

بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی آمیخته نانو سیال با خواص متغیر داخل حفره مستطیلی کم‌عمق با درپوش متحرک

شیرین میرفروغی^۱ و داود طغرایبی^{۲*}

چکیده	اطلاعات مقاله
در مطالعه حاضر، شبیه‌سازی انتقال حرارت آمیخته نانو سیال آب اکسید آلومینیوم در جریان آرام داخل یک حفره مستطیلی کم‌عمق به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. خواص ترموفیزیکی نانو سیالات به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شده‌اند. شبیه‌سازی شامل شبیه‌سازی جریان دو بعدی، آرام، دائم، تراکم ناپذیر و نیوتنی است. برای اینکه تأثیر درصد حجمی نانو ذرات بر روی انتقال حرارت مشخص شود، مدل‌سازی‌ها برای چهار کسر حجمی از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴، اعداد ریچاردسون در بازه ۰/۱ تا ۴/۵، عدد گراشف ثابت 10^4 در محدوده جریان آرام و اختلاف دمای ۱۵ درجه (با در نظر گرفتن خواص ترموفیزیکی متغیر در دمای مرجع که دمای فیلم است) انجام شده‌اند. عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد هر چند با کاهش عدد ریچاردسون این افزایش محسوس‌تر است. انتقال حرارت و همچنین سرعت جریان نیز در نزدیکی مرزهای حفره در نانو سیالات با افزایش مقادیر مختلف کسر حجمی ذرات، افزایش می‌یابند.	دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۱۴ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۱۷
	واژگان کلیدی: نانوسیال، حفره کم عمق، انتقال حرارت آمیخته، خواص متغیر، حل عددی.

۱-مقدمه

عددی برای جابه‌جایی آمیخته نانو سیال، در یک محفظه با دیواره بالایی متحرک و سرد، دیواره‌های جانبی سرد و دیواره پایینی که در آن شار گرمایی ثابتی اعمال می‌شود، انجام دادند. بر اساس یافته‌های آنان با افزایش کسر حجمی نانو ذرات حرکت جریان سیال کند می‌شود، ولی ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. قاسمی و امین‌الساداتی [۴] جابه‌جایی انتقال حرارت آمیخته نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم را یک در محفظه مثلثی قائم‌الزاویه که دیواره افقی آن عایق، دیواره عمودی آن سرد و متحرک در جهت‌های بالا یا پایین، و دیواره‌ی مایل آن گرم بود، بررسی کردند. بر اساس گزارش‌های آنان در تمام محدوده عدد ریچاردسون مورد بررسی با افزایش کسر حجمی نانو ذرات و با حرکت دیواره قائم در هر دو جهت بالا یا پایین افزایش

سیال‌های مورد استفاده در انتقال حرارت دارای ضریب هدایت حرارتی کمی می‌باشند، لذا استفاده از روش مناسب جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌تواند در بهبود انتقال حرارت جابجایی طبیعی موثر باشد. با مطرح شدن نانوسیال‌ها که اغلب توام از اکسید نانو ذرات فلزی با سیالات پایه‌ای مثل آب، روغن و اتیلن گلیکول می‌باشند، دستیابی به این منظور میسر شده است [۱]. قبل از معرفی نانوسیال‌ها، استفاده از ذرات در ابعاد میکرومتر و میکرومتر که منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال می‌شود مورد استفاده قرار گرفته بود. ولی مشکلاتی چون پایداری ضعیف، افت فشار بالا و غیره، باعث شد استفاده از این شیوه چندان عملی نباشد [۲]. منصور و همکاران [۳] مطالعه‌ای

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Toghraee@iaukhsh.ac.ir

۱. کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران
۲. دانشیار، گروه مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

وانگ و همکاران [۱۰] به بررسی افزایش انتقال حرارت نانو سیال آب-اکسید مس با خواص متغیر، داخل حفره با درپوش متحرک پرداختند. آنها پس از مقایسه مدل براونی و مدل خواص ثابت نشان دادند که وقتی خواص نانو سیال با دما متغیر باشد تأثیر کسر حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت، در همه اعداد ریچاردسون بیشتر و پراهمیت تر است.

لطفی و همکاران [۱۱] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانو سیال با دو مدل تک فازی و دوفازی در جریان آرام و مغشوش را به صورت عددی مطالعه کردند. آنها نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را داخل یک لوله افقی عبور دادند و نتایج را با روابط موجود مقایسه و اعتبار سنجی کردند. با مقایسه نتایج آزمایشگاهی و مدل‌ها مشخص شد که مدل مخلوط دقیق تر است. هر دو مدل عدد ناسلت را کم تخمین می‌زنند. نتایج آنها نشان داد که نرخ بهبود حرارت با افزایش کسر حجمی نانو ذرات کاهش می‌یابد.

گروسی و همکاران [۱۲] به حل عددی انتقال حرارت آمیخته نانو سیال داخل حفره با سرپوش و با دو مبدل سرمایشی و گرمایشی به عنوان مبدل‌های حرارتی داخل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین انتقال حرارت برای هر عدد ریچاردسون در کسر حجمی بیشتر اتفاق می‌افتد و تغییر جهت این دو مبدل از حالت افقی به عمودی باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شود. همچنین نتایج آنها نشان داد که در صورت کاهش عدد ریچاردسون پخش ذرات جامد غیریکنواخت و پراکنده است.

کفایتی [۱۳] شبیه‌سازی انتقال حرارت آمیخته از سرپوش مربعی شکل حفره‌ای را بررسی کرد. وی نشان داد که افزایش عدد ریچاردسون باعث کاهش انتقال حرارت است، در حالی که افت توان با اعداد ریچاردسون متفاوت، عامل کاهش انتقال حرارت است. همچنین تأثیر میدان مغناطیسی بر ذرات نانو عامل کاهش انتقال حرارت است. فتوکیان و همکاران [۱۴] به بررسی تجربی انتقال حرارت و افت فشار جریان جابجایی اجباری مغشوش نانو سیال‌های آب-اکسید آلومینیوم و آب-اکسید مس در یک لوله دایره‌ای پرداختند. آنها نشان دادند که با اضافه کردن مقدار کمی از نانو ذرات به سیال پایه به طور چشم‌گیری انتقال حرارت بهبود می‌یابد. همچنین آنها گزارش کردند که افت فشار برای نانو سیال بسیار بیشتر از سیال پایه است. با یک بررسی نسبتاً جامع در مراجع [۱۵-۱۷] مشاهده

انتقال گرما رخ می‌دهد. شیخزاده و همکاران [۵] انتقال حرارت و جریان سیال جابجایی آمیخته نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم را در یک محفظه مربعی که دیواره بالایی آن متحرک، دیواره‌های افقی عایق و دیواره‌های قائم آن دارای دمای ثابت سرد و گرم به ترتیب در طرف راست و چپ بودند، به صورت عددی و با روش حجم محدود بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها در نظر گرفتن خواص متغیر برای ضریب هدایت حرارتی و لزجت سیال، عدد ناسلت متوسط متفاوتی نسبت به خواص ثابت را منتج می‌شود. به علاوه آنها گزارش کردند که این اختلاف در اعداد ریچاردسون کم (مثل ۰/۱ و ۰/۱) بیشتر از اعداد ریچاردسون بالا (مثل ۱۰ و ۱۰۰) می‌باشد. خانافر و وفایی [۶] بر روی انتقال حرارت آمیخته نانو سیال با استفاده از مدل دو فازی در حفره کم عمق تحقیق کردند. آنها با استفاده از داده‌های تجربی معادله چگالی نانو سیال آب و اکسید آلومینیوم را به دست آوردند. این معادله تابعی از دما بود و برای کسر حجمی محدود ارائه شده بود.

