بررسی عددی جریان جابجایی طبیعی نانو سیال درون یک حفره حلقه‌ای

میلاد خورشیدیان[۱]، سید امیرعباس علومی[۲*] و امیرحسین نگهی[۳]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
[۲] استاد یار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران
[۳] کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد،ایران

دریافت: پاییز ۹۶ پذیرش: پاییز ۹۶

چکیده

در این مقاله، انتقال حرارت جابجایی آزاد بین دو استوانه هم محور بررسی شده است. پارامترهای بررسی شده در این پروژه اثر عدد رایلی، افزودن نانوذرات، غلظت نانوذرات، نوع نانوذرات و نوع سیال می‌باشند. معادلات حاکم به روش حجم محدود و با به کارگیری الگوریتم سیمپل حل شده است. اثر عدد رایلی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد سیالات هوا، آب خالص و نانوسیال بررسی شد و مشاهده گردید که با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از چهار نانو ذرات استفاده شده، نانوسیالات آب- اکسید مس و آب- تیتانیا به ترتیب بیشترین و کمترین میزان انتقال حرارت را داشتند. درادامه به بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد به صورت گذرا پرداخته شد و مشاهده گردید که با افزایش عدد رایلی مدت زمان لازم برای پایا شدن و میزان انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که میزان انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانو سیال افزایش می یابد.

* **عهده‌دار مکاتبات: miroloomi@iauyazd.ac.ir**

کلمات کلیدی: جابجایی آزاد، نانوسیال، رایلی، غلظت نانوسیال.

۱- مقدمه

اهمیت انتقال حرارت جابجایی و کاربردهای زیادی که در صنایع مختلف دارد از یک سو و نیز هدایت حرارتی پایین سیالات خنک‌کننده از سوی دیگر، موجب استفاده از نسل جدیدی از سیالات به نام نانوسیالات در انتقال حرارت شده است. با توجه به تأثیر مهم پارامترهایی چون عدد رایلی، افزودن نانوذرات، غلظت نانوذرات و جنس نانوذرات مروری بر چندین مطالعات انجام شده پیرامون تأثیر این پارامترها بر روی سیالات متداول و نانو سیالات خواهیم داشت.

هریس و همکارانش [۱] به صورت تجربی جریان آرام اجباری درون لوله با قطر ۶ میلیمتر و ضخامت ۰/۵ میلی را با استفاده از نانوسیال آب– آلومینا با قطر متوسط ذرات ۲۰ نانومتر و آب–اکسید مس با قطر متوسط ذرات بین ۶۰-۵۰ نانومتر بررسی کردند. کسر حجمی بین ۰/۲ تا ۰/۳ و شرط مرزی دما ثابت اعمال گردید. آن‌ها افزایش عدد ناسلت را با افزایش کسر حجمی برای هر دو نانوسیال مشاهده کردند.

بن منصور و همکارانش [۲] میزان سودمندی استفاده از نانوسیال به-جای سیال ساده را با در نظر گرفتن میزان انتقال حرارت و میزان توان مورد نیاز پمپ و دیگر پارامترهای مهم طراحی در جریان آرام و آشفته بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که مقایسه بین پارامترها نیازمند تعیین مقدار دقیق خواص ترموفیزیکی نانوسیال می‌باشد و چون این خواص تاکنون به صورت دقیق مدل‌سازی نشده اند نیاز به ازمایشات بیشتر است. بن منصور وهمکارانش [۳] جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب– آلومینا را درون لوله مستقیم و مورب با اعمال شار حرارتی ثابت یکنواخت به صورت جریان ترکیبی و با روش عددی بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که حضور نانوذرات باعث ایجاد تغییرات در میدان سرعت و دما می‌شود. این تغییرات در افزایش شدت جریان ثانویه و کاهش دمای توده‌ای سیال قابل مشاهده است و نتایج افزایش عدد ناسلت را با کسر حجمی نشان می‌دهد.

هوانگ و همکارانش [۴] به بررسی تجربی جریان آرام و اجباری درون لوله با قطر داخلی ۱/۸۱۲ میلی‌متر با نانوسیال آب- آلومینا در قسمت توسعه‌یافته پرداختند. آن‌ها ابتدا با استفاده از آنالیز ابعادی به بررسی عبارتهای ترموفورسیس، حرکت براونی، گرادیان ویسکوزیته، نرخ تنش برشی غیر یکنواخت و مقایسه آن‌ها با یکدیگر پرداختند. در این مطالعه آن‌ها مشاهده کردند که ضریب انتقال حرارت جابجایی با افزایش کسر حجمی زیاد می‌شود و با تغییر رینولدز زیاد تغییر نمی‌کند. هو، لیو و لین [۵] به بررسی تجربی جابجایی آزاد با جریان آرام درون یک حفره با نانوسیال آب- آلومینا با اندازه متوسط ذرات ۱۳۰ نانومتر پرداختند. کسر حجمی نانو ذرات از ۰/۱ تا ۰/۴ تغییر می‌کرد. ابعاد حفره ۲۵×۲۵

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

میلی‌متر در نظر گرفته شد. آن‌ها مشاهده نمودند که برای کسر حجمی‌های بالاتر از ٪۱ برخلاف جابجایی اجباری با افزایش کسر حجمی، ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. جو و زنج [۶] به بررسی عددی جریان آرام درون حفره با نسبت منظریهای ۰/۵، ۱ و۲ و عدد رایلی بین 10^3 و 10^6 با نانو ذرات در حدود ۱۰ نانومتر پرداختند. برای اینکار از مدل پخش گرمائی استفاده کردند و نشان دادند که عدد ناسلت و ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد.

پولیدوری و گروهش [۷] به مطالعه عددی جابجایی آرام آزاد روی یک لبه گرم پرداختند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش کسر حجمی ناسلت افزایش می‌یابد.

پوترا و همکارانش [۸] جابجایی آزاد بین دو سیلندر با دماهای متفاوت را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد و همچنین رفتار کاملاً نیوتنی نانوسیالات آب- آلومینا و آب- اکسید مس را برای کسر حجمی کمتر از ٪۴ گزارش و کاهش در ناسلت را به رسوب‌گذاری و ته‌نشینی نانو ذرات و وجود سرعت لغزشی نسبت دادند.

