

## اثر بافل و نانو سیال بر انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظه

ایمان پیشکار دهکردی

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*e.pishkar@pnu.ac.ir*

امین میرزاخانی نافچی

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*Amin.Mirzakhani@yahoo.com*

### چکیده

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مربعی شامل دو بافل به روش عددی بررسی شده است. دیوار سمت چپ در دمای گرم و دیواره سمت راست در دمای سرد و سایر دیواره ها عایق می باشند. معادلات حاکم به روش حجم کنترل جبری شده و توسط الگوریتم سیمپل به طور همزمان حل می شود. بافل ها در حالت اول روی دیواره گرم و در حالت دوم روی دیواره سرد قرار گرفته اند و اثر انتقال حرارت آنها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند که چیدمان بافل ها می تواند تاثیر بسزایی بر انتقال حرارت محفظه داشته باشد. در این مقاله هم چنین اثر چهار نانوسیال مختلف بررسی شده است و نشان داده شده است که انتقال حرارت نانوسیال با ذرات مس و نقره بیشتر از وقتی است که از نانو ذرات آلومینا و تیتانیوم استفاده شود.

کلید واژه ها: انتقال حرارت، نانوسیال، بافل، الگوریتم سیمپل

### مقدمه

مساله انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه بسته بدلیل کاربرد های فراوان آن در مهندسی مانند خنک کاری قطعات الکترونیکی، تهویه ساختمانها، کلکتورهای خورشیدی و رآکتورهای هسته ای همیشه مورد توجه محققین قرار داشته است. از جمله این تحقیقات می توان به کار وارول و همکاران [1] اشاره کرد که تاثیر حضور مانع

در کف محفظه مثلثی به کمک روش اختلاف محدود را تحقیق کردند و تاثیر شرایط مرزی متفاوت بر خطوط جریان و همدمای را مشاهده نمودند.

با روی کار آمدن ابرایانه ها و میکروچیپ های الکترونیکی، انتقال حرارت از مدارهای الکترونیکی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفت. همین امر راه را برای ورود به عرصه جدیدی از تکنولوژی تحت عنوان نانوسیال هموار کرده است. نانوسیال توانایی انتقال حجم بالای حرارت در فضای کم را دارا می باشد. در زمینه جابجایی آزاد نانوسیال و کاربرد های آن می توان به تحقیقات امین الساداتی و قاسمی [2] و عارف منش و همکاران [3] اشاره کرد. عمدتاً در این تحقیقات مشاهده شده است که افزایش درصد حجمی نانو ذرات به سیال پایه، انتقال حرارت را تقویت می کند.

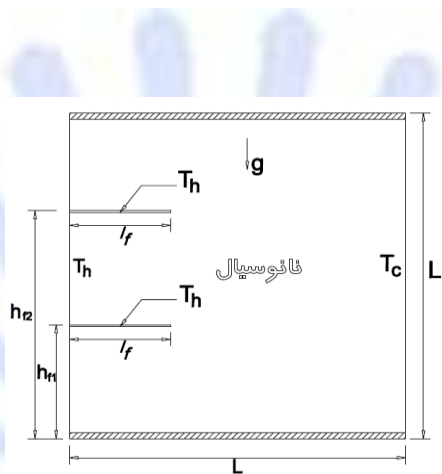
برخی از محققین با قرار دادن بافل در محفظه میزان تغییر در نرخ انتقال حرارت از آن را بررسی کرده اند. در این میان می توان به تحقیقات کانداسوامی و همکارانش [4] اشاره کرد. در این مقاله بطور عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک محفظه مربعی با دو بافل عمود بر هم بررسی شده است. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش طول بافل عمودی انتقال حرارت افزایش می یابد. این در حالی است که افزایش طول بافل افقی زمانی باعث افزایش انتقال حرارت می شود که پایین تر از مرکز محفظه قرار گیرد. بیلگن [5] انتقال حرارت در محفظه با فین نازکی که روی دیواره گرم قرار دارد را به طور عددی بررسی کرده است و اثر موقعیت و اندازه فین را بر روی نرخ انتقال حرارت پیش بینی کرده است. او دریافته است که عدد نوسلت با افزایش طول فین کاهش می یابد.