هو و همکاران [۷] طبق یک مطالعه عددی در زمینه انتقال حرارت طبیعی و آمیخته در نانو سیال (آب- Al_2O_3) در چاه مربعی شکل نشان دادند برای عدد ریچاردسون و رایلی مشخص برای حداکثر انتقال حرارت، کسر حجمی بهینه‌ای به دست می‌آید و در انتقال حرارت آزاد و آمیخته کاهش عدد رایلی و افزایش ریچاردسون عامل پخش یکنواخت نانو ذرات است، در حالی که افزایش عدد رایلی و کاهش عدد ریچاردسون پخش ذرات نانو سیال را غیر یکنواخت می‌کند. چمخا و ابونادا [۸] انتقال حرارت و جریان سیال جابجایی آمیخته، در یک محفظه مربعی با دیواره‌های جانبی عایق، دیواره بالایی گرم و دیواره پایینی سرد را در دو حالت بررسی کردند. در حالت اول فقط دیواره افقی بالایی متحرک و در حالت دوم، دیواره‌های افقی بالایی و پایینی در خلاف جهت هم حرکت دارند. بر اساس نتایج آنها با افزایش کسر حجمی و کاهش عدد ریچاردسون عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. عباسیان و همکاران [۹] انتقال حرارت و جریان سیال جابجایی توأم نانو سیال آب-مس را در یک محفظه مربعی که دیواره‌های افقی آن عایق و دیواره‌های جانبی آن دارای تغییرات دمایی سینوسی بودند، بررسی کردند. بر اساس نتایج آنها با افزایش اختلاف فاز، در عدد ریچاردسون و کسر حجمی ثابت عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

مومنتم در راستای x (۲) و y (۳)، و بقای انرژی (۴) برای جریان دو بعدی، دائم و آرام عبارتند از:

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

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

$$\rho_{nf} \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + (\rho\beta)_{nf}g(T - T_c) \quad (3)$$

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

خواص متغیر با دما و کسر حجمی نانوسیال [۶ و ۷] شامل چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب هدایت گرمایی، لزجت استاتیک و ، به ترتیب از روابط (۵) تا (۲۱) به دست می‌آیند:

$$\rho_{nf} = 1001.064 + 2738.6191\phi - 0.2095T \quad (5)$$

این معادله برای کسر حجمی در محدوده ۰ تا ۰/۰۴ و دمای حدود ۵°C تا ۴۰°C ارائه شده است.

$$(C_p)_{nf} = \frac{(1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p}{(1 - \phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_p} \quad (6)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \quad (7)$$

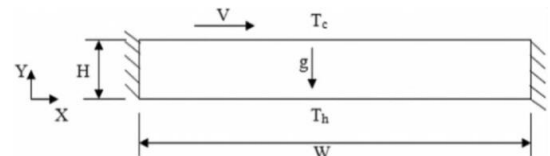
$$4.4Re^{0.4}Pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}} \right)^{10} \left(\frac{k_p}{k_f} \right)^{0.03} \phi^{0.66}$$

که :

می‌شود که تاکنون مطالعات چندانی در تلفیق همزمان شرایطی مثل جابه‌جایی آمیخته و خواص متغیر نانوسیال در حفره کم عمق و درپوش متحرک انجام نشده است. در مطالعه حاضر جریان سیال و انتقال حرارت جابه‌جایی آمیخته با استفاده از معادلات خواص متغیر بدست آمده برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در حفره کم عمق با سطح مقطع مستطیل شکل، در اعداد ریچاردسون و کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در حالتی که ضلع بالایی حفره متحرک و با سرعت (V) حرکت می‌کند، بررسی می‌شود.

۲- معادلات حاکم و شرایط مرزی

هندسه‌ی حل و شرایط مرزی در شکل (۱) نشان داده شده است. ابعاد حفره مستطیل شکل برابر $H \times W$ با نسبت $\frac{H}{W} = 0.1$ است که محفظه با نانو سیال آب-اکسید آلومینیم پر شده است. بررسی‌ها برای انتقال حرارت آمیخته و اعداد ریچاردسون مختلف در کسر حجمی‌های مختلف نانو ذرات با استفاده از معادلات خواص متغیر برای جریان آرام نانو سیال آب-اکسید آلومینیم و سرعت‌های مختلف در پوش حفره انجام شده است. خواص ترموفیزیکی آب به عنوان سیال پایه، و نانو ذرات اکسید آلومینیم، در جدول ۱ ارائه شده است [۶ و ۷].



شکل ۱- شماتیک مسئله

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانو ذرات [۶ و ۷]

خواص ترموفیزیکی	آب	اکسید آلومینیم
β (K ⁻¹)	$2/1 \times 10^{-4}$	0.185×10^{-5}
k (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	۰/۶۱۳	۳۶
c_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹)	۴۱۷۹	۷۶۵
ρ (kgm ⁻³)	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
μ (kgm ⁻² s ⁻¹)	0.1855×10^{-3}	-

معادلات حاکم [۱۷-۱۸] شامل بقای جرم (۱)، بقای

عدد گراشف عددی بی‌بعد است که در انتقال حرارت و دینامیک سیالات نشان دهنده انتقال حرارت جابجایی آزاد است. عدد گراشف از نسبت نیروی شناوری به نیروی لزجت حاصل می‌شود. وقتی عدد گراشف خیلی بزرگتر از ۱ است، نیروهای لزج در مقابل نیروهای شناوری و اینرسی، ناچیز هستند. وقتی نیروهای شناوری به لزجت غالب باشند، جریان به سمت اغتشاش حرکت می‌کند. از این عدد برای مشخص کردن آرام یا مغشوش بودن جریان در انتقال حرارت جابجایی طبیعی استفاده می‌شود. لذا در اعداد گراشف بالا، لایه مرزی مغشوش و در اعداد گراشف پایین، لایه مرزی آرام است. در این رساله سرعت حرکت درپوش کم و جریان آرام است با توجه به پارامترهای وابسته در فرمول مثل هندسه، اختلاف دما، لزجت سینماتیکی و گرانش باید اندازه تمامی این پارامترها را به گونه‌ای انتخاب کرد که پس از جاگذاری در فرمول و محاسبه، عدد گراشف در محدوده جریان آرام باشد به این منظور اعداد مربوط به اختلاف دما و هندسه انقدر تغییر داده شده تا پس از محاسبه به محدوده جریان آرام برسیم و از رینولدزهای ۱۰۰ تا ۴۰۰ سرعت درپوش به دست بیاید.

در اعداد گراشف پایین، لایه مرزی آرام است. همچنین تغییرات دما با توجه به بازه دمایی که برای هریک از معادلات خواص متغیر مشخص شده به نحوی انتخاب شده است که علاوه بر اینکه در این معادلات صدق می‌کند در فرمول گراشف نیز جریان را در حالت آرام نگه می‌دارد، همچنین تغییرات دما با توجه به بازه دمایی که برای هریک از معادلات خواص متغیر مشخص شده به نحوی انتخاب شده است که علاوه بر اینکه در این معادلات صدق میکند در جاگذاری در فرمول گراشف نیز جریان را در حالت آرام نگه می‌دارد، بنابراین با اعمال تغییرات دما به اندازه ۱۵ درجه سانتی‌گراد در حالی که هندسه حفره نیز ثابت است کمترین تغییر در اندازه پارامترهای معادله گراشف، مسأله را از حالت آرام خارج می‌کند. به همین دلیل در کلیه شبیه‌سازی‌ها عدد گراشف برابر ۱۰^۴ محاسبه و ثابت در نظر گرفته شده است.

$$Gr = \frac{g\beta\Delta Tw^3}{\nu^2} \quad (17)$$

$$Re = \frac{2\rho_f k_B T}{\pi\mu_f^2 d_p} \quad (8)$$

$$Pr = \frac{\mu_f}{\rho_f \alpha_f} \quad (9)$$

که چگالی جرمی سیال پایه در دمای $T_{fr}=293 \text{ K}$ ، k_B ثابت بولتزمن $1/38.07 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$ و k_B و قطر نانو ذرات اکسید آلومینیوم و برابر با ۳۳ نانومتر است.

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_f} = \frac{1}{1 - 34.87 \left(\frac{d_p}{d_f}\right)^{-0.3} \phi^{1.03}} \quad (10)$$

که :

$$d_f = 0.1 \left(\frac{6M}{N\rho_{f0}}\right) \quad (11)$$

که M وزن ملکولی سیال پایه، N عدد آووگادرو و برابر $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ و چگالی جرمی سیال پایه است. لزجت سیال پایه (آب)، متغیر با دما فرض می‌شود و از برازش منحنی بر داده‌های تجربی مطابق معادله زیر به دست می‌آید،

$$\mu_f = 562.77 (\ln(T/62.756))^{-8.9137} \quad (12)$$

مدل کورشیونه [۱۹] برای لزجت در محدوده وسیعی از نانو ذرات شامل اکسید آلومینیوم، اکسید سیلیسیم، اکسید تیتانیوم و مس، سیالات پایه شامل آب و اتیلن گلیکول، پروپیلن گلیکول و اتانول، قطر نانو ذرات در محدوده ۲۵ تا ۲۰۰ nm، کسر حجمی در محدوده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۷۱ و دما در محدوده ۲۹۳ K تا ۳۳۳ K ارائه شده است. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، عبارت است از:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (13)$$