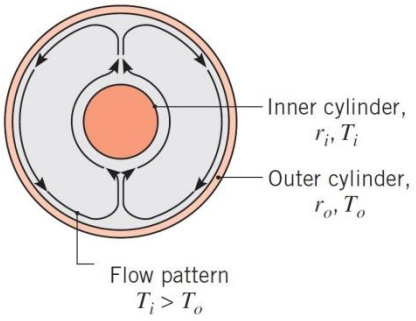
پوترا و همکارانش [۸] جابجایی آزاد بین دو سیلندر با دماهای متفاوت را به صورت تجربی بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی کاهش می‌یابد و همچنین رفتار کاملاً نیوتنی نانوسیالات آب- آلومینا و آب- اکسید مس را برای کسر حجمی کمتر از ٪۴ گزارش و کاهش در ناسلت را به رسوب‌گذاری و ته‌نشینی نانو ذرات و وجود سرعت لغزشی نسبت دادند. اکبری و همکارانش [۹] با بررسی عددی جابجایی ترکیبی در قسمت توسعه یافته جریان آرام نانوسیال آب- آلومینا در لوله افقی و مورب به افزایش ضریب انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی رسیدند.

سانترا و همکارانش [۱۰] با روش عددی، جابجایی آرام درون حفره را بررسی کردند. در این مطالعه فرض شده که نانوسیال به صورت غیرنیوتنی عمل کرده (مقادیر مربوط به ویسکوزیته از درونیابی و برونیابی اندازگیری‌های پوترا [۸] بدست آورده شد). آن‌ها کاهش انتقال حرارت را با افزایش کسر حجمی نتیجه گرفتند.

اوزتاپ و ابونادا [۱۱] جابجایی آرام آزاد را درون حفره مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادندکه انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد.

هو و همکارانش [۱۲] مدلهای مختلف ضریب رسانش گرمایی و ویسکوزیته نانوسیالات را بر جریان آرام جابجائی آزاد درون حفره بررسی کردند و نشان دادند که مدل‌های مختلف تأثیرات و نتایج متفاوتی به همراه دارند.

با توجه به کاربردهای متعدد دو استوانه هم‌مرکز[1] در فرآیندهای صنعتی از قبیل: وسایل فیلتر و پالایشگاه‌ها، راکتورهای شیمیایی کاتالیتیک، بیو راکتورهای سلول گیاهی، وسایل پلاسما فورسیس خون، تبادل گرهای یونی و ... در این پروژه به بررسی این هندسه به صورت دو بعدی پرداخته می‌شود. در شکل ۱ هندسه مورد بررسی نشان داده شده است.



شکل۱- هندسه مورد بررسی

در ابتدا به منظور بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد درون دو استوانه هم‌مرکز، هوا به عنوان سیال عامل در نظر گرفته می‌شود و کلیه خواص در دمای فیلم[2] خوانده می‌شوند.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر انتقال حرارت جابجایی آزاد، معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی هستند که به ترتیب در معادلات ۱ تا ۳ نشان داده شده اند:

$$\nabla.V=0 \quad (۱)$$

$$\rho \frac{DV}{Dt} = -\nabla P + \rho g + \mu \nabla^2 V \quad (۲)$$

$$k\,\nabla^2 T = \rho C_p \frac{DT}{Dt} \quad (۳)$$

که معادله ۲ با تقریب بوزینکس به صورت معادله ۴ ساده می‌شود:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = g\beta(T - T_\infty) + \mu \nabla^2 V \quad (۴)$$

اعداد بدون بعد مؤثر در این تحقیق نیز اعداد ناسلت و رایلی می‌باشند که به ترتیب در معادلات ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند:

$$Nu = \frac{q^{"}L}{k(T_H - T_C)} \quad (۵)$$

$$Ra = \frac{\rho g \beta (T_H - T_C) L^3}{\mu \alpha} \quad (۶)$$

۲-۱- روابط مربوط به خواص نانوسیال

برای محاسبه چگالی مخلوط‌ها با فرض اینکه فضای خالی بین ذرات و مایع وجود نداشته باشد، از یک مدل فیزیکی نشان داده شده در معادله ۷ استفاده می‌شود [۱۳]:

$$\rho_{nf} = (1 - \emptyset)\rho_{bf} + \emptyset \rho_p \quad (۷)$$

ظرفیت گرمایی ویژه نانوسیالات با استفاده از دو رابطه‌ی ۸ و ۹ ارائه شده توسط پاک و چو[3] [۱۴] و ژوان و روتزل[4] [۱۵] محاسبه می‌گردد که در این تحقیق از معادله ۹ استفاده شده است:

$$C_{pnf} = (1 - \emptyset)C_{pbf} + \emptyset C_{pp} \quad (۸)$$

[1] Annulus

[2] Film Temperature
[3] Pak and Cho
[4] Xuan and Roetzel

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

$$\frac{(1-\emptyset)\rho_{bf}C_{pbf}+\emptyset\rho_pC_{pp}}{\rho_{nf}} \quad (۹)$$

چون[5] و همکاران [۱۶] جهت محاسبه رسانایی گرمایی نانو سیالات حاوی نانو ذرات اکسید آلومینیوم معادله ۱۰ را پیشنهاد دادند. که در مقایسه با مدل‌های موجود تطابق بیشتری با نتایج تجربی دارد:

(۱۰)

$$\frac{K_{nf}}{K_{bf}} = 1 + 64.7\emptyset^{0.746}\left(\frac{d_{bf}}{d_p}\right)^{0.369}\left(\frac{K_p}{K_{bf}}\right)^{0.7476}Pr^{0.9955}Re^{1.2321}$$

d_{bf} قطر مولکول سیال پایه بوده و Re و Pr نیز اعداد رینولدز و پرانتل می‌باشند که به صورت معادلات ۱۱ و ۱۲ تعریف می‌شوند.

