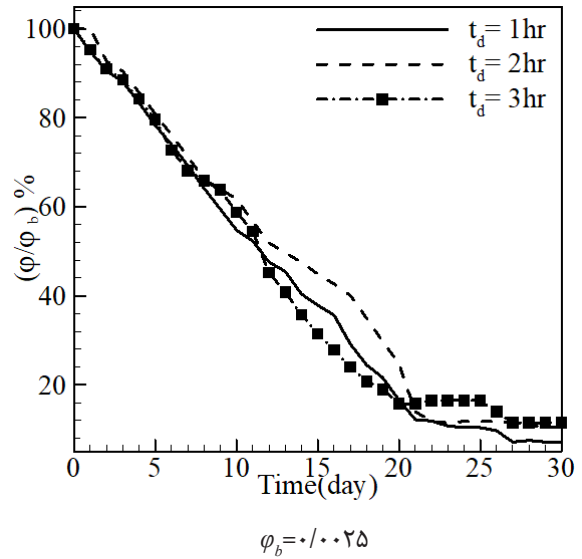


Fig. 2. The rate of sedimentation nanoparticles for water- Al_2O_3 nanofluid for $\varphi_b = 0.0025, 0.0077, \text{ and } 0.013$ [2].

شکل ۲: روند ته‌نشینی نانوذرات برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم [۱۸]

جریان بایستی محاسبه گردد که برای محاسبه تابع جریان از رابطه (۱۹) استفاده می‌گردد. این رابطه در واقع بیانگر شار جرمی جریان در محفظه دوعبده می‌باشد و قدرت گردابه‌ها را نشان می‌دهد [۱۲].

$$\psi(x, y) = -\int_0^l \rho_{nf} u dx + \psi_0 \quad (19)$$

عدد ناسلت موضعی و متوسط نیز به‌عنوان معیار میزان انتقال حرارت روی دیوار گرم یا سرد به‌صورت رابطه (۲۰) در نظر گرفته می‌شوند.

$$Nu = \frac{hL}{k_f}, \quad \overline{Nu} = \frac{\overline{h}L}{k_f} \quad (20)$$

در رابطه بالا، L ارتفاع محفظه و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی روی دیوار گرم یا سرد می‌باشد. مقدار \overline{h} ضریب جابه‌جایی متوسط می‌باشد که از انتگرال‌گیری ضریب جابه‌جایی موضعی در طول دیوار مطابق رابطه (۲۱) به‌دست می‌آید.

$$\overline{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dy \quad (21)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی موضعی با استفاده از رابطه (۲۲) و (۲۳) به دست می‌آید.

$$h = \frac{q''}{T_H - T_C} \quad (22)$$

$$q'' = -k_{nf} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{wall} \quad (23)$$

۳- شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم به کمک یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن و با استفاده از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر حل می‌شوند. به دلیل وجود گرادین‌های شدید و نواحی چرخشی انتخاب شبکه در این مسئله حائز اهمیت می‌باشد. در چنین حالتی به دلیل صرفه‌جویی در میزان محاسبات و به دنبال آن کاهش زمان حل، بهتر است که از شبکه‌ای با ابعاد غیریکنواخت استفاده گردد. پس از انطباق شبکه بر میدان حل، حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می‌شود و از معادلات حاکم روی هر حجم کنترلی انتگرال‌گیری می‌شود. سپس معادلات منفصل شده و دستگاهی از معادلات جبری به‌دست می‌آید. برای جملات پخش از طرح تفاضل مرکزی مرتبه دوم و برای جملات جابه‌جایی از طرح قاعده توانی استفاده می‌شود. جزئیات بیشتر حل در مرجع [۲۴] آورده شده است. معادلات جبری خطی به‌روش ماتریس سه قطری حل شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، برای این مسئله مدت زمان رسیدن به حالت پایا حدود ۱۵ ثانیه می‌باشد [۲۵].

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی و لزجت نانوسیال از رابطه کورسیونه [۲۲] استفاده شده است.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4 Re^{0.4} Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66} \quad (12)$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 (d_p / d_f)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (13)$$

در رابطه بالا تعاریف Pr و Re به‌صورت روابط (۱۴) و (۱۵) تعریف می‌گردند [۲۲]:

$$Pr = \frac{\mu_f \rho_f}{\alpha_f} \quad (14)$$

$$Re = \frac{2 \rho_f k_B T}{\pi \mu_f d_p} \quad (15)$$

این مدل برای جنس‌های مختلف نانوذرات شامل اکسید آلومینیوم، اکسید مس، اکسید تیتانیوم و مس، و سیالات پایه شامل آب و اتیلن گلیکول، قطر نانوذرات در محدوده ۱۰ nm تا ۱۵۰ nm، کسر حجمی در محدوده ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۹ و دما در محدوده ۲۹۴K تا ۳۲۴K به‌کار می‌رود.

از آنجا که در این مسئله، معادلات به‌صورت با بعد حل می‌شوند، لذا فقط برای ارائه نتایج از بی‌بعدسازی استفاده می‌شود. پارامترهای اصلی موردنیاز با استفاده از رابطه زیر بی‌بعد می‌شوند:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{L}, Y = \frac{y}{L}, \Psi = \frac{\psi}{\rho_f \alpha_{f0}}, U = \frac{uL}{\alpha_{f0}}, V = \frac{vL}{\alpha_{f0}} \\ \theta = \frac{T - T_C}{T_H - T_C}, \Phi = \frac{\phi}{\phi_b}, Ra = \frac{(1 - \phi) g \beta \Delta T L^3}{\alpha_f \nu_f} \end{aligned} \quad (16)$$

با در نظر گرفتن شرط عدم لغزش و شار جرمی برابر صفر روی دیواره‌های محفظه شرایط مرزی حاکم بر معادلات (۱) تا (۵) به‌صورت رابطه (۱۷) در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} u = v = 0, T = T_H, \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{D_T}{D_B} \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{روی دیواره سمت چپ} \\ u = v = 0, T = T_C, \frac{\partial \phi}{\partial x} = -\frac{D_T}{D_B} \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{روی دیواره سمت راست} \\ u = v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad \text{روی دیواره‌های افقی} \end{aligned} \quad (17)$$

با توجه به اینکه معادلات به‌صورت گذرا می‌باشند، لذا شرایط اولیه در نظر گرفته شده برای مسئله در زمان صفر ($t=0$) به‌صورت رابطه (۱۸) بیان می‌شود.