عدد ناسلت که طول مشخصه آن بر اساس ارتفاع محفظه سنجیده می‌شود عبارت است از:

$$Nu = \frac{h_{nf} L}{k_f} \quad (14)$$

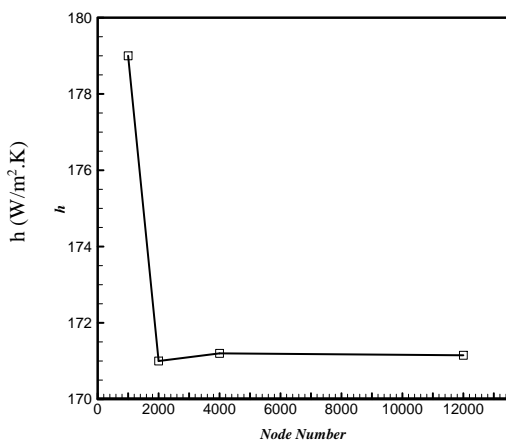
شار حرارتی دیواره‌ها بر واحد سطح عبارت است از:

$$q = -k_{nf} \frac{T_h - T_c}{L} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (15)$$

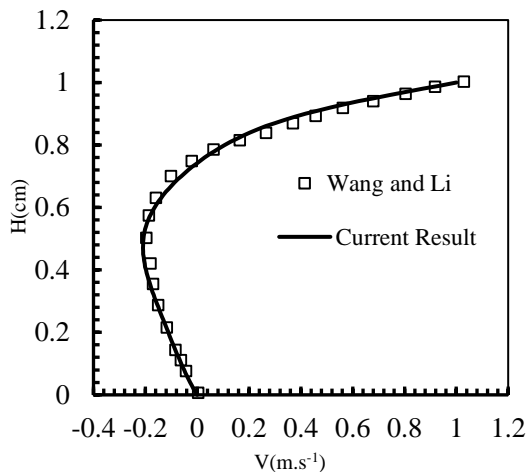
با قرار دادن رابطه‌های (۱۵) و (۱۷) در رابطه‌ی (۱۶) عدد ناسلت به صورت زیر به دست می‌آید.

$$Nu = - \left(\frac{k_{nf}}{k_f}\right) \frac{\partial \theta}{\partial Y} \Big|_{Y=0} \quad (16)$$

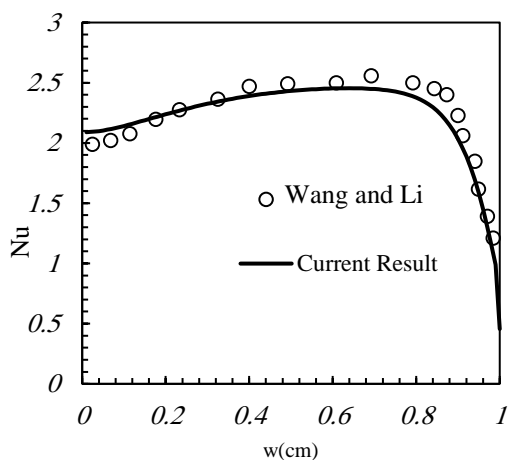
مقادیر سرعت بسیار ناچیز هستند و لذا از صحت نتایج مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل می‌شود. این نتایج در شکل (۳) و (۴) ارائه شده‌اند.



شکل ۲- نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط روی دیوار گرم برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم در $Ri = 0.1$ ، $\phi =$



شکل ۳- اعتبارسنجی روند حل عددی پروفیل سرعت بی بعد در مقطع میانی حفره با مرجع [۱۰]



شکل ۴- اعتبارسنجی روند حل عددی توزیع عدد ناسلت بر روی دیواره گرم با مرجع [۱۰]

که g شتاب جاذبه، ν لزجت سینماتیکی، ΔT اختلاف دما، W طول مشخصه مسئله و β ضریب انبساط حرارتی است.

عدد ریچاردسون نیز بیانگر اهمیت جابجایی طبیعی نسبت به جابجایی اجباری برای یک سیال است. ضریب انتقال حرارت جابجایی اجباری تابعی از عدد رینولدز و در جابجایی طبیعی تابعی از عدد گراشف است. در جابجایی آمیخته عدد ریچاردسون معرف میزان تأثیرگذاری جابجایی طبیعی به جابجایی اجباری است. بر پایه مقدار عدد بی بعد ریچاردسون مسائل مربوط به جابجایی به سه گونه تقسیم می‌شود: (۱) جابجایی طبیعی برای $Ri \gg 1$ ، (۲) جابجایی آمیخته برای $10 \leq Ri \leq 100$ و (۳) جابجایی اجباری برای $Ri \ll 1$. تاکنون تحقیقات بسیاری از سوی پژوهشگران در مورد انتقال حرارت جابجایی ترکیبی در شکل‌ها و هندسه‌های مختلف به‌ویژه محفظه‌های با دیواره متحرک به دلیل کاربردهای دامنه‌دار صنعتی، با شرایط مرزی گوناگون صورت گرفته است.

$$Ri = \frac{Gr}{Re^2} \quad (18)$$

۳- شبیه‌سازی عددی

معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به صورت عددی حل می‌شوند. ابتدا شبکه‌ای یکنواخت و مناسب بر میدان حل منطبق می‌شود و سپس حول هر گره، حجم کنترلی ایجاد می‌شود و از معادلات حاکم روی هر حجم کنترلی انتگرال‌گیری شده و معادلات منفصل شده و دستگاهی از معادلات جبری به دست می‌آید.

۳-۱- استقلال نتایج از شبکه

به منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیم برای شبکه با تعداد نقاط مختلف به دست آمده و در شکل (۲) مقایسه شده‌اند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد نقاط 20×20 مناسب است.

۳-۲- اعتبارسنجی برنامه

به منظور اعتبارسنجی نتایج کامپیوتری به دست آمده، شبیه‌سازی عددی برای حالت جابه‌جایی آمیخته انجام و نتایج حاصل از آن با نتایج ارائه شده در تحقیقات وانگ و همکاران [۱۰] مقایسه می‌شود.

چنانچه مشاهده می‌شود، تفاوت نسبی مقادیر ناسلت و

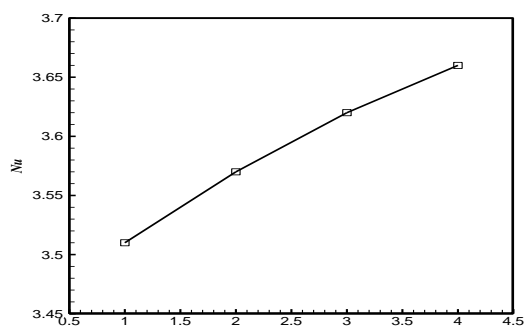
۴- نتایج و بحث

از مهم‌ترین پارامترهای انتقال حرارت آمیخته کسر حجمی نانو ذرات، اعداد رینولدز و ریچاردسون هستند که تأثیرات بسیاری بر افزایش یا کاهش انتقال حرارت دارند.

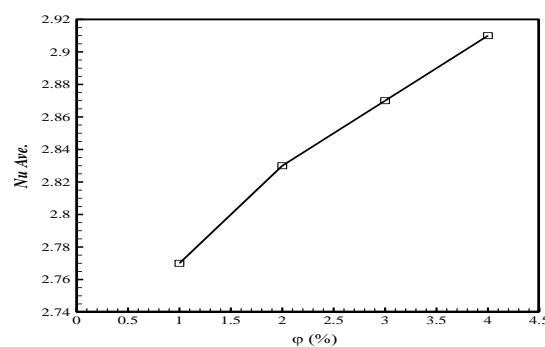
۴-۱- تأثیر کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در عدد رینولدز ثابت

بنابر توضیحات شرایط مرزی حفره مورد نظر، دیواره بالایی به صورت درپوش متحرک با سرعت ثابت در راستای محور افقی حرکت می‌کند. اعداد رینولدز متأثر از سرعت درپوش هستند و در محدوده جریان آرام قرار دارند. تأثیر کسر حجمی نانو ذرات بر افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز مختلف در شکل‌های (۵) قابل بررسی و مشاهده است. حفره وقتی که سرعت درپوش بیشتر می‌شود، مقادیر عدد ناسلت به ترتیب $3/62$ و $3/67$ هستند، یعنی در رینولدز 200 هم مانند عدد رینولدز 100 عدد ناسلت حدوداً 5 درصد افزایش یافته است. نمودارهای شکل (۴) افزایش عدد ناسلت را در جهت دسترسی و درک بهتر جزئیات رفتار نانو سیال داخل نمودارهای شکل (۴) برای هر یک از اعداد رینولدز رسم شده‌اند. در عدد رینولدز 100 با افزایش کسر حجمی از