$$Re = \frac{\rho_{bf}V_{bf}d_p}{\mu} = \frac{\rho_{bf}k_bT}{3\pi\mu^2 l_{bf}} \quad (۱۱)$$

$$Pr = \frac{\mu}{\rho_{bf}\alpha} \quad (۱۲)$$

در این معادلات T دمای سیال، l_{bf} طول پویش آزاد سیال پایه (برای آب ۰/۱۷ نانومتر است) و k_b ثابت بولتزمن (که مقدار آن برابر با $1.3807 \times 10^{-23} J/K$) می‌باشند. μ نیز ویسکوزیته سیال پایه بوده که برای آب با استفاده از معادله ۱۳ به دست می‌آید:

$$\mu = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\frac{247.8}{T-140}} \quad (۱۳)$$

ویسکوزیته دینامیکی موثر نانوسیال هم توسط رابطه بریکمن[6] [۱۷]به صورت رابطه ۱۴ به‌دست می‌آید:

$$\mu_{nf} = \frac{1}{(1-\emptyset)^{2.5}}\mu_{bf} \quad (۱۴)$$

۲-۲- روش عددی و اعتبارسنجی

معادلات حاکم به روش حجم محدود و با بکارگیری الگوریتم سیمپل حل شده است. در کلیه کارهای عددی به منظور اطمینان از صحت نتایج به اعتبارسنجی کار نیاز است. بدین منظور در این پژوهش شبیه‌سازی برای سیال هوا صورت گرفته و نتایج آن با استفاده از معادلات ارایه شده توسط ریت بای و هلندز [۱۸] مقایسه شده و در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول۱- مقایسه نتایج کار حاضر با مدل ریت بای و هلندز برای هوا

انتقال حرارت (وات)	روش حل
۳۶/۴	ریت بای و هلندز
۳۶/۱۲	کارحاضر

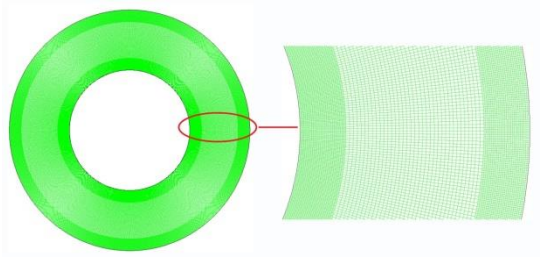
همانطور که مشاهده می‌شود روش حل از دقت خیلی خوبی برخوردار است و میزان خطای آن با مدل ریت بای و هلندز ٪۰/۷۷ است.

برای حل عددی به شبکه‌بندی نیاز است، که این شبکه‌های تولید شده نقش مهمی در دقت حل ایفا می‌کنند. بنابراین به منظور اطمینان از مناسب بودن شبکه‌بندی مورد استفاده راه‌هکارهایی وجود دارد، که یکی از این راه‌ها بررسی استقلال شبکه مورد استفاده است.

هندسه مورد نظر با استفاده از شبکه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌کنید با ریز شدن شبکه‌ها شبیه‌سازی و میزان انتقال حرارت مستقل از تعداد شبکه‌ها می‌شود. برای دو حالت با تعداد شبکه‌های ۹۹۷۹۲ و ۱۸۱۴۴۰ مقادیر محاسبه شده به هم نزدیک بوده، بنابراین با توجه به این‌که تعداد شبکه‌های بیشتر مدت زمان محاسبات را افزایش می‌دهد و در این حالت در دقت محاسبات تأثیر چندانی ندارد، شبکه مورد استفاده در این پژوهش، شبکه‌ای است که تعداد آن ۹۹۷۹۲ است. در شکل ۲ نحوه شبکه‌بندی هندسه مورد بررسی، ارائه شده است.

جدول۲- مقدار انتقال حرارت برای تعداد شبکه‌های مختلف

انتقال حرارت (وات)	تعداد شبکه
۴۳/۳۵	۲۸۲۰
۴۰/۲۰	۱۱۲۸۰
۳۷/۲۸	۶۵۲۳۸
۳۶/۱۲	۹۹۷۹۲
۳۶/۰۶	۱۸۱۴۴۰



شکل۲- شبکه‌بندی مورد استفاده

۳-نتایج

پس از اطمینان از روش عددی و انتخاب شبکه مناسب به بررسی نتایج پرداخته می‌شود. هدف این تحقیق شبیه‌سازی و بررسی پارامترهای مؤثر بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال درون دو استوانه هم مرکز است. عدد رایلی، افزودن نانوذرات، غلظت نانوذرات، نوع نانوذرات و نوع سیال ازجمله پارامترهای بررسی شده در این پژوهش هستند.

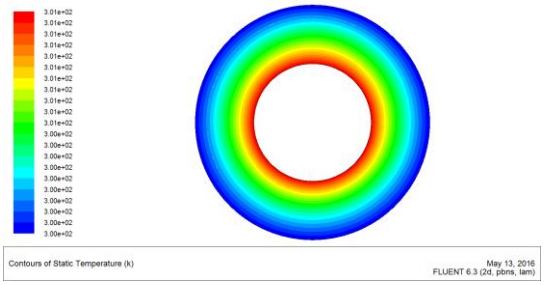
۳- ۱- بررسی اثر عدد رایلی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد با سیال عامل هوا

در این قسمت به بررسی اثر عدد رایلی بر پدیده‌ی انتقال حرارت جابجایی آزاد درون دو استوانه هم مرکز با سیال عامل هوا با سه عدد رایلی از مرتبه‌های 10^3، 10^4 و 10^5 پرداخته شده و نتایج آن در شکل‌های ۳ تا ۱۰ نشان داده شده است. در این حالت دو دیواره داخلی و خارجی به صورت دما ثابت و با دماهای به ترتیب ۳۰۱ و ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته

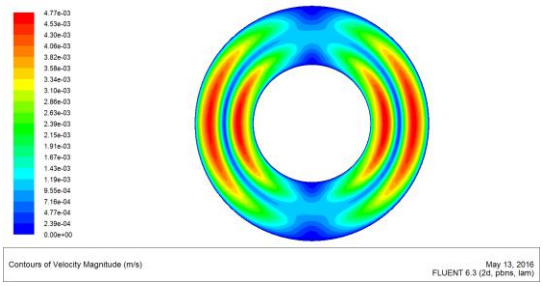
[5] Chon
[6] Brinkman

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌کنید، به دلیل پایین بودن عدد رایلی نفوذ حرارتی و همچنین اندازه سرعت‌ها از مقدار کمی برخوردار است.