$$u = v = 0, T = T_c, \phi = \phi_b \quad (18)$$

بعد از اینکه میدان‌های سرعت و دما تعیین گردید، عدد ناسلت و تابع

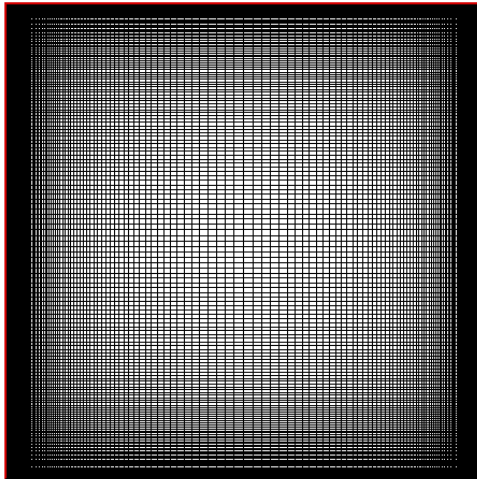


Fig. 4. A non-uniform grid is employed in the grid independence test for $Ra=10^5$.

شکل ۴: شبکه در نظر گرفته شده در رایلی 10^5

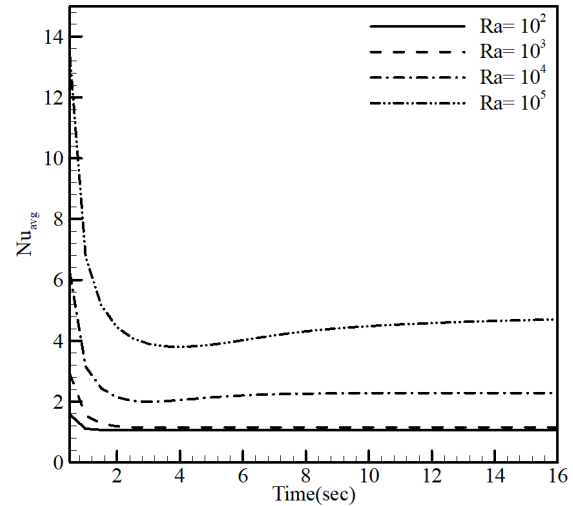


Fig. 3. Time duration to reach steady-state heat transfer.

شکل ۳: زمان رسیدن عدد ناسلت به حالت پایا

جدول ۳: عدد ناسلت متوسط و بیشینه تابع جریان برای تعداد نقاط مختلف شبکه به منظور استفاده در مستقل سازی شبکه در مقادیر $\phi_b = 0.013$, $td = 3hr$, $Ra = 10^2, 10^5$, $e_x = 1.04$, $e_y = 1.02$

Table 3. Mean Nusselt number and maximum stream function for different grid numbers used in grid independence study ($\phi_b = 0.013$, $td = 3hr$, $Ra = 10^2, 10^5$, $e_x = 1.04$, $e_y = 1.02$).

عدد رایلی	تعداد نقاط شبکه	عدد ناسلت متوسط	بیشینه تابع جریان
10^2	161×161	۱/۰۶۶۵۸	۰/۱۱۲۵۰۱
	181×181	۱/۰۶۶۶۵۱	۰/۱۱۲۴۰۸
	201×201	۱/۰۶۷۱۳۱	۰/۱۱۲۶۶۱
	221×221	۱/۰۶۷۵۱۵	۰/۱۱۲۰۶۲
10^5	161×161	۴/۷۷۰۲۱۸	۱۱/۵۶۳۶۳۷
	181×181	۴/۷۷۱۰۳۳	۱۱/۵۶۳۹۹۰
	201×201	۴/۷۷۱۴۱۴	۱۱/۵۶۴۴۱۸
	221×221	۴/۷۷۱۷۸۵	۱۱/۵۶۵۵۴۶

۴- نتایج و بحث

در هندسه مورد مطالعه، وجود اختلاف دما بین دیواره‌های عمودی باعث ایجاد جابه‌جایی طبیعی در محفظه می‌شود. در بازه زمانی در نظر گرفته شده، کسر حجمی نانوذرات موجود در محفظه ثابت نبوده و با گذشت زمان به تدریج ته‌نشین می‌شوند. پارامترهای مؤثر در نظر گرفته شده در ته‌نشینی نانوذرات، مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت (۱، ۲ و ۳ ساعت) و کسر حجمی اولیه نانوذرات (۰/۰۲۵، ۰/۰۷۷ و ۰/۰۱۳) می‌باشد. این دو عامل علاوه بر تأثیر بر الگوی ته‌نشینی باعث تغییر در قطر متوسط نانوذرات موجود در محفظه می‌شوند.

از آنجا که اختلاف دما برابر مقدار ثابت ۸ K می‌باشد، عدد رایلی با توجه

با توجه به اینکه گام‌های زمانی در نظر گرفته شده برای مسئله ۱ روز می‌باشد، در واقع مسئله به صورت ۳۰ حالت پایا حل شده است. روش حل معادلات نیز بر اساس الگوریتم مبتنی بر تکرار سیمپلر با معیار همگرایی برابر 10^{-6} می‌باشد. با استفاده از کامپیوتری با قدرت پردازش ۲/۸ GHz، زمان محاسباتی حدود ۲۵ ساعت برای هر تحلیل ۳۰ روزه مورد نیاز است.

۳-۱- مستقل سازی نتایج از شبکه حل

پس از اطمینان از صحت عملکرد برنامه، به منظور یافتن شبکه حل مناسب لازم است که استقلال جواب‌ها از نظر تعداد نقاط مورد بررسی قرار گیرد. برای همین منظور اثر تعداد نقاط شبکه بر عدد ناسلت متوسط و بیشینه تابع جریان بررسی شده است. با توجه به اینکه در این مسئله عدد رایلی با تغییر ابعاد محفظه تغییر می‌کند، در جدول ۳ مشاهده می‌شود که شبکه غیریکنواخت با تعداد ۲۰۱ نقطه و ضرایب انبساط ۱/۰۴ در راستای افقی و ۱/۰۲ در راستای عمودی به ازای حدود بالا و پایین عدد رایلی یعنی 10^2 و 10^5 مناسب می‌باشد. شبکه در نظر گرفته شده برای این مسئله در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۲- اعتبارسنجی برنامه

به منظور اطمینان از صحت حل عددی، نتایج مطالعه حاضر با نتایج تحقیقات گذشته مقایسه شده است. عدد ناسلت متوسط مربوط به کار حاضر با نتایج تجربی هو و همکاران [۲۳] برای آب خالص در جدول ۳ مقایسه شده است. در صحت‌سنجی دیگری مقادیر عدد ناسلت متوسط و بیشینه تابع جریان کار حاضر با نتایج کار عددی گروسو و همکاران [۱۳] در جدول ۵ مقایسه شده است. همان‌طور که از جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، اختلاف نتایج مربوط به برنامه کامپیوتری کار حاضر با نتایج گزارش شده در کارهای قبلی ناچیز است.