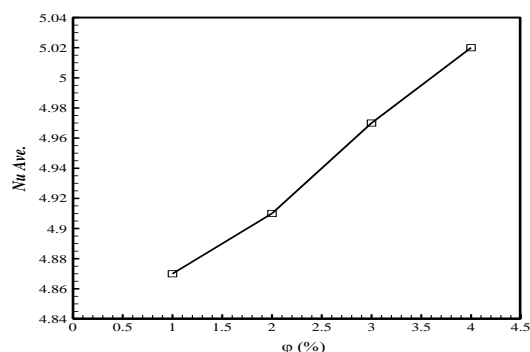
$0/01$ تا $0/02$ عدد ناسلت از $2/77$ به $2/83$ افزایش می‌یابد. در کسر حجمی‌های $0/03$ و $0/04$ نیز اعداد ناسلت از $2/88$ به $2/93$ می‌رسند. بنابراین عدد ناسلت در هر مرحله افزایش کسر حجمی حدود 5 درصد افزایش یافته است. در نمودار 5 در عدد رینولدز 200 با افزایش مقادیر کسر حجمی از $0/01$ تا $0/02$ عدد ناسلت از $3/51$ به $3/57$ و در کسر حجمی‌های $0/03$ و $0/04$ اعداد رینولدز 300 و 400 نشان می‌دهند. در این نمودارها نیز با افزایش $0/01$ در کسر حجمی‌ها، حدود اعداد ناسلت 5 درصد افزایش می‌یابند. در نتیجه اعداد ناسلت در عدد رینولدز 100 و کسر حجمی‌های مختلف تقریباً برابر $2/83$ ، در عدد رینولدز 200 عدد ناسلت $3/57$ ، در عدد رینولدز 300 عدد ناسلت به $4/3$ و در عدد رینولدز 400 عدد ناسلت به $4/9$ می‌رسند. بنابراین، همان‌طور که از نمودارها مشخص است افزایش عدد رینولدز موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود، این در حالی است که افزایش کسر حجمی هم بر افزایش ناسلت تأثیر مضاعف دارد. پس این دو متغیر یعنی عدد رینولدز و کسر حجمی نانو ذرات از عوامل افزایش انتقال حرارت هستند، به گونه‌ای که عدد رینولدز نسبت به کسر حجمی عامل مؤثرتری بر افزایش انتقال حرارت است.



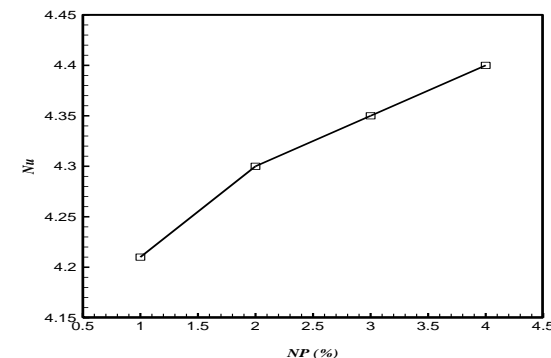
Re=200



Re=100



Re=400



Re=300

شکل ۵- تأثیر کسر حجمی نانو ذرات بر افزایش انتقال حرارت در اعداد رینولدز مختلف

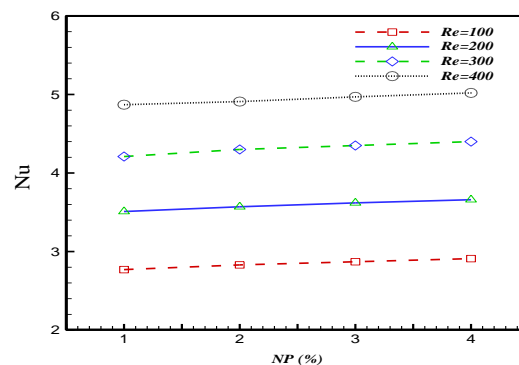
عدد ریچاردسون از پارامترهای تعیین کننده انتقال حرارت آمیخته است و نقش مهمی در انتقال حرارت سیالات دارد، بنابراین محاسبه مقادیر دقیقاً ریچاردسون و اثر آنها بر اعداد ناسلت علاوه بر تأثیر اعداد ریچاردسون بر انتقال حرارت خالی از لطف نیست. اعداد ریچاردسون در عدد گراش ثابت برابر 10^4 و اعداد ریچولدز برابر با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ در محدود جریان آرام محاسبه شده است. مقادیر به دست آمده در بازه انتقال حرارت آمیخته و برابر با $0/3$ ، $0/5$ ، $1/1$ و $4/5$ است. شکل (۷) بررسی روند تغییرات عدد ریچاردسون نسبت به عدد ناسلت به دست آمده از نرم افزار در مقادیر مختلف نانو ذرات اکسید آلومینیوم است.

بر اساس نمودارهای شکل (۷) مشاهده می شود که با افزایش اعداد ریچاردسون در محدوده انتقال حرارت آمیخته، انتقال حرارت روندی رو به کاهش دارد. همان طور که پیداست در این مورد افزایش کسر حجمی نانو ذرات تأثیر چشمگیری در روند کاهش اعداد ناسلت ندارد و در کسر حجمی های $0/1$ تا $0/4$ ، با افزایش اعداد ریچاردسون از مقادیر بین $0/1$ تا $4/5$ اعداد ناسلت از مقادیر نزدیک به ۵ تا حوالی ۳ کاهش می یابند. در واقع با افزایش عدد ریچاردسون و ثابت بودن عدد گراش در محدوده جریان آرام، مقدار اعداد ریچولدز، کاهش یافته و باعث کاهش اعداد ناسلت می شوند. بنابراین با کاهش سرعت درپوش حفره تأثیر انتقال حرارت اجباری کمتر شده و انتقال حرارت کل کاهش می یابد. در حالی که با افزایش عدد ریچاردسون انتقال حرارت بیشتر تحت تأثیر انتقال حرارت جابجایی طبیعی است.

۴-۳- نمودار عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم در اعداد ریچاردسون مختلف
در این بخش به بررسی ارتباط بین کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و انتقال حرارت نانو سیال داخل حفره در اعداد ریچاردسون مختلف که در شرایط مورد نظر مسئله به دست آمده اند، پرداخته شده و نتیجه به صورت نمودارهای شکل (۸) نمایش داده شده است.

در این مورد به نمودار تلفیقی اکتفا شده است و از آوردن تک تک نمودارها برای هر یک از اعداد ریچاردسون، صرف نظر شده است. در شکل (۸) نمودار عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف رسم شده است.

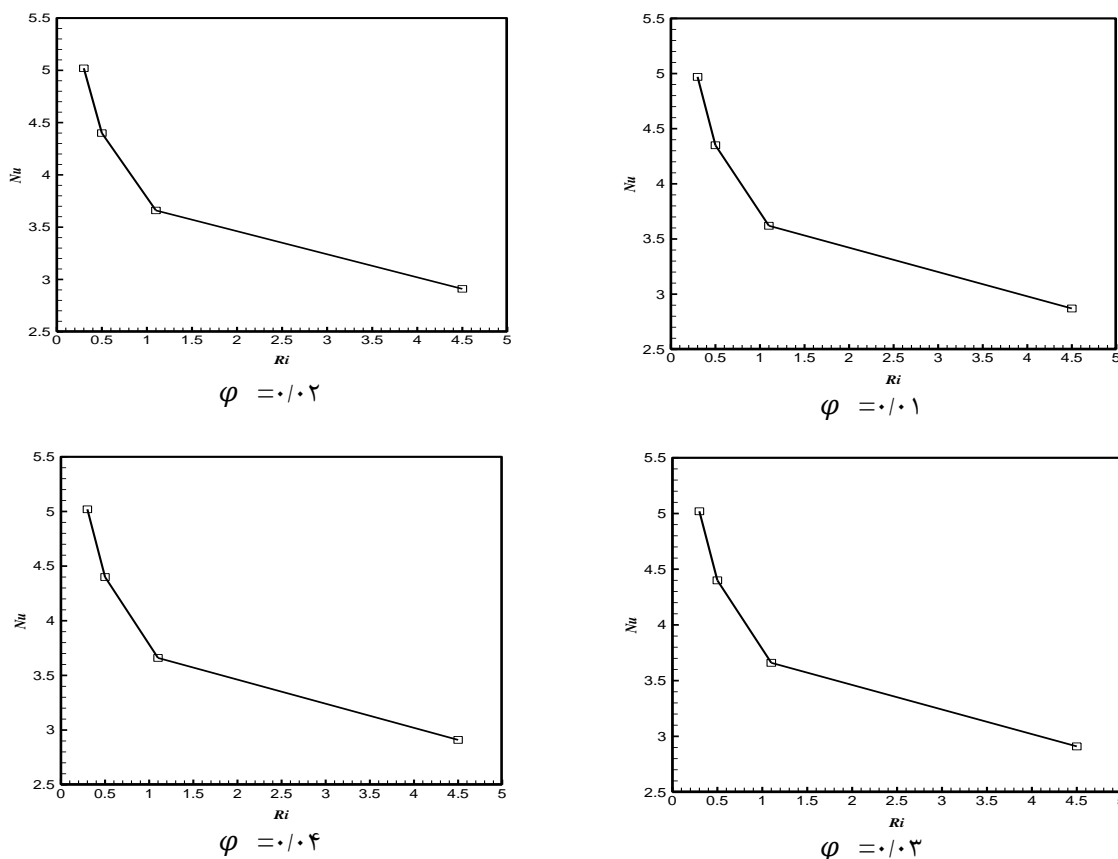
نمودار شکل (۶) بررسی تأثیر تغییرات کسر حجمی نسبت به عدد ناسلت و تغییرات اعداد ریچولدز آب-اکسید آلومینیوم است. از این نمودار نتیجه می شود که هر چه غلظت نانو ذرات داخل سیال آب-اکسید آلومینیوم داخل حفره، بیشتر باشد در شرایطی که انتقال حرارت آمیخته است، مقادیر عدد ناسلت نیز، تحت تأثیر افزایش سرعت حرکت درپوش، افزایش می یابد. بنابراین افزایش عدد ریچولدز باعث افزایش انتقال حرارت می شود.