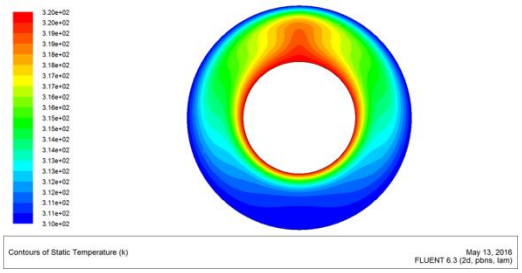


شکل۳- کانتور دمایی با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^3

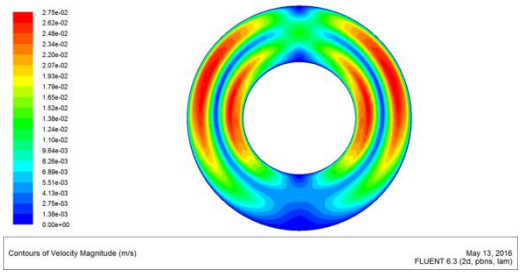


شکل۴- کانتور سرعت با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^3

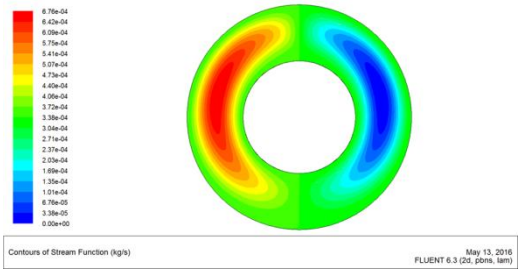
با توجه به تعریف عدد رایلی که در معادله ۶ نیز بیان شد، طول مشخصه و اختلاف دمای بین دو دیواره دو پارامتر مهم و تأثیر گذار بر مرتبه عدد رایلی هستند. که در اکثر مواقع با استفاده از این دو پارامتر اثر تغییرات عدد رایلی مطالعه می‌شود. در این بخش تغییرات اثر رایلی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد با استفاده از تغییر در اختلاف دمای بین دو دیواره بررسی شده است. لازم به ذکر است که با تغییر در اختلاف دمای بین دو دیواره، خواص ترموفیزیکی که در دمای فیلم محاسبه می‌شدند نیز تغییر می‌کند که این تغییرات نیز در این پژوهش در نظر گرفته شده است. در این حالت دو دیواره داخلی و خارجی به صورت دما ثابت و با دماهای به ترتیب ۳۲۰ و ۳۱۰ کلوین در نظر گرفته شده‌اند. همانطور که در شکل ۳ و ۵ ملاحظه می‌کنید، با افزایش عدد رایلی میزان نفوذ و اندازه سرعت افزایش می‌یابد، همچنین حرکت سیال به خوبی قابل مشاهده است. این امر بدان علت است که با گرم شدن هوای مجاور دیوار داخلی و به وجود آمدن تغییرات چگالی، هوای گرم به سمت بالا حرکت کرده و پس از سرد شدن به سمت پایین باز می‌گردد.



شکل۵- کانتور دمایی با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^4

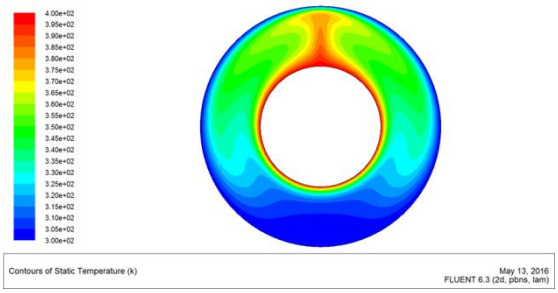


شکل۶- کانتور سرعت با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^4



شکل۷- کانتور تابع جریان با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^4

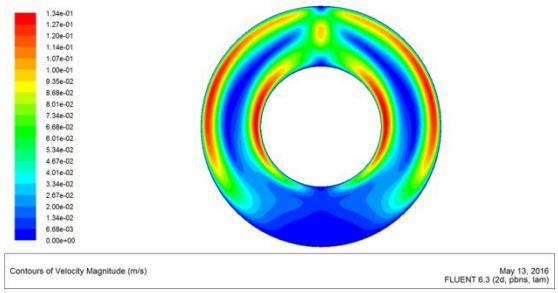
همانگونه که اشاره شد، به منظور بررسی اثر عدد رایلی سه عدد رایلی با مرتبه‌های مختلف مطالعه شدند، که نتایج برای عدد رایلی از مرتبه 10^5 در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است. در این حالت دمای دیواره-های داخلی و خارجی به ترتیب ۴۰۰ و ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده-اند.



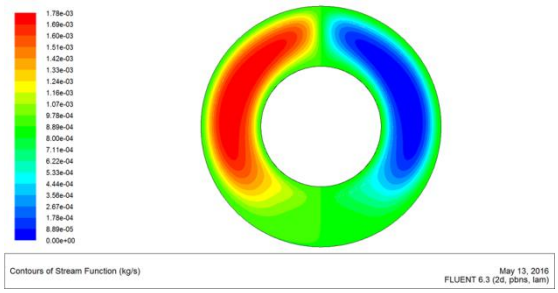
شکل۸- کانتور دمایی با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه 10^5

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]



شکل۹- کانتور سرعت با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۵}$



شکل۱۰- کانتور تابع جریان با سیال عامل هوا در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۵}$