در رابطه ۲۴ در صورتی که E برابر صفر باشد، به معنای آن است که نانوسیال تأثیری در میزان انتقال حرارت نداشته و بهتر است که از آب خالص استفاده شود. در صورتی که E مقداری منفی داشته باشد، افزودن نانوسیال عملکرد منفی روی میزان انتقال حرارت داشته و نباید از نانوسیال استفاده نمود. در صورتی که E مقداری مثبت باشد، با توجه به صرفه اقتصادی و فنی بایستی در مورد استفاده یا عدم استفاده از نانوسیال تصمیم‌گیری نمود. در شکل‌های ۵ و ۶ تأثیر عدد رایلی و کسر حجمی نانوذرات بر این پارامتر نمایش داده شده است.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد، در عدد رایلی 10^2 و 10^3 هدایت حرارتی دارای اثر غالب می‌باشد و افزودن نانوذرات دارای بیشترین افزایش در بهبود انتقال حرارت می‌باشد. به ازای کسر حجمی 0.13 و عدد رایلی 10^2 با ۳ ساعت قرارگیری تحت امواج فراصوت مشاهده می‌شود که مقدار E برابر $6/66\%$ درصد می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در کسر حجمی 0.25 تغییرات پارامتر مربوط به بهبود انتقال حرارت خیلی زیاد است که به دلیل تغییرات شدید کسر حجمی نانوذرات در بازه زمانی ۳۰ روزه می‌باشد.

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در اعداد رایلی 10^4 و 10^5 که اثر جابه‌جایی طبیعی در کنار اثر هدایت حرارتی اهمیت پیدا می‌کند با افزایش عدد رایلی تأثیر به کارگیری نانوذرات کمتر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای کسر حجمی 0.25 با گذشت زمان مقدار E کاهش می‌یابد و لذا بایستی از روش‌های کمکی دیگری برای پایداری نانوسیال در این محدوده استفاده نمود.

در بازه زمانی ۱۵ تا ۲۰ روزه در کسر حجمی 0.25 برای نانوسیالی که به مدت ۲ ساعت تحت امواج فراصوت قرار گرفته است، به دلیل کسر حجمی بیشتر با وجود قطر نانوذرات بزرگ‌تر عدد ناسلت بیشتری مشاهده می‌گردد. همچنین برای کسر حجمی 0.27 و 0.13 در اعداد رایلی 10^4 و 10^5 مشاهده می‌شود که با گذشت زمان مقدار E افزایش می‌یابد و نقش نانوذرات در انتقال حرارت کمتر می‌شود.

شکل‌های ۷ و ۸ نیز بیانگر تغییرات مقدار بیشینه تابع جریان با گذشت زمان و تغییر کسر حجمی نانوذرات می‌باشند. این پارامتر بیانگر شار جرمی ایجاد شده در محفظه در اثر جابه‌جایی طبیعی و قدرت گردابه‌های تشکیل شده در جریان می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، در اعداد رایلی 10^2 و 10^3 که اثر هدایت حرارتی غالب است، به ازای همه کسرهای حجمی اولیه با گذشت زمان، مقدار شار جرمی بیشینه نانوسیال به دلیل افزایش سرعت بیشینه با وجود کاهش چگالی افزایش می‌یابد. همچنین در شکل ۸ مشاهده می‌شود که در اعداد رایلی 10^4 و 10^5 مقدار بیشینه تابع جریان با گذشت زمان به دلیل کاهش در مقدار چگالی، کاهش می‌یابد.

جدول ۴: مقایسه عدد ناسلت متوسط کار حاضر با کار آزمایشگاهی هو و همکاران [۲۴] در مقادیر مختلف اعداد رایلی برای آب خالص

Table 4. Comparison of the results of the present work and experimental results of Ho et al. [24] at different Rayleigh number for pure water.

عدد رایلی	عدد ناسلت متوسط		درصد اختلاف (%)
	کار حاضر	هو و همکاران [۲۴]	
$7/6 \times 10^5$	۷/۸۵	۷/۶۹	۲/۰۸
$1/42 \times 10^6$	۹/۴۹	۹/۴۴	-۰/۵۳
$1/93 \times 10^6$	۱۰/۴۳	۱۰/۳۵	-۰/۷۷
$2/67 \times 10^6$	۱۱/۵۵	۱۱/۲۸	۲/۳۹
$3/33 \times 10^6$	۱۲/۳۶	۱۲/۰۴	۲/۶۹

جدول ۵: مقایسه عدد ناسلت متوسط و بیشینه تابع جریان کار حاضر با کار عددی گروسی و همکاران [۱۳] دز رایلی 10^5 برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم

Table 5. Comparisons of the Nuavg of the hot wall and Ψ_{max} between the present work and that of Garoosi et al. [18] at $Ra=10^5$ for Al_2O_3 -water nanofluid.

درصد اختلاف (%)	گروسی و همکاران [۱۳]		کار حاضر		کسر حجمی (ϕ)		
	Sf_{max}	Nu_{avg}	Sf_{max}	Nu_{avg}			
	۱/۹۲	۱/۰۵	۱۱/۱۶	۴/۷۶	۱۰/۹۵	۴/۷۱	۰/۰۰
	۰/۸۷	۱/۲۱	۱۱/۴۶	۴/۹۶	۱۱/۳۶	۴/۹۰	۰/۰۱
	۰/۰۹	۱/۲۰	۱۱/۴۵	۵/۰۰	۱۱/۴۶	۴/۹۴	۰/۰۲
	۰/۶۲	۱/۰۰	۱۱/۳۴	۴/۹۸	۱۱/۴۱	۴/۹۳	۰/۰۳
	۱/۳۵	۰/۴۱	۱۱/۱۳	۴/۹۰	۱۱/۲۸	۴/۸۸	۰/۰۴
	۲/۰۳	۰/۴۲	۱۰/۸۳	۴/۷۶	۱۱/۰۵	۴/۷۸	۰/۰۵

به ابعاد محفظه در محدوده 10^2 تا 10^5 تغییر می‌کند. اثر هر یک از پارامترها بر عدد ناسلت متوسط و بیشینه تابع جریان در ادامه به‌طور کامل بیان شده است.