شکل ۶- نمودار عدد ناسلت ϕ سیال آب-اکسید آلومینیوم بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچولدز

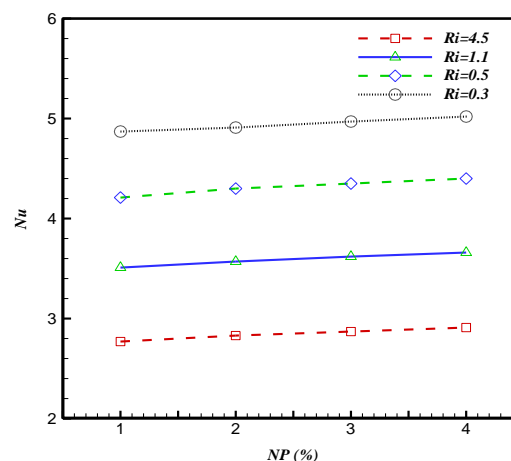
شکل (۶) تلفیقی از نمودارهای تغییرات اعداد ناسلت بر حسب کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم از $0/1$ تا $0/4$ در اعداد ریچولدز مختلف مشخص شده است. نمودار روند صعودی انتقال حرارت را نشان می دهد، که تحت تأثیر افزایش نانو ذرات و افزایش ریچولدز است. در عدد ریچولدز 100 با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت از حداقل مقدار $2/7$ به $2/9$ می رسد، در عدد ریچولدز 200 ، عدد ناسلت از $3/5$ به $3/67$ ، در عدد ریچولدز 300 عدد ناسلت $4/2$ به $4/4$ و در عدد ریچولدز 400 عدد ناسلت از $4/8$ به 5 افزایش یافته است. با مقایسه اعداد ناسلت به دست آمده در اعداد ریچولدز مختلف، روند افزایش $2/2$ درصدی انتقال حرارت به وضوح قابل مشاهده است. همچنین با توجه به مقادیر اعداد ناسلت در هر یک از نمودارها و افزایش مقادیر کسر حجمی نانو ذرات در حالی که عدد ریچولدز ثابت است، انتقال حرارت به میزان $1/2$ درصد افزایش می یابد. بنابراین، اگر چه افزایش کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم و افزایش اعداد ریچولدز هر دو به افزایش انتقال حرارت کمک می کنند، ولی عدد ریچولدز نسبت به کسر حجمی تأثیر بیشتری بر افزایش انتقال حرارت دارند.

۴-۲- تأثیر عدد ریچاردسون بر انتقال حرارت در کسر حجمی های مختلف نانو ذره اکسید آلومینیوم



شکل ۷- نمودار عدد ناسلت بر حسب عدد ریچاردسون در کسر حجمی های مختلف نانو ذره اکسید آلومینیوم

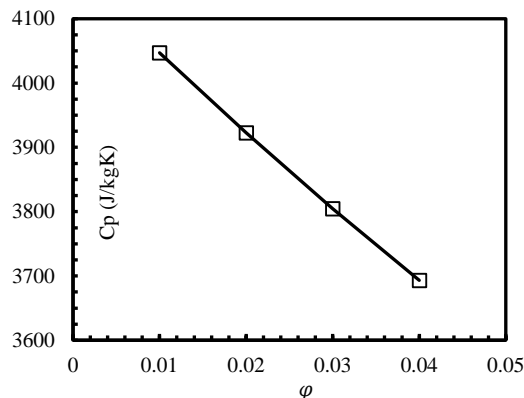
حجمی و کاهش ریچاردسون، عدد ناسلت افزایش می یابد و انتقال حرارت افزایش می یابد. اگر در عدد ریچاردسون ثابت $4/5$ ، کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم از 0.1 به 0.4 افزایش یابد عدد ناسلت یا ضریب انتقال حرارت از $2/7$ به $2/9$ افزایش می یابد. هنگامی که عدد ریچاردسون برابر $1/1$ باشد با افزایش کسر حجمی، عدد ناسلت از $3/5$ تا $3/67$ افزایش می یابد. با افزایش کسر حجمی در عدد ریچاردسون 0.5 ، عدد ناسلت از $4/2$ تا $4/4$ و در عدد ریچاردسون 0.3 ، از $4/2$ تا $4/9$ افزایش می یابد. از مقادیر به دست آمده نتیجه می شود که با افزایش کسر حجمی، عدد ناسلت کمی افزایش می یابد ولی هر چه عدد ریچاردسون کاهش یابد افزایش اعداد ناسلت محسوس تر است و اثر تغییرات اعداد ریچاردسون نسبت به کسر حجمی بر روی انتقال حرارت بیشتر است. می توان گفت با کاهش سرعت درپوش میزان انتقال حرارت اجباری کمتر شده و اعداد ریچاردسون افزایش می یابند. بنابراین کاهش انتقال حرارت اجباری در حالی که انتقال حرارت طبیعی ثابت است موجب کاهش انتقال حرارت می شود.



شکل ۸- نمودار عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم در اعداد ریچاردسون

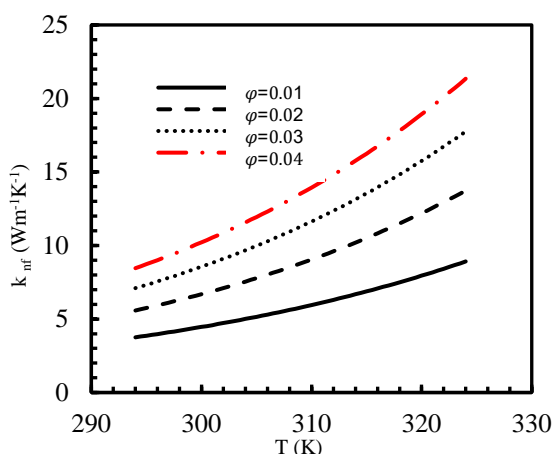
در این مورد به نمودار تلفیقی اکتفا شده است و از آوردن تک تک نمودارها برای هر یک از اعداد ریچاردسون، صرف نظر شده است. در شکل (۸) نمودار عدد ناسلت بر حسب کسر حجمی در اعداد ریچاردسون مختلف رسم شده است. با توجه به شکل (۸) مشاهده می شود که با افزایش کسر

نمی‌شود. در واقع این معادله با فرض تعادل گرمایی بین نانو ذرات و سیال پایه در نظر گرفته شده است.



نمودار ۹-۲- گرمای ویژه نانو سیال آب و اکسید آلومینیوم در کسر حجمی‌های متفاوت در رینولدز ۱۰۰

با وجود متحرک بودن در پوش حفره با سرعت کم و اختلاف دمای دیواره‌های حفره، گرمای ویژه نانو سیال تنها تحت تأثیر میزان کسر حجمی نانو ذرات است. افزایش مقدار نانو ذرات اکسید آلومینیوم گرمایی ویژه به سرعت رو به کاهش است. ضریب هدایت گرمایی نانو سیال نیز برای دماها و کسر حجمی‌های مختلف نانو ذرات اکسید آلومینیوم در رینولدزهای مختلف محاسبه و نتایج به دست آمده در نمودارهای زیر نشان داده شده‌اند.



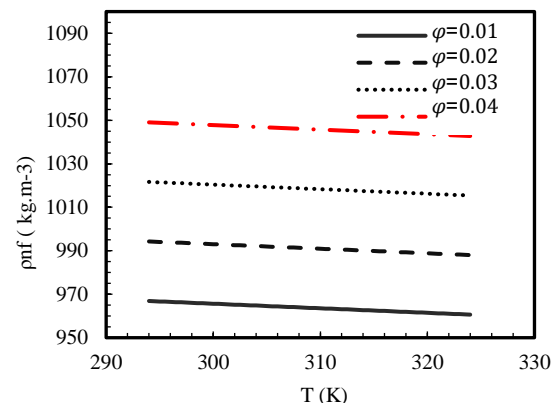
نمودار ۹-۳- تغییرات ضریب هدایت گرمای اکسید آلومینیوم بر حسب دما در رینولدز ۱۰۰

در بیشترین دما که ۳۲۴ K است در همه اعداد رینولدز مسئله و در کسر حجمی‌های ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ ضرایب هدایت گرمایی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم به ترتیب برابر با $13, 19, 26$ و 31 است، یعنی مقادیر ضریب هدایت گرمایی برای دماهای یکسان در اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۴۰۰ تکرار شده است.