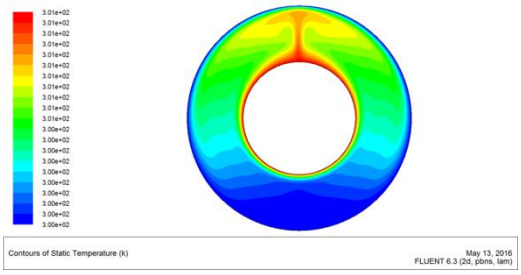
همانگونه که از شکل‌های ۳ تا ۱۰ مشاهده می‌کنید، با افزایش عدد رایلی نفوذ دمایی و اندازه سرعت افزایش می‌یابد، بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که انتقال حرارت جابجایی آزاد با افزایش عدد رایلی افزایش می‌یابد. همچنین میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای رایلی‌های مختلف در جدول ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

جدول۳- میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت در عدد رایلی‌های مختلف برای سیال عامل هوا

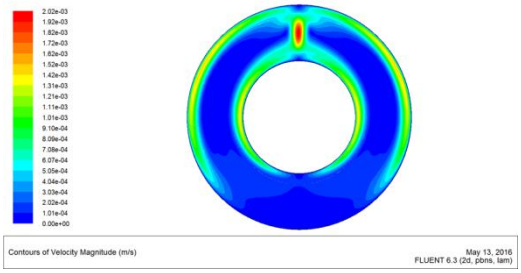
Ra	$q\ (W)$	Nu
$۱۰^{۳}$	۰.۲۵	**۲.۲۷**
$۱۰^{۴}$	۳.۹۹	**۳.۴۸**
$۱۰^{۵}$	۸۶.۸۸	**۶.۹۱**

۳- ۲- نتایج شبیه‌سازی برای آب خالص

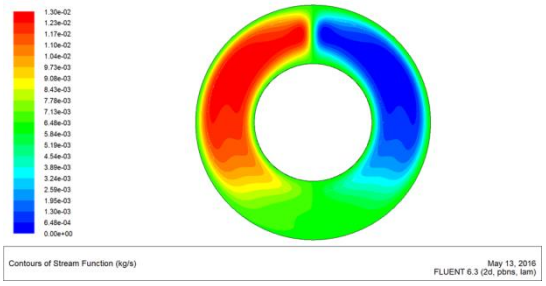
یکی از اهداف مهم این پروژه بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال با سیال پایه آب خالص است، بنابراین در ابتدا به شبیه‌سازی آب خالص نیاز است تا نتایج نانوسیالات مختلف با آن مقایسه شود. بدین منظور بررسی‌ها برای آب خالص صورت گرفته و نتایج آن در شکل‌های ۱۱ تا ۱۶ برای عددهای رایلی مختلف نشان داده شده است.



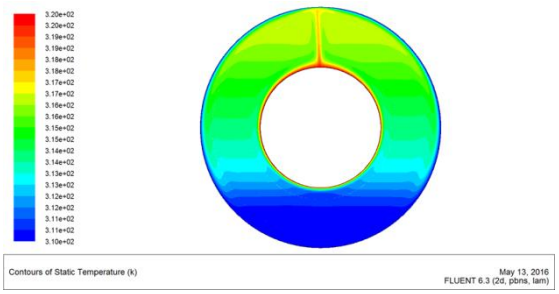
شکل۱۱- کانتور دمایی با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



شکل۱۲- کانتور سرعت با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



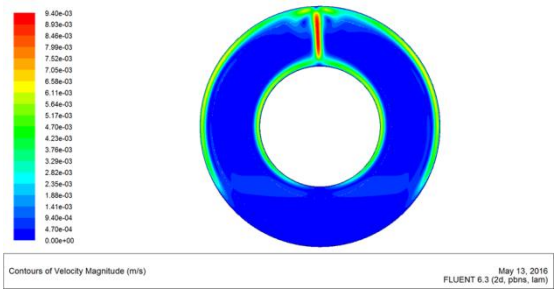
شکل۱۳- کانتور تابع جریان با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



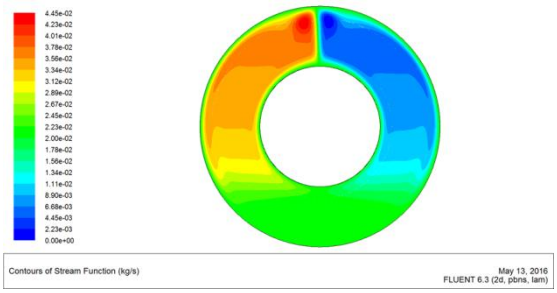
شکل۱۴- کانتور دمایی با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]



شکل۱۵- کانتور سرعت با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$



شکل۱۶- کانتور تابع جریان با سیال عامل آب خالص در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$

همانطور که اشاره شد در این پژوهش با استفاده از تغییر در اختلاف دمای دو دیواره، تغییرات در عدد رایلی بررسی می‌شود. در شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی آزاد آب خالص، اثر عدد رایلی بر میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت نیز بررسی شده و نتایج آن در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به نتایج ارایه شده برای آب خالص مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت همانند هوا افزایش می‌یابد.

جدول۴- میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت در عدد رایلی‌های مختلف برای سیال عامل آب خالص

Ra	$q\ (W)$	Nu
$۱۰^{۶}$	۲۵.۲۶۸۷	**۹.۸۲**
$۱۰^{۷}$	۵۲۶.۲۴۸۱	**۱۹.۸۱**

۳- ۳- بررسی اثر افزودن نانو ذرات

بدین منظور نانو ذرات آلومینا، تیتانیا، اکسید نقره و اکسید مس به سیال پایه آب خالص اضافه شده است. در این مطالعه شبیه‌سازی نانوسیالات به صورت تک فاز بوده و خواص آن‌ها با استفاده از معادلات ارایه شده، محاسبه شده، و در جدول ۵ ارایه شده است. در ابتدا برای کلیه نانو ذرات ذکر شده در یک غلظت و عدد رایلی هم مرتبه بررسی‌ها صورت گرفته و سپس با نتایج بدست آمده با آب خالص مقایسه شده است.