علی رغم کارهای زیادی که در زمینه جابجایی آزاد حتی در محفظه های دارای بافل انجام گرفته است، به نظر می رسد هنوز به دلیل کاربردهای فراوان این پدیده کاستی های زیادی وجود دارد. به همین دلیل در کار حاضر محفظه ای حاوی نانو سیال با دو بافل، که در مطالعات قبلی به چشم نمی خورد، تعریف شده است. در این بررسی تاثیر پارامترهایی همچون عدد ریلی، موقعیت بافل ها و نوع نانوسیال بر میدان جریان و نرخ انتقال حرارت بررسی شده است. همانطور که می دانیم تهیه نانوسیال هزینه زیادی دارد به خصوص هنگامی که از ذرات نقره به عنوان نانو ذره استفاده کنیم. ولی در این مقاله مشخص کرده ایم که در چه شرایطی می توان نانوسیالات ارزانتر استفاده کرد.

## بیان مسئله

در مسئله حاضر، یک محفظه مربعی شکل پر شده از نانو سیال آب و مس مطابق شکل (1) در نظر گرفته می شود. که دیواره سمت راست در دمای سرد  $T_c$  و دیواره مقابل در دمای گرم  $T_h$  است. سایر دیواره های محفظه عایق حرارتی است. هم چنین دو بافل نازک بر روی دیواره گرم محفظه وجود دارد که در دمای گرم  $T_h$  می باشند. در بررسی موقعیت بافل ها این بافل ها می توانند به دیواره سرد نیز متصل شوند. در این صورت دمای آنها برابر دمای دیواره سرد  $T_c$  در نظر گرفته می شود. شتاب گرانشی  $g$ ، در جهت منفی  $y$  عمل می کند. فرض شده که در دیواره ها

شرط عدم لغزش بر قرار است. هدف بررسی اثر افزایش درصد حجمی نانو ذرات و تغییر موقعیت بافل ها در اعداد ریلی مختلف است.



شکل 1: هندسه مسئله

#### معادلات حاکم بر مسئله

معادلات بدون بعد حاکم برای جریان آرام و دائم نانو سیال با فرض تقریب بوزینسک و فرض تعادل گرمایی و هیدرودینامیکی بین نانو ذرات و سیال به صورت زیر می باشند:

پیوستگی:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

معادلات مومنتم در جهت X, Y:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) + \frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra.Pr.\theta \quad (3)$$

انرژی:

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

متغیرهای بی بعد استفاده شده در معادلات به شرح زیرند:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad U = \frac{uL}{\alpha_f}, \quad V = \frac{vL}{\alpha_f}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c}, \quad P = \frac{\overline{PL}^2}{\rho_{nf} \alpha_f^2}$$

اعداد بدون بعد ریلی و پرانتل به صورت زیر تعریف می شوند:

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, \quad Ra = \frac{gL^3 \beta_f (T_h - T_c)}{\alpha_f \nu_f}$$

که  $\beta_f$  ضریب انبساط گرمایی و  $\alpha_f$  ضریب پخش حرارتی برای سیال پایه می باشد. همچنین  $\nu_f$  لزجت سینماتیک سیال پایه است. محاسبه خواص نانو سیال شامل چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی، ضریب پخش حرارتی به ترتیب از روابط زیر استفاده می شود:

$$\alpha_{nf} = k_{nf} / (\rho C_p)_{nf} \quad (9) \quad \rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_f + \phi \rho_p \quad (7)$$

$$(\rho \beta)_{nf} = (1 - \phi) (\rho \beta)_f + \phi (\rho \beta)_p \quad (10) \quad (\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi) (\rho C_p)_f + \phi (\rho C_p)_p \quad (8)$$

ضریب ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال توسط رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$\mu_{nf} = \mu_f (1 - \phi)^{-2.5} \quad (11)$$

و ضریب هدایت حرارتی آن توسط رابطه ماکسول [2] محاسبه می گردد.

$$k_{nf} = k_f \left[ \frac{(k_p + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_p)}{(k_p + 2k_f) + \phi(k_f - k_p)} \right] \quad (12)$$