۴-۴- خواص متغیر نانو سیال (آب- اکسید آلومینیوم)

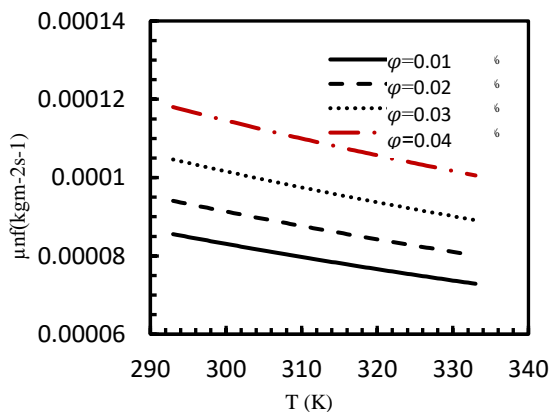
تاکنون مطالعات بسیاری در مورد ارزیابی خواص نانوسیالات برحسب خواص سیال پایه و نانو ذرات انجام و مدل‌های متعددی ارائه شده است. محققان [۶ و ۷] خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم را به صورت آزمایشگاهی اندازه گرفته‌اند. این خواص شامل چگالی، ضریب هدایت گرمایی و لزجت به صورت متغیر با دما و کسر حجمی و همچنین ضریب گرمایی ویژه متغیر با کسر حجمی است. در شکل‌های (۹) نمودارهای تغییرات خواص با استفاده از معادلات ذکر شده رسم شده‌اند.

دانشسته یا چگالی نقش بسیار مهمی در انتقال حرارت جابجایی طبیعی دارد، زیرا منشأ انتقال حرارت جابجایی طبیعی نیروی شناوری و گرادیان چگالی است.

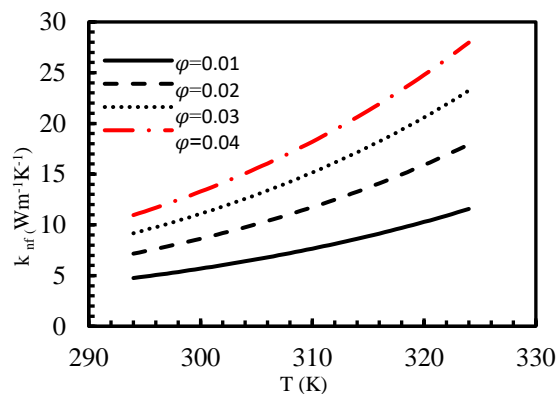


نمودار ۹-۱- چگالی متغیر نانو سیال آب و اکسید آلومینیوم بر حسب دما در کسر حجمی‌های متفاوت

چگالی نانو ذرات آلومینیوم متغیر با دما و کسر حجمی است. با افزایش دما از ۲۹۲ K تا ۳۲۰ K، چگالی نانو سیال کاهش یافته و نمودار سیر نزولی دارد. این مقدار کاهش چگالی، در کسر حجمی‌های بیشتر نانو ذرات اکسید آلومینیوم، رو به افزایش است. در کسر حجمی‌های مورد نظر با افزایش دما به اندازه ۳۰ K مقدار چگالی تقریباً ۸ درصد کاهش می‌یابد. در نتیجه تأثیر افزایش کسر حجمی و دما بر چگالی نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم عملکردی عکس یکدیگر دارند. ظرفیت گرمایی یک جسم و گرمای ویژه یک ماده هیچ کدام ثابت نیستند. هر دو کمیت به دما و احتمالاً به سایر متغیرها، مثلاً فشار بستگی دارند. گرمای ویژه نانو سیال آب اکسید آلومینیوم فقط به کسر حجمی وابسته است و با تغییرات دما در آن تغییری اعمال

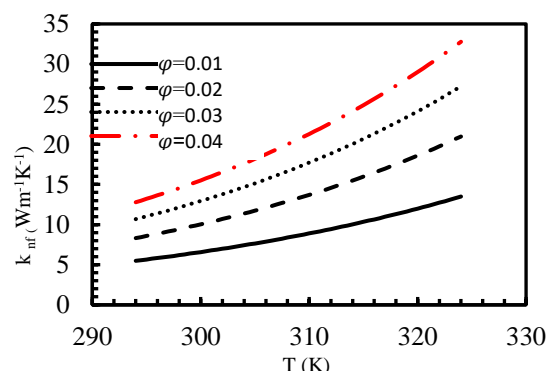


نمودار ۹-۷- تغییرات لزجت نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم بر حسب دما در کسر حجمی‌های مختلف



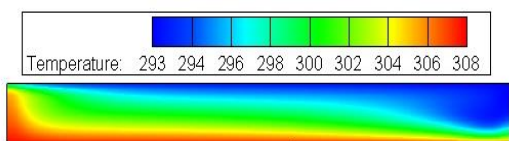
نمودار ۹-۴- تغییرات ضریب هدایت گرمای اکسید آلومینیوم بر حسب دما در رینولدز ۲۰۰

لزجت یا ویسکوزیته دینامیکی هم یکی دیگر از خواص ترموفیزیکی نانو سیال که در مباحث مربوط به انتقال حرارت بسیار مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد. هنگامی که دما از ۲۹۰ K به ۳۳۳ K (که در بازه دمای مجاز معادله است) افزایش یابد مقادیر لزجت از حداکثر مقدار $0.00012 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در کسر حجمی ۰/۰۴ به حداقل مقدار لزجت $0.00006 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ در کسر حجمی ۰/۰۱ کاهش می‌یابند. بنابراین افزایش مقدار نانو ذرات عامل افزایش لزجت و افزایش دما عامل کاهش لزجت نانو سیال نسبت به سیال خالص آب است.



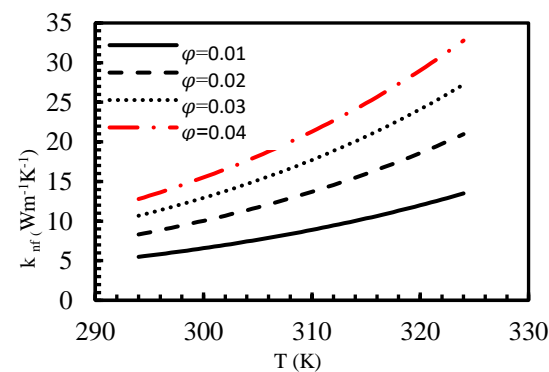
نمودار ۹-۵- تغییرات ضریب هدایت گرمای اکسید آلومینیوم بر حسب دما در رینولدز ۳۰۰

۴-۵- کانتورهای توزیع دمای آب- اکسید آلومینیوم
میدان دما برای جریان سیالات مورد نظر در تحقیق حاضر نقش مهمی در تعیین انتقال حرارت سیال دارد. شکل‌های ۹ کانتورهای دما را برای نانو سیالات آب- اکسید آلومینیوم و آب- اکسید مس در دو کسر حجمی ۰/۰۲ و ۰/۰۴ داخل حفره با اختلاف دمای ۱۵ °C دیواره‌ها و اعداد رینولدز ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۰۰ را نشان می‌دهند. این کانتورها توزیع دمای سیال را در حفره در نزدیکی دیوار پائین گرم، و دیواره بالایی یا همان درپوش متحرک، نمایش می‌دهند. روند انتقال حرارت، نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم و تغییرات رینولدز در کسر حجمی‌های ۰/۰۲ و ۰/۰۴ به صورت کانتورهای دما بررسی شده است.



کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۲ در عدد رینولدز ۱۰۰

افزایش ضریب هدایت گرمایی اکسید آلومینیوم تابع افزایش مقادیر کسر حجمی نانو ذرات است. روند افزایشی ضریب هدایت گرمایی با افزایش حرارت از ۲۹۴ K تا ۳۲۴ K بیشتر می‌شود. اما افزایش عدد رینولدز در تغییرات ضریب هدایت گرمایی تأثیر چشمگیری ندارد. همان‌طور که انتظار می‌رود این پارامتر وابسته به افزایش دما، نوع ذرات به‌کاربرده شده و کسر حجمی نانو ذرات پراکنده شده در آب است و تأثیر سرعت حرکت درپوش ناچیز است.