جدول۵- خواص نانوسیالات مختلف

نوع نانو ذره	$\emptyset$	$C_{p,nf}\ (J/Kg.K)$	$k_{nf}\ (W/m.K)$
Cu	۰.۰۵	۲۹۶۳.۲۸	۰.۷۰۹۳
Ag	۰.۰۵	۲۷۷۲.۵۸	۰.۷۰۹۴
TiO_2	۰.۰۵	۳۵۳۹.۰۲	۰.۶۹۰۱
Al_2O_3	۰.۰۵	۳۵۸۷.۵	۰.۷۰۵۱

در این قسمت به بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد برای چهار نانوسیال مختلف پرداخته شده و میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای هر کدام در جدول ۶ نشان داده شده است. ملاحظه می‌کنید که میزان انتقال حرارت با افزودن نانو ذرات به آب خالص افزایش می‌یابد اما عدد ناسلت برای نانوسیال آب-آلومینا از آب خالص کمتر است.

با افزودن نانو ذرات به آب خالص خواص ترموفیزیکی سیال پایه بهبود یافته و این امر باعث می‌شود که میزان انتقال حرارت نسبت به آب خالص افزایش یابد. اما مقدار عدد ناسلت تابعی از میزان انتقال حرارت و ضریب هدایت گرمایی است، هر چند که میزان انتقال حرارت نسبت به آب خالص افزایش یافته اما ضریب هدایت گرمایی نیز افزایش می‌یابد و این باعث شده که در بعضی مواقع با وجود اینکه میزان انتقال حرارت افزایش یافته است، عدد ناسلت کاهش یابد.

جدول۶- میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای نانوسیالات مختلف در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$

نانوذرات	$q\ (W)$	Nu
$Water$	۵۲۶.۲۴۸۱	**۱۹.۸۱**
Al_2O_3	۵۸۱.۷۹۱۱	**۱۹.۷۰**
TiO_2	۵۷۲.۹۲۶۶	**۱۹.۸۲**
Ag	۵۸۸.۷۷۵۸	**۱۹.۸۲**
Cu	۵۸۸.۸۹۶۷	**۱۹.۸۲**

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

۳- ۴- بررسی اثر غلظت نانو سیال

میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای غلظت‌های مختلف نانوسیال آب-آلومینا در جدول ۷ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌کنید با افزایش غلظت نانوسیال به دلیل اینکه خواص ترموفیزیکی آن بهبود می‌یابد، میزان انتقال حرارت افزایش پیدا می‌کند. اما با افزایش غلظت نانوسیال، کاهش عدد ناسلت مشاهده شده است.

ضریب هدایت گرمایی سیال از پارامترهای تأثیر گذار بر عدد ناسلت است، که با افزایش غلظت نانوسیال افزایش می‌یابد، از طرفی این ضریب در مخرج کسر عدد ناسلت است، بنابراین این امر سبب شده که هر چند با افزایش غلظت نانوسیال میزان انتقال حرارت افزایش پیدا کرده ولی این افزایش نتوانسته بر کاهشی که ناشی از افزایش ضریب هدایت گرمایی است غلبه کند.

جدول۷- میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای غلظت‌های مختلف نانوسیال آب-آلومینا در در عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$

نانوذرات	$q\ (W)$	Nu
$\boldsymbol{Water}$	۵۲۶.۲۴۸۱	**۱۹.۸۱**
$\boldsymbol{Al_2O_3 - 0.05}$	۵۸۱.۷۹۱۱	**۱۹.۷۰**
$\boldsymbol{Al_2O_3 - 0.1}$	۶۰۳.۳۴۵۰	**۱۷.۸۶**

۳- ۵- بررسی اثر عدد رایلی بر انتقال حرارت نانو سیال

به منظور بررسی اثر عدد رایلی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال، از نانوسیال آب-آلومینا در دو عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$ و $۱۰^{۷}$ استفاده شده است. همانگونه که ذکر شد، با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت برای هوا و آب افزایش پیدا می‌کرد. بنابراین شبیه‌سازی همانند قبل با استفاده از تغییر در اختلاف دمای دو دیواره برای نانوسیال آب-آلومینا صورت گرفته است.

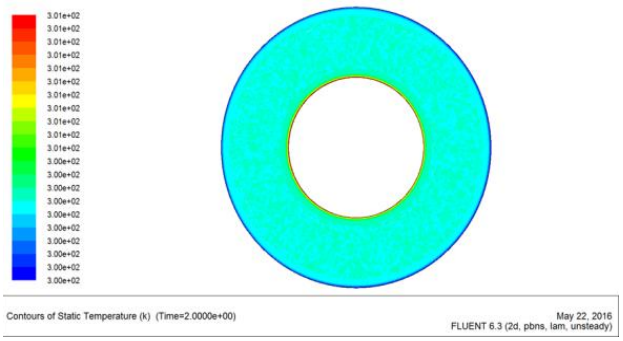
با توجه به جدول۸ مشاهده می‌کنید که با افزایش عدد رایلی برای نانوسیال نیز همانند آب و هوا میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. از طرفی ملاحظه می‌کنید که در رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$ نیز میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت نانوسیال آب-آلومینا بهتر از آب خالص است.

جدول۸- میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت در عدد رایلی‌های مختلف برای آب خالص و نانوسیال آب-آلومینا

نانوذرات	Ra	$q\ (W)$	Nu
$\boldsymbol{Water}$	$۱۰^{۶}$	۲۵.۲۶۸۷	**۹.۸۲**
$\boldsymbol{Water}$	$۱۰^{۷}$	۵۲۶.۲۴۸۱	**۱۹.۸۱**
$\boldsymbol{Al_2O_3 - 0.05}$	**$۱۰^{۶}$**	**۲۸.۴۰۶۴**	**۹.۹۰**
$\boldsymbol{Al_2O_3 - 0.05}$	**$۱۰^{۷}$**	**۵۸۱.۷۹۱۱**	**۱۹.۷۰**

۳- ۶- بررسی انتقال حرارت گذرا

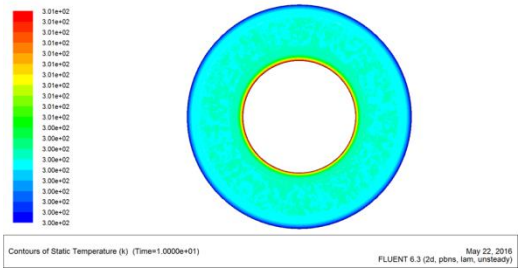
به منظور حل گذرای انتقال حرارت جابجایی آزاد درون هندسه مورد نظر همانند شبیه سازی برای حل دایمی گام‌های مختلف صورت می‌پذیرد. با این تفاوت که در قسمت انتخاب حل‌گر به جای جریان دایمی جریان گذرا در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن جریان به صورت گذرا، گام زمانی که از پارامترهای مهم در حل گذراست پدیدار می‌گردد. که در این تحقیق این گام زمانی با استفاده از عدد کورانت محاسبه شده و ۰/۲ ثانیه در نظر گرفته شده است. نتایج حل گذرا برای دو عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$و$۱۰^{۷}$ در شکل‌های ۱۷ تا ۲۵ نشان داده شده است.