با توجه به الگوهای تهنشینی رفتار عدد ناسلت متوسط و شار جرمی بیشینه با توجه به کسر حجمی اولیه نانوذرات و مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت، در بازه زمانی ۳۰ روزه و در اعداد رایلی متفاوت در شکل‌های ۵ تا ۸ ارائه شده است. برای بیان میزان تأثیر انتقال حرارت ناشی از به کارگیری نانوسیال به سیال پایه از پارامتر بهبود استفاده می‌شود که این پارامتر در رابطه ۲۴ بیان شده است.

$$E = \left(\frac{Nu}{Nu_f} - 1 \right) \times 100 \quad (24)$$

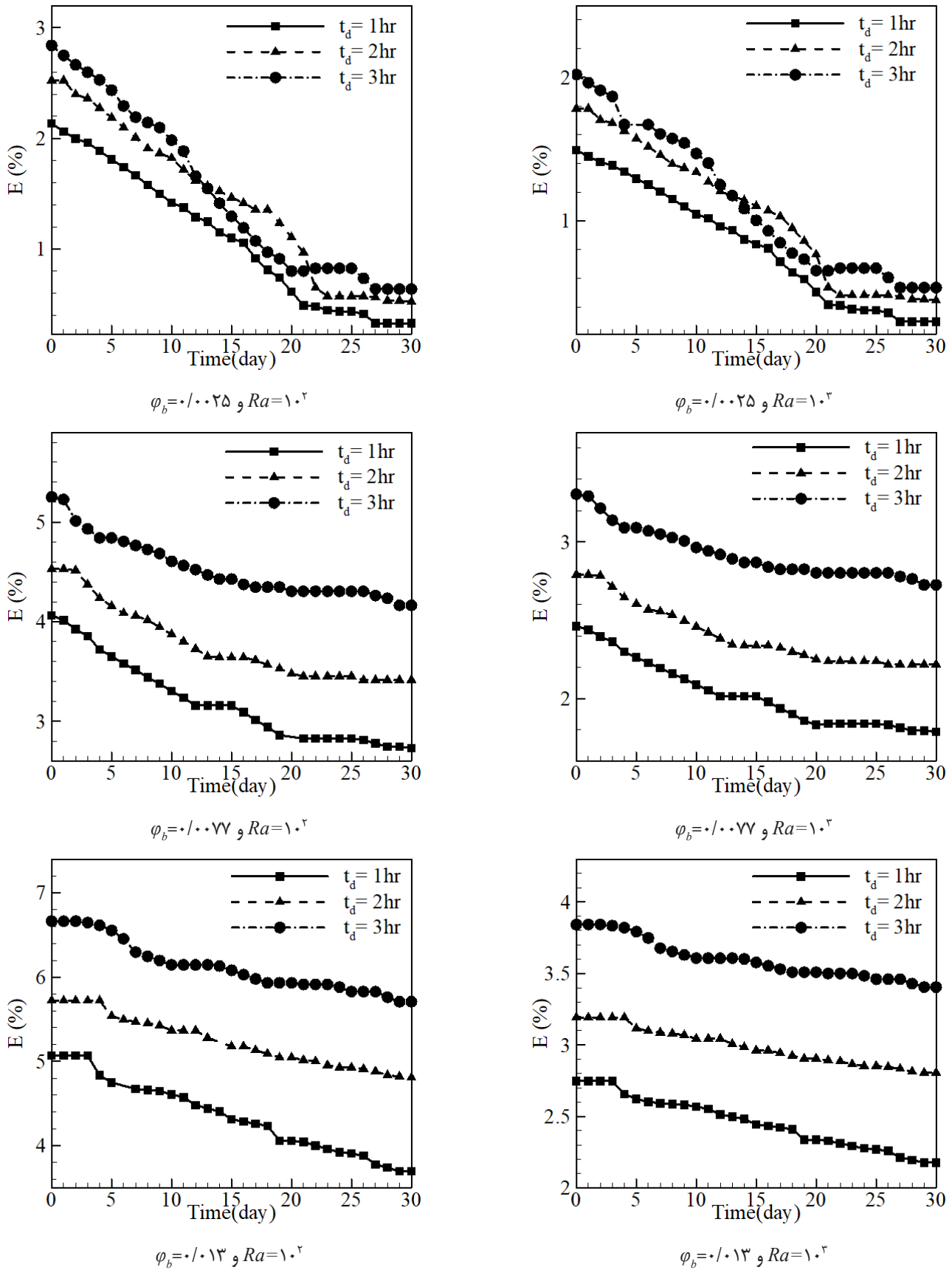


Fig. 5. The heat transfer enhancement (E) over a period of 30 days for different initial volume fraction of nanofluid, ultrasonic dispersion times, and $Ra=10^2, 10^3$.

شکل ۵: میزان بهبود انتقال حرارت (E) در یک بازه زمانی ۳۰ روزه با توجه کسر حجمی اولیه نانوذرات (ϕ_b)، مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت (t_d) و عدد رایلی $Ra=10^2, 10^3$