در روابط فوق منظور از nf نانوسیال، f سیال خالص، p نانوذرات مس و  $\phi$  در صد حجمی نانو ذرات می باشد. عدد پرانتل آب 6.2 در نظر گرفته شده و خواص ترموفیزیکی آب و مس از مرجع [3] آورده شده است. شرایط مرزی:

شرایط مرزی برای حل معادلات به صورت زیر بیان می شوند:

$$U = 0, \quad V = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{در دیواره بالا و} \quad U = 0, \quad V = 0, \quad \theta = 1 \quad \text{در دیواره سمت چپ}$$

### پایین

در دیواره سمت  $U=0$  ،  $V=0$  ،  $\theta=0$  روی بافل  $U=0$  ،  $V=0$  ،  $\theta=1$  راست  
ها

میزان انتقال حرارت در قالب عدد نوسلت قابل بیان است که عدد نوسلت موضعی روی دیواره گرم یا سرد به صورت زیر تعریف می شود:

$$Nu_Y = -\frac{k_{nf}}{k_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{x=0,1} \quad (13)$$

و نوسلت متوسط روی دیواره ی گرم یا سرد از انتگرال گیری معادله ی بالا بصورت زیر بدست می آید:

$$Nu_{m,c} = \int_0^1 Nu_Y(Y) dY = -\frac{k_{nf}}{k_f} \int_0^1 \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)_{X=0,1} dY \quad (14)$$

### روش عددی و کنترل برنامه

برای مدل کردن هندسه مورد نظر برنامه ای به زبان فرترن نوشته شده و اجراهای برنامه انجام شده است. به منظور اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه و تعیین شبکه مناسب برای حالت های مختلف شبکه بهینه جستجو شده است. به عنوان نمونه در محفظه با دو بافل به طول  $L_f = l_f/L = 0.25$  و ارتفاع از کف آنها به ترتیب  $H_{f1} = h_{f1}/L = 0.25$  و  $H_{f2} = h_{f2}/L = 0.75$  برای نانو سیال آب و مس با درصد حجمی 0.03 و عدد ریلی  $10^6$  تغییرات نوسلت متوسط بر روی دیواره سرد و ماکزیمم تابع جریان در محفظه برای شبکه های مختلف در جدول 1 نشان داده شده است. مشاهده می شود که از شبکه  $100 \times 100$  به بعد مقادیر نوسلت متوسط و ماکزیمم تابع جریان [6] تقریباً ثابت می ماند. بنابراین شبکه با تعداد نقاط  $100 \times 100$  به عنوان شبکه بهینه و مناسب برای حل انتخاب شده است و نتایج آن با شبکه های ریزتر تفاوت ندارد.

جدول 1: تاثیر تعداد نقاط بر عدد نوسلت متوسط و ماکزیمم تابع جریان

| Grid | 40×40 | 60×60 | 80×80 | 100×100 | 120×120 |
|------|-------|-------|-------|---------|---------|
|      |       |       |       |         |         |

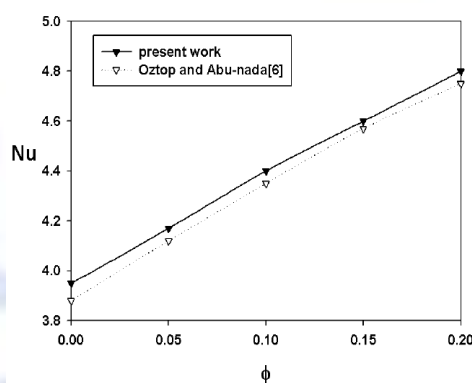


|                |        |        |        |        |        |
|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $Nu_m$         | 10/245 | 10/953 | 10/931 | 10/943 | 10/943 |
| $ \Psi _{max}$ | 26/434 | 23/281 | 22/412 | 22/055 | 22/055 |

برای اطمینان از عملکرد برنامه کامپیوتری، کد حاضر با شرایط مقاله [6] که جابجایی آزاد در یک محفظه پر شده از نانو سیال که قسمتی از دیواره چپ آن در دمای گرم قرار دارد، اجرا شد. نتایج حاصل از برنامه حاضر در شکل (2) با نتایج مقاله فوق مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود اختلاف ناچیز و در حد قابل قبول است.