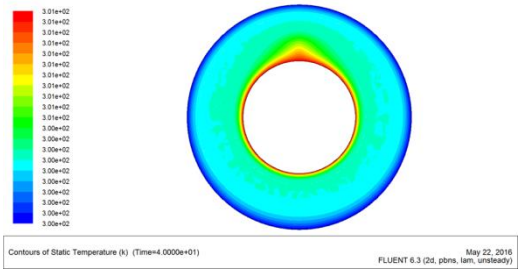
شکل۱۷- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۲ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$

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

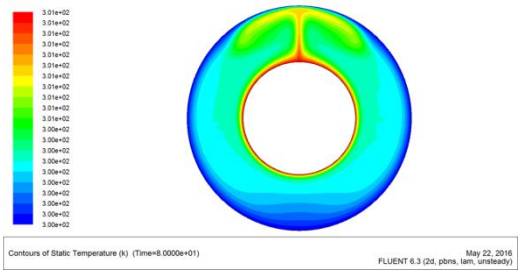
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]



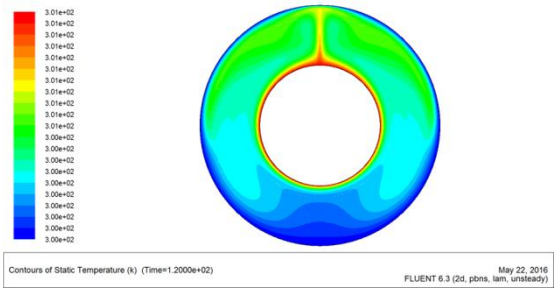
شکل۱۸- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۱۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



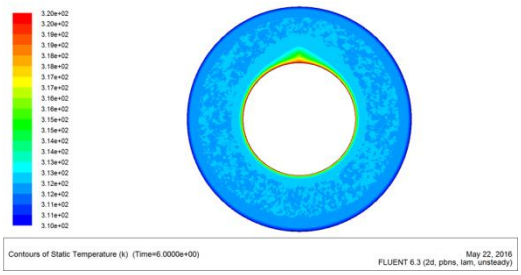
شکل۱۹- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۴۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



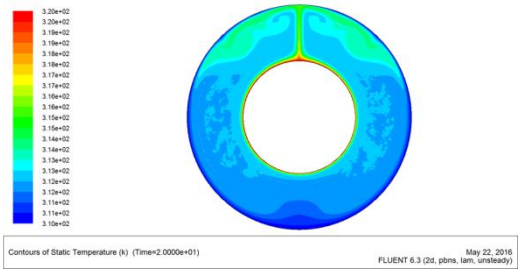
شکل۲۰- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۸۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



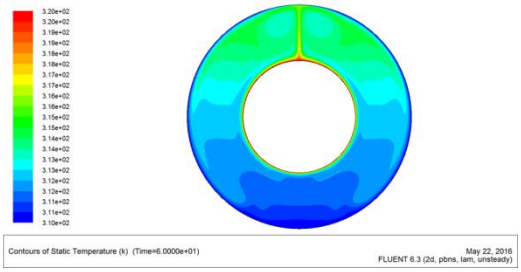
شکل۲۱- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۱۲۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۶}$



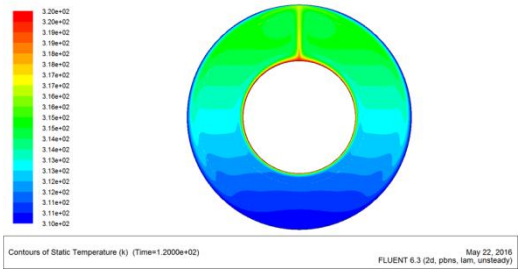
شکل۲۲- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۶ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$



شکل۲۳- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۲۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$



شکل۲۴- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۶۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$



شکل۲۵- کانتور دمایی برای آب خالص در زمان ۱۲۰ ثانیه اول و عدد رایلی از مرتبه $۱۰^{۷}$

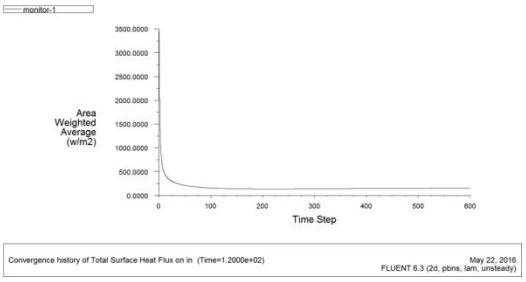
همانگونه که قبلا ذکر شد با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت بیشتر می‌گردید. در حالت گذرا نیز همانند حالت دایمی این امر برقرار

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

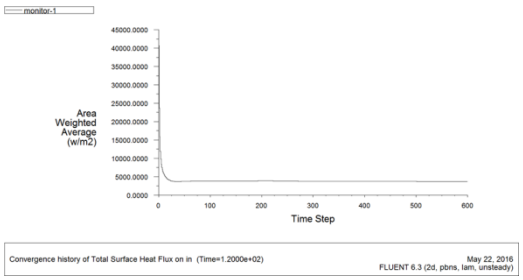
[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

است. نفوذ گرمایی با افزایش عدد رایلی بیشتر می‌شود. که این امر نیز می‌تواند یکی از علل بهبود انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی باشد.