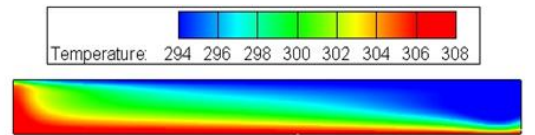
نمودار ۹-۶- تغییرات ضریب هدایت گرمای اکسید آلومینیوم بر حسب دما در رینولدز ۴۰۰

از کانتورهای بالا پیداست که حرارت از دیواره گرم پائینی، به سمت دیواره سرد بالایی در حال جابه‌جایی به صورت طبیعی است و چون درپوش حفره متحرک است انتقال حرارت از شکل طبیعی و یکنواخت، خارج شده و به صورت نامنظم، تحت تأثیر انتقال حرارت اجباری حاصل از سرعت حرکت درپوش قرار می‌گیرد. با حرکت درپوش به سمت چپ، حرارت ناشی از دیواره پائین نیز به طرف دیواره عمودی چپ کشیده شده و دیواره عمودی سمت راست حفره که زیر قسمت باز درپوش قرار دارد دمای کمتری نسبت به دیواره روبرو دارد. این حالت از شکل جابه‌جایی حرارت در اعداد رینولدز کم یعنی ۱۰۰ و ۲۰۰ که سرعت حرکت درپوش کمتر است بیشتر نمایان است. در کسر حجمی نانو ذرات با ۰/۰۴ و عدد رینولدز ۳۰۰ است که انتقال حرارت بیشتری را از دیوار گرم پائین حفره به سمت بالا (نسبت به کانتورهای دیگر) نشان می‌دهد یا به عبارتی در شرایط عنوان شده مقدار افزایش انتقال حرارت از دیواره گرم بیشتر است.

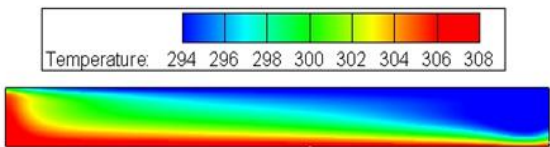
در کانتورهای رسم شده که عدد رینولدز ۴۰۰ است، درپوش در بیشترین مقدار سرعت قرار دارد و جابه‌جایی اجباری از جابه‌جایی طبیعی بیشتر است بنابراین، انتقال حرارت نانو سیال داخل حفره به صورت یکنواخت و متقارن نشان داده شده است. جهت دستیابی به درک بهتر از رفتار نانو سیالات مورد نظر در داخل حفره، برای اعداد رینولدز مختلف پروفیل طول حفره نسبت به سرعت حرکت درپوش در مقطع میانی طول حفره کم‌عمق، در شکل ۹، برای کسر حجمی ثابت ۰/۰۲ و مقاطع مختلف ارتفاع حفره رسم شده است. حفره مورد نظر این تحقیق، درپوش متحرک با سرعت یکنواخت و ثابت دارد که این همان عامل ایجاد انتقال حرارت اجباری است. ضمناً اندازه سرعت به گونه‌ای است که اعداد رینولدز محاسبه شده سرعت، از محدوده رژیم جریان آرام خارج نشود.

۴-۶- سرعت حرکت درپوش در مرکز حفره در نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم

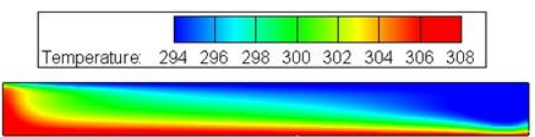
با توجه به نمودار رسم شده سرعت درپوش که با عدد رینولدز رابطه مستقیم دارد، از مرکز تا دیواره بالای حفره رو به افزایش است و سرعت حرکت نانو سیال با افزایش عدد رینولدز روندی رو به افزایش دارد. سرعت حرکت نانو سیال روی دیواره افقی پائین صفر است اما هر چه به سمت



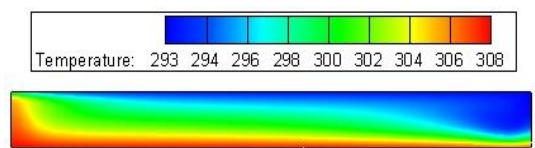
کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۴ در عدد رینولدز ۱۰۰



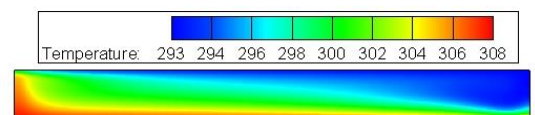
کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۲ در عدد رینولدز ۲۰۰



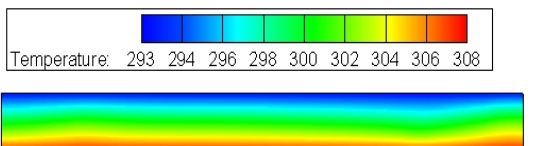
کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۴ در عدد رینولدز ۲۰۰



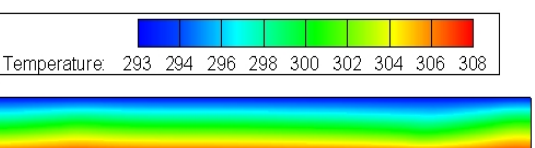
کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۲ در عدد رینولدز ۳۰۰



کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۴ در عدد رینولدز ۳۰۰



کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۲ در عدد رینولدز ۴۰۰



کانتور دمای آب- اکسید آلومینیوم در کسر حجمی ۰/۰۴ در عدد رینولدز ۴۰۰

۱- افزایش عدد رینولدز در محدوده جریان آرام در کسر حجمی‌های ثابت با افزایش عدد ناسلت و افزایش انتقال حرارت همراه است.

۲- با افزایش کسر حجمی نانو ذرات داخل سیال آب-اکسید آلومینیوم داخل حفره، مقادیر عدد ناسلت نیز، تحت تأثیر افزایش سرعت حرکت درپوش، افزایش می‌یابد.

۳- افزایش عدد ریچاردسون حتی وقتی کسر حجمی نانو ذرات افزایش یابد باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود. بنابراین تأثیر تغییرات اعداد ریچاردسون بر روی عدد ناسلت بیشتر از تأثیر کسر حجمی بر عدد ناسلت است و انتقال حرارت با افزایش عدد ریچاردسون کاهش، و با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد.

۴- با افزایش کسر حجمی، عدد ناسلت کمی افزایش می‌یابد ولی هرچه عدد ریچاردسون کمتر شود افزایش عدد ناسلت محسوس‌تر است. در نتیجه اثر تغییرات عدد ریچاردسون نسبت به کسر حجمی بر انتقال حرارت بیشتر است.

۵- افزایش عدد رینولدز موجب افزایش عدد ناسلت می‌شود این در حالی است که افزایش کسر حجمی هم، بر افزایش عدد ناسلت تأثیر مضاعف دارد. پس این دو متغیر یعنی عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات از عوامل افزایش انتقال حرارت هستند. به گونه‌ای که عدد رینولدز نسبت به کسر حجمی عامل مؤثرتری بر افزایش انتقال حرارت است.

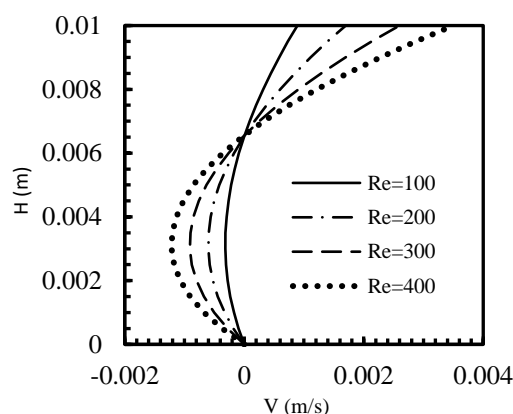
۶- با افزایش کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم از ۰/۰۱ تا ۰/۰۴ در عدد رینولدز ثابت در بازه ۱۰۰ تا ۴۰۰ برای نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم انتقال حرارت افزایش می‌یابد.

۷- انتقال حرارت ناشی از افزایش سرعت درپوش یا انتقال حرارت اجباری تأثیر چشمگیرتر و مؤثرتری نسبت به انتقال حرارت طبیعی ناشی از اختلاف دمای دیواره‌های افقی حفره دارد.

۸- اگر سرعت درپوش ثابت فرض شود در ارتفاع‌های مختلف حفره اعداد رینولدز تغییر می‌کنند به گونه‌ای که افزایش عدد رینولدز در ارتفاع کمتر حفره اتفاق می‌افتد.

۹- با و بدون در نظر گرفتن اثر خواص متغیر در همگی کسر حجمی‌های بررسی شده در نانو سیال آب-اکسید آلومینیوم با افزایش سرعت حرکت درپوش حفره، عدد رینولدز و در نتیجه عدد ناسلت افزایش می‌یابد که موجب افزایش انتقال حرارت است.