## نتایج

پس از اطمینان از عملکرد برنامه با در نظر گرفتن نانوسیال مس، اثر چیدمان بافل ها را در عدد رایلی  $10^6$  و نسبت حجمی  $\phi = 0.05$  بر انتقال حرارت از دیواره گرم و سرد بررسی کرده ایم. با توجه به داده های جدول مشاهده می شود که با افزایش فاصله بین بافل ها انتقال حرارت افزایش می یابد. دلیل این موضوع با توجه به خطوط جریان در شکل 3 قابل فهم است، چراکه با افزایش فاصله بافل ها تعداد گردابه های بیشتری تشکیل می شود این افزایش تعداد گردابه ها نقش مهمی در انتقال حرارت دارد. همچنین با توجه به خطوط همدمما رسم شده در شکل 4 انحنای این خطوط مقداری کمتر شده و تماس جریان با سطح زیاد می شود و این امر دلیل بر افزایش انتقال حرارت است.



شکل 2: مقایسه نوسلت بدست آمده از مطالعه حاضر در  $Ra=10^5$  با مرجع [6]

جدول 2: مقایسه نوسلت متوسط روی دیواره گرم و سرد در چیدمان متفاوت بافل ها و نانوسیال مس در  $Ra = 10^6, \phi = 0.05$

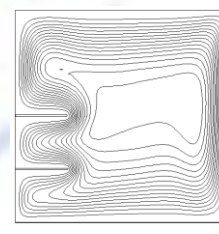
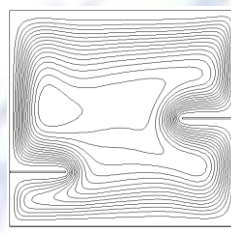
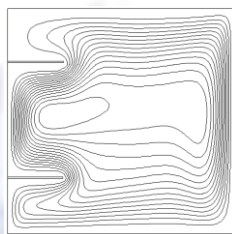
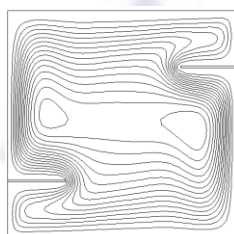
| $Ra = 10^6, \phi = 0.05$       | $Nu_m$  |            |        |
|--------------------------------|---|------------|--------|
|                                | $Nu_{m,h}$                                    | $Nu_{m,c}$ |        |
| $H_{f1} = 0.25, H_{f2} = 0.5$  | هر دو بافل روی دیواره گرم                     | 4/7        | 99/10  |
|                                | یک بافل روی دیواره گرم و دیگری روی دیواره سرد | 127/7      | 98/9   |
| $H_{f1} = 0.25, H_{f2} = 0.75$ | هر دو بافل روی دیواره گرم                     | 271/5      | 137/11 |
|                                | یک بافل روی دیواره گرم و دیگری روی دیواره سرد | 103/7      | 99/10  |