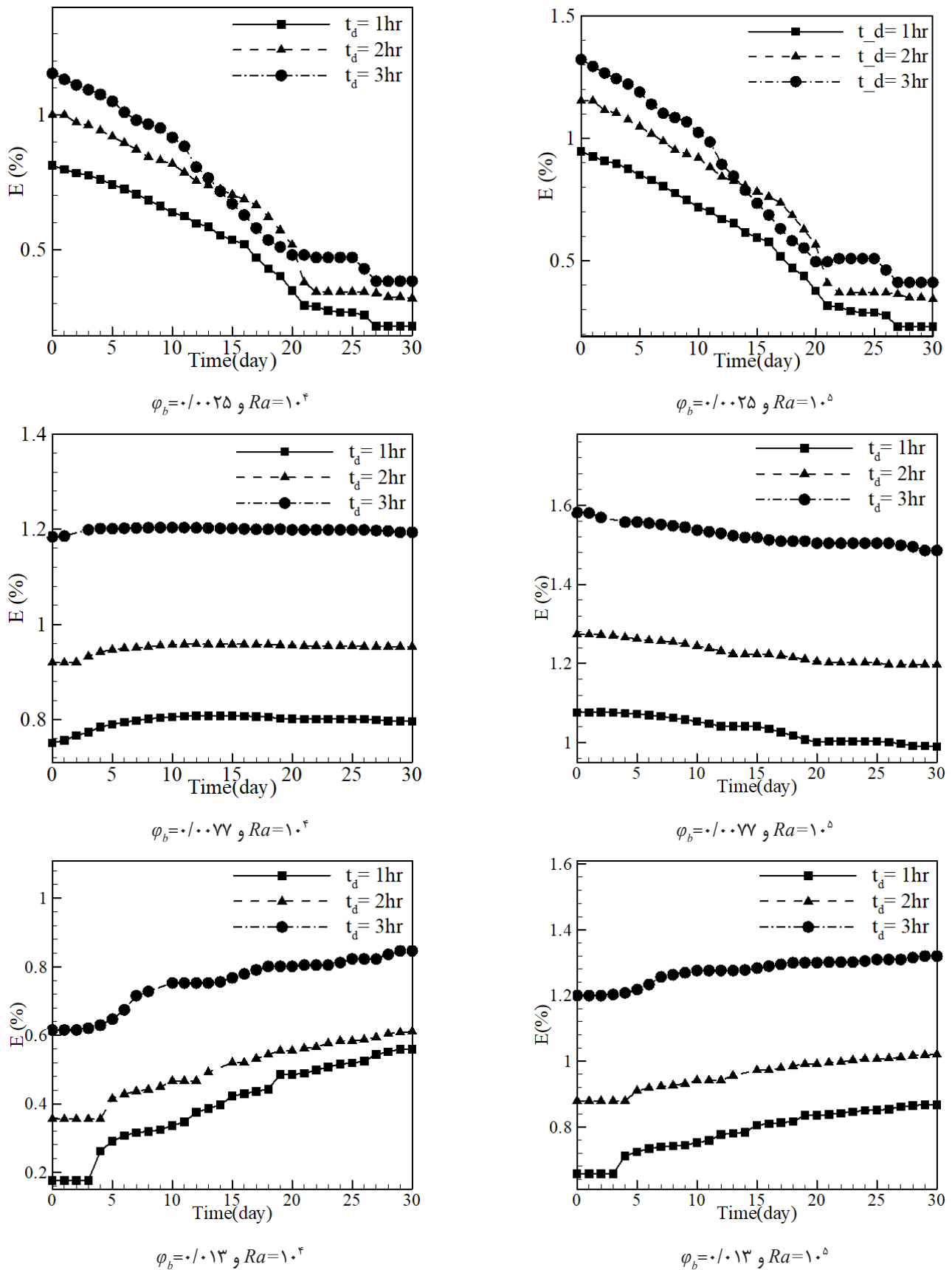


Fig. 6. The heat transfer enhancement (E) over a period of 30 days for different initial volume fraction of nanofluid, ultrasonic dispersion times, and $Ra=10^4, 10^5$.

شکل ۶: میزان بهبود انتقال حرارت (E) در یک بازه زمانی ۳۰ روزه با توجه کسر حجمی اولیه نانوذرات (ϕ_b)، مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت (t_d) و عدد رایلی $10^4, 10^5$ و $Ra=10^4, 10^5$

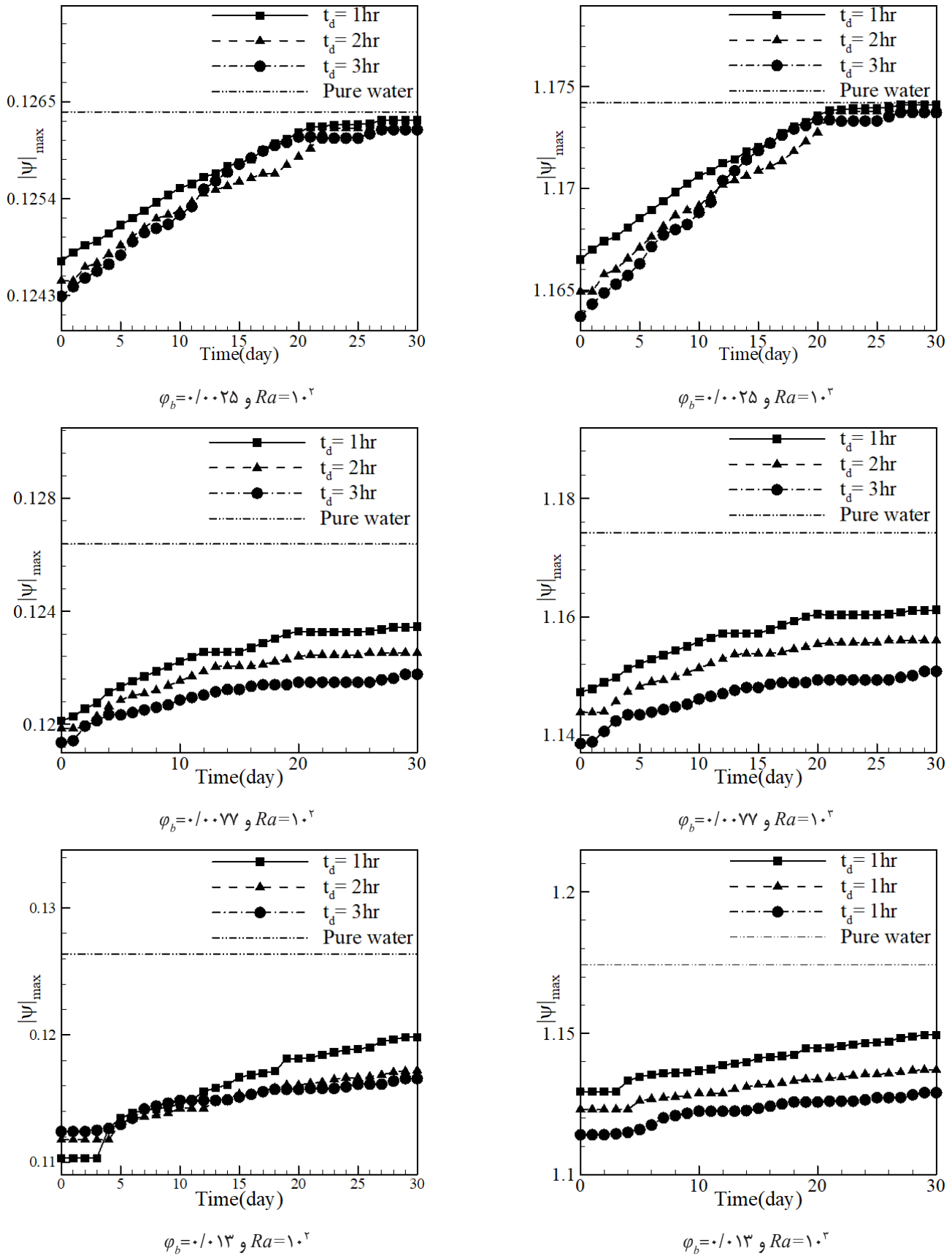


Fig. 7. The maximum stream function over a period of 30 days for different initial volume fraction of nanofluid, ultrasonic dispersion times, and $Ra=10^2, 10^3$.