بالا و درپوش حفره می‌رود سرعت افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰- پروفیل تغییرات سرعت نسبت به ارتفاع حفره در اعداد رینولدز مختلف در کسر حجمی ۰/۰۲

اگر سرعت درپوش ثابت فرض شود در ارتفاعات مختلف حفره اعداد رینولدز تغییر می‌کنند به گونه‌ای که افزایش عدد رینولدز در ارتفاع کمتر حفره اتفاق می‌افتد. همان‌طور که از نمودار ۹ مشخص است در عدد رینولدز ۴۰۰، از دیواره افقی پائین به سمت درپوش حفره یعنی از کف حفره تا ارتفاع 0.003 m اندازه سرعت نانو سیال تحت تأثیر حرکت درپوش بسیار کم و از صفر تا 0.002 m/s است. اما با افزایش ارتفاع از 0.003 m تا دیواره بالا یا همان درپوش حفره، سرعت نانو سیال بیشتر شده و تا مقدار 0.004 m/s افزایش می‌یابد.

در اعداد رینولدز ۲۰۰ تا ۳۰۰ نیز با کاهش سرعت حرکت درپوش سرعت نانو سیال داخل حفره از کف حفره تا ارتفاع حدود 0.003 m در بازه ۰ تا 0.002 m/s ، و از ارتفاع 0.003 m تا 0.001 m نمودار سیر صعودی داشته و سرعت نانو سیال تا نزدیک 0.002 m/s افزایش می‌یابد. اما در عدد رینولدز ۱۰۰ نمودار رفتار متفاوتی دارد طوری که اختلاف سرعت نانو سیال نسبت به اعداد رینولدز دیگر ناچیز است و از نزدیک کف حفره تا درپوش، سرعت از صفر تا کمتر از 0.001 m/s افزایش یافته است. بنابر روابط ریاضی عدد رینولدز که تاکنون مطرح شده، عملکرد پارامترهای نشان داده شده در نمودار منطقی است. لازم به ذکر است که مقادیر پارامترهای مختلف در مسأله پیش رو همگی در محدوده اعداد بسیار کوچک و نامحسوس هستند و تغییرات به صورت جزئی اما قابل توجه و مؤثر در صنایع مختلف درگیر با فرایند نانوسیالات می‌باشند.

۵- نتیجه‌گیری

عدد پرائنتل	Pr	۱۰- چگالی نانو ذرات آلومینیوم متغیر با دما و کسر حجمی
دما (K)	T	است. با افزایش دما چگالی نانو سیال کاهش می‌یابد. این
مؤلفه های سرعت (ms^{-1})	u, v	مقدار کاهش چگالی، در کسر حجمی‌های بیشتر نانو ذرات
سرعت مرجع	U_0	اکسید آلومینیوم، رو به افزایش است.
مختصات دکارتی (m)	x, y	۱۱- سیر تغییرات لزجت نانوسیال با افزایش دما و افزایش
مختصات بی بعد دکارتی	X, Y	کسر حجمی نانو ذرات روندی رو به کاهش دارد.
علائم یونانی		۱۲- اضافه کردن نانو ذرات اکسید آلومینیوم نسبت به آب
ضریب پخش حرارتی (m^2s^{-1})	α	خالص در افزایش انتقال حرارت مؤثر است و ضریب هدایت
ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})	β	گرمایی را تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌دهند.
لزجت ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	μ	۱۳- ضریب گرمایی ویژه آب- اکسید آلومینیوم با افزایش
لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})	ν	کسر حجمی نانو ذرات اکسید آلومینیوم داخل حفره کاهش
چگالی (kgm^{-3})	ρ	می‌یابد.
کسر حجمی نانوذرات	ϕ	۶- فهرست علائم
		c_p (Jkg ⁻¹ K ⁻¹) ظرفیت گرمایی ویژه سیال
		Gr عدد گرافش
پا نویس‌ها		g (m.s ⁻²) شتاب جاذبه
سرد	c	H (m) اندازه ارتفاع محفظه
سیال	f	k (Wm ⁻¹ K ⁻¹) ضریب هدایت حرارتی
گرم	h	W (m) اندازه طول محفظه
نانوسیال	nf	Nu عدد ناسلت
ذره	p	Ra عدد رایلی
		Ri عدد ریچاردسون
		Re عدد رینولدز

مراجع

- [1] S.U.S. Choi, J.A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, Calif, USA, 1995.
- [2] S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzd, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", Journal of Heat Transfer, Vol. 125, No. 4, 2003, pp. 567–574.
- [3] M.A. Mansour, R.A. Mohamed, M.M. Abd-Elaziz, S.E. Ahmed, "Numerical simulation of mixed convection flows in a square lid-driven cavity partially heated from below using nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 10, 2010, pp. 1504–1512.
- [4] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, "Mixed convection in a lid-driven triangular enclosure filled with nanofluids", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, No. 8, 2010, pp. 1142–1148.
- [5] G.A. heikhzadeh, M. EbrahimQomi, N. Hajjaligol, A. Fattahi, "Numerical study of mixed convection flows in a lid-driven enclosure filled Withnanofluid using variable properties", International Results in Physics, Vol. 2, 2012, pp. 5–13.
- [6] K. Khanafer, and K. Vafai, "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54, Issues 19–20, 2011, pp. 4410–4428.

[7] C.J. Ho, W.K. Liu, Y.S. Chang, and C.C. Lin, "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, Issue 8, 2010, pp. 1345–1353.

[8] A.J. Chamkhaa, E. Abu-Nada, "Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water–Al₂O₃ nanofluid: Effect of viscosity models", *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 36, 2012, pp. 82–96.

[9] A.A. Abbasian Arani, S. Mazrouei Sebdani, M. Mahmoodi, A. Ardehshiri, M. Aliakbari, "Numerical study of mixed convection flow in a lid-driven cavity with sinusoidal heating on sidewalls using nanofluid", *Superlattices and Microstructures*, Vol. 51, Issue 6, 2012, pp. 893–911.

[10] X. Wang, D. Li, H. Jiao, "Heat Transfer Enhancement of CuO- Water Nanofluids Considering Brownian Motion of Nanoparticles in a Singular Cavity", *Journal of Information and Computational Science*, Vol. 9, Issue 5, 2012, pp. 1223–1235.

[11] R. Lotfi, Y. Saboohi, and A.M. Rashidi, "Numerical study of forced convective heat transfer of Nanofluids: Comparison of different approaches", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, Issue 1, 2010, pp. 74–78.

[12] F. Garoosi, "Numerical simulation of mixed convection of the nanofluid in heat exchangers using a Buongiorno model", *Powder Technology*, Vol. 269, 2015, pp. 296–311.

[13] G.H. R. Kefayati, "FDLBM simulation of mixed convection in a lid-driven cavity filled with non-Newtonian nanofluid in the presence of magnetic field", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 95, 2015, pp. 29–46.

[۱۴] ع.ا. فریدون، ع.ا. عباسیان آرانی، م. همت اسفه و آ. زارع قادی، "ارزیابی جریان جابه‌جایی طبیعی حول استوانه داغ قرار گرفته در محفظه مربعی پر شده از نانوسیال با تغییر در شعاع و موقعیت استوانه"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۱، شماره ۳۳، ۱۳۹۲، صفحه ۵۷–۶۸.

[۱۵] ع.ا. عباسیان آرانی، ع.ر. آقایی، ح.ر. احترام، "بررسی عددی تاثیر حرکت براونی در جابه‌جایی توام نانوسیال در محفظه با یک منبع مربعی گرم مرکزی"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۱، شماره ۳۴، ۱۳۹۲، صفحه ۱۵–۲۹.

[۱۶] ق.ع. شیخ زاده، س.پ. غفاری، "مدل سازی عددی اثر انتقال نانو ذرات در جریان جابه‌جایی ترکیبی نانوسیال با خواص متغیر در محفظه مربعی با درگاه ورود و خروج جریان"، *مجله مدل سازی در مهندسی*، دوره ۱۲، شماره ۳۸، ۱۳۹۳، صفحه ۸۳–۱۰۲.

[17] S.M. Fotukian, M. Nasr Esfahany, "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute c-Al₂O₃-water nanofluid inside a circular tube", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 31, No. 4, 2010, pp. 606–612.

[18] M. Dastmalchi, "Numerical study of nanoparticles transport in natural convection of Water-Al₂O₃ nanofluid with variable properties in a square enclosure", *Department of Mechanical Engineering*, Vol. 86, 2011, pp. 312–402.

[19] M. Corcione, "Empirical Correlating Equations for Predicting the Effective Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, Issue 1, 2011, pp. 789–793.