$H_{f1}=0.25, H_{f2}=0.75$

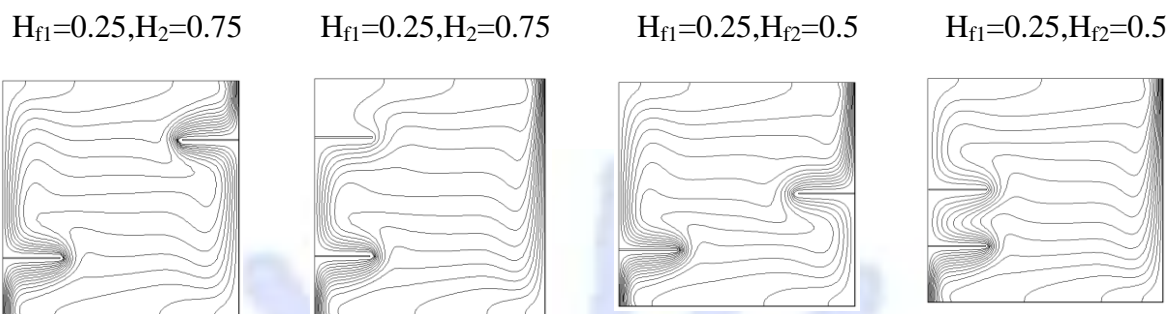
$H_{f1}=0.25, H_{f2}=0.75$

$H_{f1}=0.25, H_{f2}=0.5$

$H_{f1}=0.25, H_{f2}=0.5$

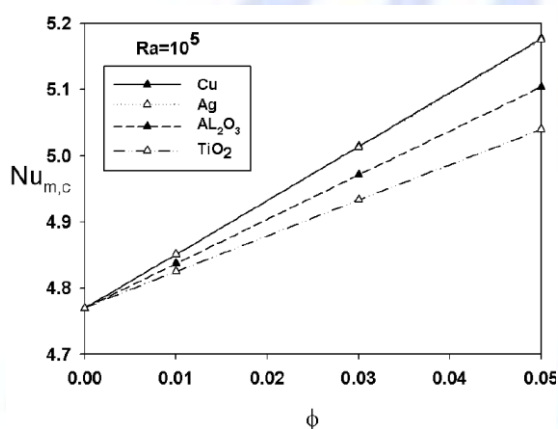


شکل 3: خطوط جریان در محفظه با بافلهای روی دیواره - های یکطرف و روبرو  $Ra=10^6$  و  $\phi = 0.05$

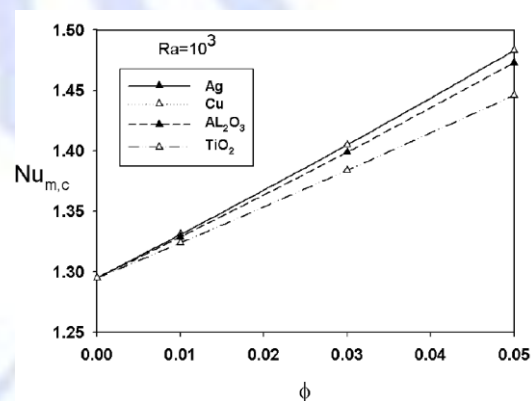


شکل 4: خطوط همدمما در محفظه با بافلها روی دیواره- های یکطرف و روبرو  $Ra=10^6$  و  $\phi = 0.05$

همچنین از جدول مشاهده می شود که با قرار دادن بافل ها روی دیواره های روبرو موجب افزایش انتقال حرارت از سطح گرم و کاهش انتقال حرارت از سطح سرد شده ایم. البته در کل افزایش انتقال حرارت چشمگیر تر بوده و می توان کاهش مربوطه را نادیده گرفت که دلیل آن افزایش سطح تماس مفید و چیدمان مناسب بافل ها می باشد. خطوط همدمما در شکل نیز این موضوع را نشان می دهند. چراکه با حذف بافل روی دیواره گرم، خطوط همدمما متراکم تر شده و به سطح نزدیکتر می گردد. این امر نمایانگر افزایش انتقال حرارت است. از بیانی دیگر می توان گفت که وقتی بافل ها در یک سمت می باشند، جریان در عبور از آنها انرژی خود را نسبت به حالت دو طرفه بودن بسیار بیشتر از دست میدهد. این امر نیز می تواند دلیلی بر کاهش انتقال حرارت در این حالت باشد.