شکل ۷: بیشینه تابع جریان در یک بازه زمانی ۳۰ روزه با توجه کسر حجمی اولیه نانوذرات (ϕ_b)، مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت (t_d) و عدد رابلی $Ra=10^2, 10^3$

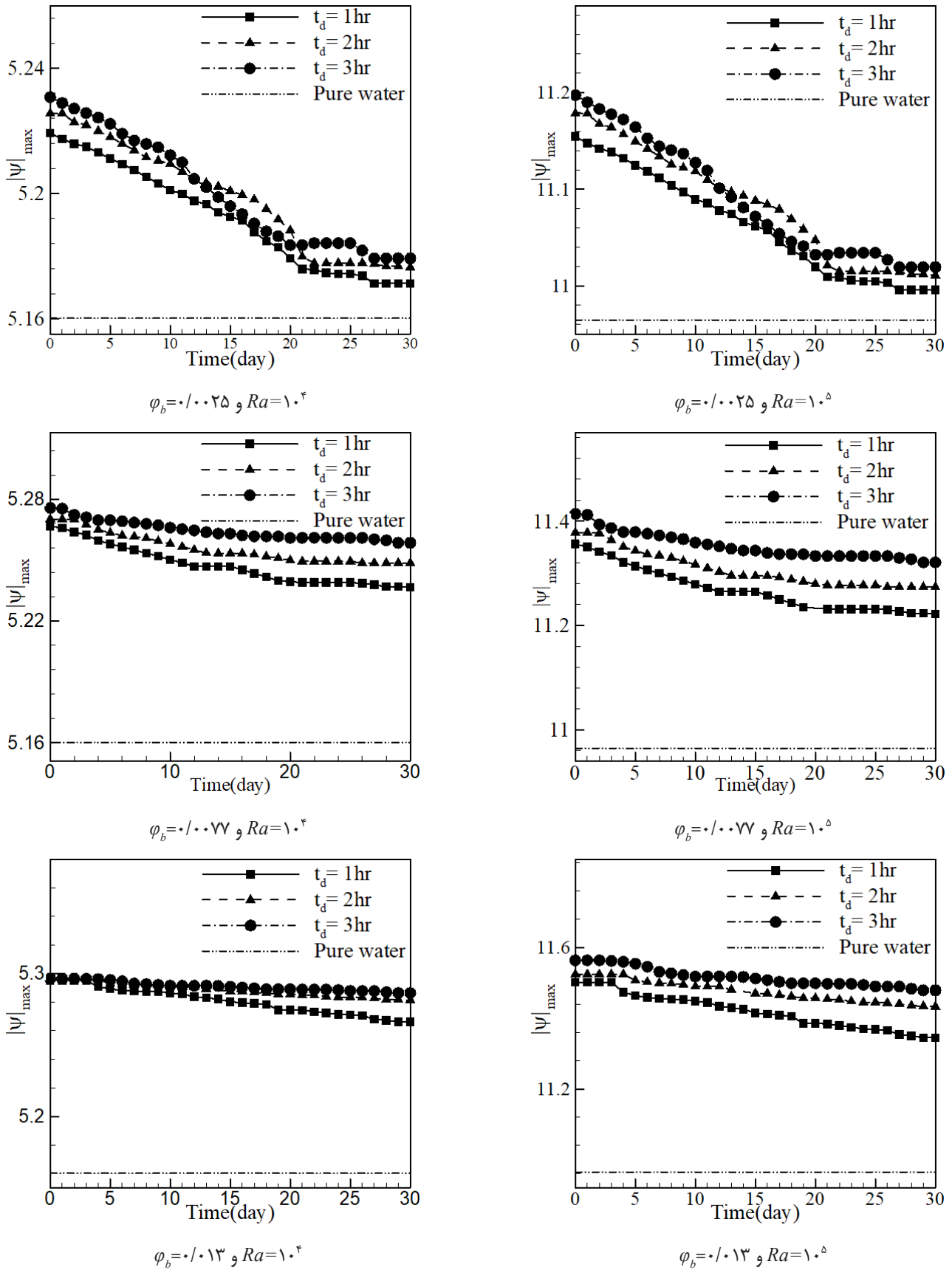


Fig. 8. The maximum stream function over a period of 30 days for different initial volume fraction of nanofluid, ultrasonic dispersion times, and $Ra=10^4, 10^5$.

شکل ۸: بیشینه تابع جریان در یک بازه زمانی ۳۰ روزه با توجه کسر حجمی اولیه نانوذرات (ϕ_b)، مدت زمان قرارگیری در دستگاه امواج فراصوت (t_d) و عدد رایلی $Ra=10^4, 10^5$

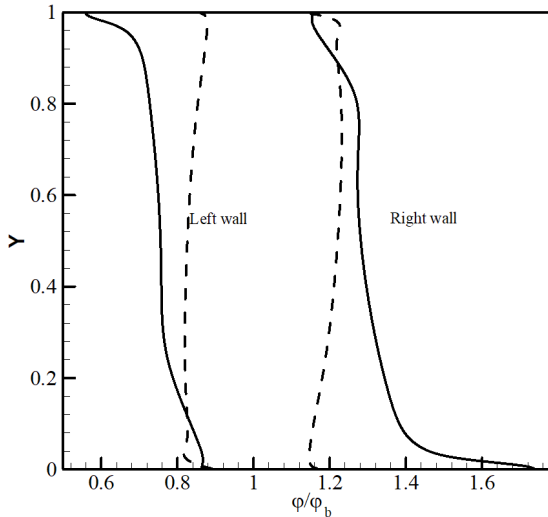


Fig. 10. Distribution of volume fraction of nanoparticles near the side walls with considering sedimentation velocity for $t_d=1$ hr and $\phi_b=0.013$, $Ra=10^2$ (—), and $Ra=10^5$ (---).