به منظور بررسی اثر عدد رایلی بر سرعت پایا شدن نمودارهای شار حرارتی بر حسب گام زمانی در حل گذرا رسم شده و در شکل‌های ۲۶ و ۲۷ نشاند داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش عدد رایلی مدت زمان پایا شدن افزایش می‌یابد. این امر بدان علت است که با افزایش عدد رایلی جریان از حالت آرام به جریان مغشوش نزدیک‌تر می‌گردد، بنابراین مدت زمان بیشتری نیاز است تا حل پایا گردد.



شکل۲۶- نمودار شار گرمایی بر حسب گام زمانی برای عدد رایلی از مرتبه 10^6



شکل ۲۷- نمودار شار گرمایی بر حسب گام زمانی برای عدد رایلی از مرتبه 10^7

۴- نتیجه گیری

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد برای سه سیال هوا، آب و چهار نانوسیال آب-آلومینا، آب-تیتانیا، آب-اکسید مس و آب-اکسید نقره در عدد رایلی‌های مختلف بررسی شد. به منظور مشاهده رفتار سیال برحسب زمان و اثر عدد رایلی بر مدت زمان لازم برای پایا شدن، انتقال حرارت جابجایی آزاد به صورت گذرا نیز بررسی شد. در زیر به اثر پارامتر-های بررسی شده، اشاره می‌شود:

۱. با افزایش عدد رایلی میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت برای هوا، آب خالص و نانوسیالات افزایش می‌یابد.
۲. استفاده از نانوسیالات در بین دو دیواره باعث افزایش میزان انتقال حرارت می‌شود.
۳. با توجه به نمودار های بدست آمده میزان انتقال حرارت با افزایش کسر حجمی نانو سیال افزایش می یابد. و از این رو خنک کاری هرچه بهتر صورت می گیرد.
۴. از میان نانو ذرات آلومینا، تیتانیا، اکسید نقره و اکسید مس، نانوسیالات آب-اکسید مس و آب-تیتانیا به ترتیب بیشترین و کمترین میزان انتقال حرارت را داشتند.
۵. در حالت گذرا نیز همانند حالت دایمی، انتقال حرارت با افزایش عدد رایلی افزایش پیدا می‌کند.
۶. با افزایش عدد رایلی مدت زمان لازم برای پایا شدن افزایش می‌یابد.

.

فهرست علامت‌ها

A	مساحت، m^2
a	شتاب، m/s^2
cp	گرمای ویژه، $J/kg.k$
d	قطر، m
Gr	عدد گراشف
g	شتاب گرانش، m/s^2
H	ارتفاع دیواره عمودی، m
K	ضریب هدایت حرارتی، $W/m.k$
KB	ثابت بولتزمن
Nu	عدد ناسلت
Pe	عدد پکلت
Ra	عدد رایلی
Re	عدد رینولدز
T	دما، k
V	سرعت، m/s

علایم یونانی

β	ضریب انبساط حرارتی، $1/k$
μ	لزجت دینامیکی، $kg/m.s$

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]

θ	دمای بی بعد
ρ	چگالی، m/gk^3
Φ	کسر حجمی ذره

زیرنویس ها

f	سیال
nf	نانوسیال
P	ذره و فازثانویه

مراجع

[1] S. Z. Heris, S. G. Etemad, and M. N. Esfahany (2006) "Experimental investigation of oxide nanofluids laminar flow convective heat transfer," *International Communications in Heat and Mass Transfer,* 33: 529-535.

[2] R. B. Mansour, N. Galanis, and C. T. Nguyen (2007) "Effect of uncertainties in physical properties on forced convection heat transfer with nanofluids," *Applied Thermal Engineering,* 27: 240-249.

[3] R. Ben Mansour, N. Galanis, and C. Nguyen (2009) "Developing laminar mixed convection of nanofluids in an inclined tube with uniform wall heat flux," *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow,* 19: 146-164.

[4] K. S. Hwang, S. P. Jang, and S. U. Choi (2009) "Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al 2 O 3 nanofluids in fully developed laminar flow regime," *International journal of heat and mass transfer,* 52: 193-199.

[5] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, and C. Lin (2010) "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study," *International Journal of Thermal Sciences,* 49: 1345-1353.

[6] C. Ho, W. Liu, Y. Chang, and C. Lin (2010) "Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: an experimental study," *International Journal of Thermal Sciences,* 49: 1345-1353.

[7] G. Polidori, S. Fohanno, and C. Nguyen (2007) "A note on heat transfer modelling of Newtonian nanofluids in laminar free convection," *International Journal of Thermal Sciences,* 46: 739-744.

[8] N. Putra, W. Roetzel, and S. K. Das (2003) "Natural convection of nano-fluids," *Heat and Mass Transfer,* 39: 775-784.

[9] M. Akbari, A. Behzadmehr, and F. Shahraki (2008) "Fully developed mixed convection in horizontal and inclined tubes with uniform heat flux using nanofluid," *International Journal of Heat and Fluid Flow,* 29: 2545-556.

[10] A. K. Santra, S. Sen, and N. Chakraborty (2008) "Study of heat transfer augmentation in a differentially heated square cavity using copper–water nanofluid," *International Journal of Thermal Sciences,* 47: 1113-1122.

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

[12] C.-J. Ho, M. Chen, and Z. Li (2008) "Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity," *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 51: 4506-4516.

[13] D. A. Drew, and S. L. Passman (1999) *Theory of multicomponent fluids*: Springer.

[14] B. C. Pak, and Y. I. Cho(1998) "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Experimental Heat Transfer an International Journal,* 11: 151-170.

[15] Y. Xuan, and W. Roetzel (2000) "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids," *International Journal of heat and Mass transfer,* 43: 3701-3707.

[16] C. H. Chon, K. D. Kihm, S. P. Lee, and S. U. Choi (2005) "Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al 2 O 3) thermal conductivity enhancement," *Applied Physics Letters,* 87: 153107-153107-3.

[17] H.Brinkman (1952) "The viscosity of concentrated suspensions and solutions," *The Journal of Chemical Physics,* 20: 571-571.

[18] G. Raithby, and K. Hollands (1975) "A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems,"

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1398.6.2.2.4]