شکل 6: تغییرات عدد نوسلت متوسط روی دیواره سرد بر حسب افزایش درصد حجمی نانو ذره



شکل 5: تغییرات عدد نوسلت متوسط روی دیواره سرد بر حسب افزایش درصد حجمی نانو ذره



در ادامه اثر نانوذرات مختلف (نانو ذره مس، نقره، اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم) بر انتقال حرارت میانگین از دیواره سرد بررسی شده است. مشاهده می شود که در شکل های (5) و (6) تغییرات نوسلت متوسط دیواره سرد را در اعداد رایلی  $10^3$  و  $10^5$  نشان می دهند. که در حالت کلی با افزایش نسبت حجمی نانوذرات در سیال پایه آب انتقال حرارت افزایش پیدا می کند. شیب نمودار برای نانوذرات مس و نقره بیشتر از سایر نانوذرات می باشد که دلیل آن بالابودن ضریب هدایت حرارتی این نانوذره ها نسبت به سایر ذرات می باشد. همچنین از مقایسه دو نمودار متوجه می شویم که با افزایش عدد رایلی انتقال حرارت افزایش پیدا می کند. در نمودار شکل 4 که مربوط به عدد رایلی  $10^3$  می باشد رنج تغییرات نوسلت بین 1.28 و 1.48 می باشد در صورتی که در نمودار شکل 5 که مربوط به عدد رایلی  $10^5$  می باشد رنج تغییرات بین 4.77 تا 5.15 می باشد. با توجه به تعریف عدد رایلی مشاهده می شود که برای داشتن رایلی بزرگتر می توان نوع سیال پایه را عوض کرد و از سیالی با ویسکوزیته کمتر استفاده کرد یا اینکه شرایط مرزی را تغییر داد و اختلاف دمای بین منبع سرد و گرم  $(T_h - T_c)$  را افزایش دهیم. نکته قابل توجه که از شکل (5) و (6) مشخص می باشد این است که در این رنج از عدد رایلی انتقال حرارت نانوذرات مس و نقره برابر می باشد. بنابراین در کاربرد های عملی به جای استفاده از نانوذرات نقره که پر هزینه می باشد می توان از نانوذرات مس استفاده کرد. نتیجه مهم دیگر این است که در اعداد رایلی کوچک میزان انتقال حرارت توسط نانوسیال آب- آلومینا همتراز نانوسیال آب با مس و یا نقره است که دلیل آن بالا بودن انتقال حرارت هدایت یا پخش حرارت نسبت به جابجایی آزاد در اعداد رایلی کوچک می باشد.

### نتیجه گیری و جمع بندی

افزایش فاصله بین بافل ها در محفظه باعث افزایش انتقال حرارت از دیواره های گرم و سرد می شود. همچنین جانمایی صحیح بافل ها در محفظه موجب افزایش انتقال حرارت از دیواره گرم و کاهش ناچیز انتقال حرارت از دیواره سرد می شود که در حالت کلی موجب بهبود انتقال حرارت می شود. بنابر این در کاربرد های عملی مانند انتقال حرارت از قطعات الکترونیکی با فرض ثابت بودن همه شرایط، چیدمان صحیح قطعات می تواند باعث افزایش انتقال حرارت از آنها شده و بازدهی دستگاه را افزایش دهد. از طرفی با افزایش عدد رایلی انتقال حرارت افزایش پیدا می کند که دلیل آن افزایش انتقال حرارت جابجایی آزاد نسبت به هدایت حرارتی می باشد. همچنین در محدوده اعداد رایلی بین  $10^3$  تا  $10^5$  انتقال حرارت نانوذرات مس و نقره برابر بوده و در اعداد رایلی کوچک می توان از نانوذرات آلومینا به جای نانوذرات پرهزینه مانند مس و نقره استفاده کرد که همان کارایی و بازده را داشته باشد و هزینه ها را کاهش دهد.

منابع

- with [1] Varol Y., Oztop H. F., Yilmaz T., "Natural convection in triangular enclosures No. protruding isothermal heater", International Journal of Heat and Mass Transfer, 50 (2007), pp. 2451–2462.
- [2] Aminossadati S. M., Ghasemi B., "Natural convection cooling of a localised heat source at the bottom of a nanofluid-filled enclosure", European Journal of Mechanics B/Fluids, No. 28 (2009), pp.630-640
- [3] Arefmanesh A., Amini M., Mahmoodi M., Najafi M., "Buoyancy-driven heat transfer analysis in two-square duct annuli filled with a nanofluid", European Journal of Mechanics B/Fluids, No.33 (2012), pp. 95–104
- [4] Kandaswamy, P., Jinho, L., Abdul Hakeem, A., K., Saravanan, S., "Effect of baffle–cavity ratios on buoyancy convection in a cavity with mutually orthogonal heated baffles", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 51, pp. 1830–1837, 2008.
- [5] Bilgen, E., "Natural convection in cavities with a thin fin on the hot wall", Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 3493–3505, 2005.
- [6] Oztop, H. F., Abu-Nada, E., "Numerical study of natural convection in partially heated rectangular enclosures filled with nanofluids", Int. J. Heat Fluid Flow, vol. 29, pp. 1326–1336, 2008.