شکل ۱۰: توزیع کسر حجمی نانوذرات روی دیواره‌های سرد و گرم محفظه در حالت پایا با لحاظ مدل ته‌نشینی و در $Ra=10^2$ (—) و $Ra=10^5$ (---) به ازای $t_d=1$ hr، $\phi_b=0.013$

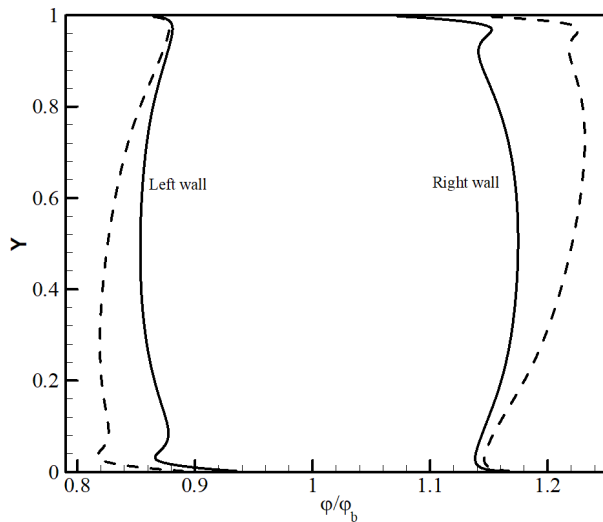


Fig. 11. Distribution of volume fraction of nanoparticles near the side walls for $t_d=1$ hr, $\phi_b=0.013$, and $Ra=10^5$, without the sedimentation velocity (—), and with the sedimentation velocity (---).

شکل ۱۱: توزیع کسر حجمی نانوذرات روی دیواره‌های سرد و گرم محفظه در حالت پایا بدون لحاظ مدل ته‌نشینی (—) و با لحاظ مدل ته‌نشینی (---) به ازای $t_d=1$ hr، $\phi_b=0.013$ و $Ra=10^5$

اثر مدت زمان قرارگیری نانوسیال تحت امواج فراصوت بر نحوه توزیع ذرات روی دیواره‌های سرد و گرم محفظه، در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش زمان t_d در یک کسر حجمی ثابت منجر به کاهش قطر نانوذرات موجود در محلول می‌شود. این عامل نیز باعث کاهش ضخامت لایه مرزی جرمی روی دیواره‌ها، توزیع همگون‌تر نانوذرات و بهبود انتقال حرارت می‌شود. در شکل ۱۰ نیز تأثیر عدد رایلی بر لایه مرزی جرمی روی دیواره‌های سرد و گرم نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است با افزایش عدد رایلی ضخامت لایه مرزی جرمی کاهش یافته و مسئله به توزیع همگن نزدیک‌تر می‌شود، به طوری که در حالت پایا و اعداد رایلی‌های بالا عدم لحاظ مدل‌های انتقال نانوذرات، تقریب قابل قبولی می‌باشد.

در شکل ۱۱ توزیع کسر حجمی نانوذرات در اطراف دیواره‌های گرم و سرد با لحاظ کردن سرعت ته‌نشینی نانوذرات و بدون آن نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است با لحاظ کردن سرعت ته‌نشینی نانوذرات، گرادیان کسر حجمی نانوذرات بین دیواره‌های سرد و گرم افزایش یافته و ضخامت لایه‌مرزی جرمی روی این دیواره‌ها افزایش می‌یابد. علت آن نیز کاهش مقدار بیشینه تابع جریان با لحاظ کردن سرعت ته‌نشینی نانوذرات می‌باشد.

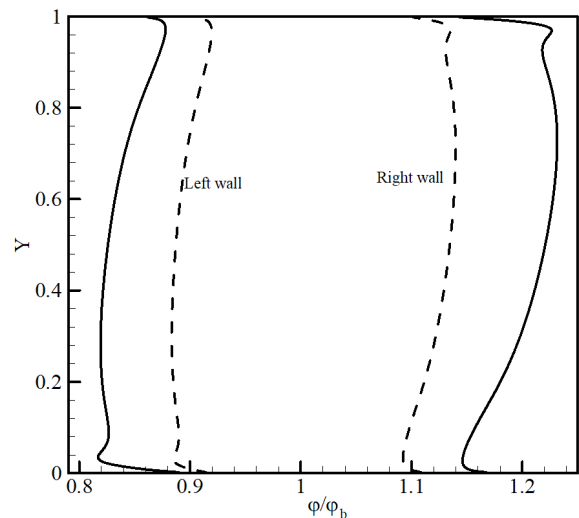


Fig. 9. Distribution of volume fraction of nanoparticles near the side walls for $Ra=10^5$ and $\phi_b=0.013$, $t_d=1$ hr (—), and $t_d=3$ hr (---).

شکل ۹: توزیع کسر حجمی نانوذرات روی دیواره‌های سرد و گرم محفظه در حالت پایا و در $t_d=1$ hr (—) و $t_d=3$ hr (---) به ازای $Ra=10^5$ ، $\phi_b=0.013$

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله میدان جریان، انتقال حرارت و توزیع ذرات نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم داخل محفظه‌ای مربعی به روش حجم محدود و با استفاده از الگوریتم سیمپلر در یک بازه زمانی ۳۰ روزه با استفاده از الگوهای تجربی

برای ته‌نشینی نانوذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نمودارهای نسبت بهبود انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه و بیشینه تابع جریان برحسب زمان رسم گردیده است. بر اساس نتایج به دست آمده، موارد زیر قابل ذکر است:

۱. بر اساس الگوهای ته‌نشینی در نظر گرفته شده، مقادیر عدد ناسلت متوسط مربوط به یک ساعت قرارگیری تحت امواج فراصوت

علائم یونانی		اختلاف قابل ملاحظه‌ای با دو یا سه ساعت قرارگیری تحت امواج فراصوت دارد. لذا در مرحله آماده‌سازی، نانوسیال بایستی حداقل دو ساعت تحت امواج فراصوت قرار گیرد.
α ضریب پخش گرما (m^2/s)		۲. مقدار ضریب بهبود در اعداد رایلی 10^2 و 10^3 بیشتر از اعداد رایلی 10^4 و 10^5 می‌باشد. لذا هر چه عدد رایلی کمتر باشد، استفاده از نانوسیال بیشتر توصیه می‌شود.
β ضریب انبساط گرمایی (K^{-1})		۳. در محدوده زمانی مورد بررسی، ته‌نشینی نانوذرات در اعداد رایلی 10^2 و 10^3 باعث کاهش عدد ناسلت متوسط و افزایش بیشینه تابع جریان می‌شود. اما در عدد رایلی 10^5 عدد ناسلت افزایش یافته و بیشینه تابع جریان کاهش می‌یابد. لذا در اعداد رایلی کم، اهمیت پایداری نانوسیال بیشتر است.
φ کسر حجمی نانوذرات		۴. در اعداد رایلی پایین ضریب بهبود مربوط به کسر حجمی $\varphi_b = 0.13$ با سه ساعت قرارگیری تحت امواج فراصوت و در اعداد رایلی بالا $\varphi_b = 0.77$ با سه ساعت قرارگیری تحت امواج فراصوت بیشترین مقدار را دارند.
μ ویسکوزیته دینامیکی ($N.m/s$)		۵. افزایش عدد رایلی باعث توزیع همگون‌تر نانوذرات با افزایش زمان می‌شود. لذا استفاده از مدل همگن در اعداد رایلی بالا مناسب می‌باشد.
ρ چگالی (kg/m^3)		۶. در نظر گرفتن سرعت ته‌نشینی نانوذرات باعث افزایش گرادیان غلظت در نزدیکی دیواره‌های سرد و گرم می‌شود.
ψ تابع جریان جرمی بابت بعد		
Ψ تابع جریان جرمی بی‌بعد		
زیرنویس‌ها		
0 دمای مرجع		
B اولیه		
C سرد		
d پخش نانو ذرات		
f سیال پایه		
H گرم		
i لحظه‌ای		
nf نانوسیال		
p ذرات		

فهرست علائم

c_p گرمای ویژه در فشار ثابت ($J/kg.K$)	
d_p قطر نانوذرات (nm)	
D_B ضریب پخش براونی (m^2/s)	
D_T ضریب پخش ترموفورسیس ($m^2/s.K$)	
g شتاب گرانش ($m.s^{-2}$)	
k ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)	
L عرض و ارتفاع محفظه (m)	
Nu عدد ناسلت	
P فشار (Pa)	
Ra عدد رایلی	
t زمان (sec)	
T دمای با بعد (K)	
u, v مولفه‌های سرعت در جهت‌های x و y	
U, V مولفه‌های سرعت بی‌بعد	
x, y مختصات با بعد (m)	
X, Y مختصات بی‌بعد	

منابع

- [1] K. Khanafer, K. Vafai, M. Lightstone, Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids, *International journal of heat and mass transfer*, 46(19) (2003) 3639-3653.
- [2] N. Putra, W. Roetzel, S.K. Das, Natural convection of nano-fluids, *Heat and Mass Transfer*, 39(8-9) (2003) 775-784.
- [3] D. Wen, Y. Ding, Natural convective heat transfer of suspensions of titanium dioxide nanoparticles (nanofluids), *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 5(3) (2006) 220-227.
- [4] E. Abu-Nada, Z. Masoud, A. Hijazi, Natural convection heat transfer enhancement in horizontal concentric annuli using nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(5) (2008) 657-665.
- [5] E. Abu-Nada, Z. Masoud, H.F. Oztop, A. Campo, Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(3) (2010) 479-491.
- [6] M. Ali, O. Zeitoun, S. Almotairi, Natural convection heat transfer inside vertical circular enclosure filled with water-based Al₂O₃ nanofluids, *International Journal of*

- Bénard convection of Al₂O₃/water nanofluids in a cavity considering sedimentation, thermophoresis, and Brownian motion, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57 (2014) 22-26.
- [17] C. Ho, D.-S. Chen, W.-M. Yan, O. Mahian, Buoyancy-driven flow of nanofluids in a cavity considering the Ludwig–Soret effect and sedimentation: Numerical study and experimental validation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77 (2014) 684-694.
- [18] H. Rehman, M. Batmunkh, H. Jeong, H. Chung, Sedimentation study and dispersion behavior of Al₂O₃–H₂O nanofluids with dependence of time, *Advanced Science Letters*, 6(1) (2012) 96-100.
- [19] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Introduction to Heat Transfer*, Jone Willy & Sons, Inc., New York, (1985).
- [20] H.M. Elshehabe, S.E. Ahmed, MHD mixed convection in a lid-driven cavity filled by a nanofluid with sinusoidal temperature distribution on the both vertical walls using Buongiorno’s nanofluid model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 88 (2015) 181-202.
- [21] G. McNab, A. Meisen, Thermophoresis in liquids, *Journal of Colloid and Interface Science*, 44(2) (1973) 339-346.
- [22] M. Corcione, Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids, *Energy Conversion and Management*, 52(1) (2011) 789-793.
- [23] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, C. Lin, Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study, *International Journal of Thermal Sciences*, 49(8) (2010) 1345-1353.
- [24] S. Patankar, *Numerical heat transfer and fluid flow*, CRC press, 1980.
- [25] M. Mollamahdi, *Numerical study of sedimentation effect on flow field and heat transfer of water-Al₂O₃ nanofluid in a cavity* (MSc dissertation), Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, (2015). (in persian)
- Thermal Sciences*, 63 (2013) 115-124.
- [7] Y. Hu, Y. He, C. Qi, B. Jiang, H.I. Schlaberg, Experimental and numerical study of natural convection in a square enclosure filled with nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 78 (2014) 380-392.
- [8] J. Koo, C. Kleinstreuer, Impact analysis of nanoparticle motion mechanisms on the thermal conductivity of nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(9) (2005) 1111-11118.
- [9] J. Buongiorno, Convective transport in nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 128(3) (2006) 240-250.
- [10] H.A. Pakravan, M. Yaghoubi, Combined thermophoresis, Brownian motion and Dufour effects on natural convection of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 50(3) (2011) 394-402.
- [11] H.A. Pakravan, M. Yaghoubi, Analysis of nanoparticles migration on natural convective heat transfer of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 68 (2013) 79-93.
- [12] G.A. Sheikhzadeh, M. Dastmalchi, H. Khorasanizadeh, Effects of nanoparticles transport mechanisms on Al₂O₃–water nanofluid natural convection in a square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, 66 (2013) 51-62.
- [13] F. Garoosi, S. Garoosi, K. Hooman, Numerical simulation of natural convection and mixed convection of the nanofluid in a square cavity using Buongiorno model, *Powder Technology*, 268 (2014) 279-292.
- [14] M. Eslamian, M. Ahmed, M. El-Dosoky, M. Saghir, Effect of thermophoresis on natural convection in a Rayleigh–Benard cell filled with a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 (2015) 142-156.
- [15] M. Dastmalchi, G. Sheikhzadeh, A.A. Arani, Double-diffusive natural convective in a porous square enclosure filled with nanofluid, *International Journal of Thermal Sciences*, 95 (2015) 88-98.
- [16] C. Ho, D.-S. Chen, W.-M. Yan, O. Mahian, Rayleigh–

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Gh. A. Sheikhzadeh and M. Mollamahdi, “Effects of Sedimentation of Nanoparticles on Flow, Heat and Mass Transfer of Al₂O₃-water Nanofluid in a Cavity” *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(3) (2017) 581-594.
DOI: 10.22060/mej.2016.745

