

# تحلیل انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه F شکل

عبدالله خالصی دوست\*<sup>۱</sup>، امیر یدالهی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران  
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سمنان، سمنان، ایران  
\* سمنان، a.khalesi@semnaniau.ac.ir

## چکیده

در این مقاله انتقال حرارت طبیعی برای هندسه F شکل با جریان آرام و تحت شرایط خاص بررسی شده است. شرایط مرزی دیوارهای بالایی عایق و دیواره سمت چپ گرم و دیواره سمت راست سرد می باشد. معادلات مومنوم و انرژی نوشته شده و الگوریتم سیمپل برای حل معادلات استفاده شده است. برای مدل کردن هندسه مورد نظر برنامه ای به زبان فرترن نوشته شده و صحت کد نوشته شده با یکی از مقالات تطبیق داده شده است. در این مقاله تاثیر عواملی چون عدد رایلی، نسبت ابعادی محفظه و نسبت نانوذرات نقره بر میزان و نوع انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش عدد رایلی انتقال حرارت افزایش می یابد. با افزایش نسبت ابعادی محفظه سرعت عمودی و افقی در محفظه کاهش می یابد. با افزایش عدد رایلی تاثیر عدد هارتمن بر انتقال حرارت افزایش خواهد یافت و فقط در نسبت ابعاد ۰/۴ که دیواره گرم به دیواره سرد خیلی نزدیک می شود انتقال حرارت افزایش می یابد.

## کلیدواژگان

نانو سیال، جابجایی آزاد، میدان مغناطیسی، الگوریتم سیمپل

## Natural convection heat transfer analysis of nano-fluid in a F-shaped chamber

Abdollah Khalesidoost\*<sup>1</sup>, Amir Yadolahi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
2- Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran  
\*P.O.B. 3519697951, Semnan, Iran, a.khalesi@semnaniau.ac.ir

## Abstract

In this study has been investigated the natural heat transfer for F-shaped geometry with laminar flow and under certain conditions. The top walls are isolated, and right wall has a hot boundary condition and left walls are cold. Momentum and energy equations written and SIMPLE algorithm was used to solve for the equations. For geometry modeling prepare a program in FORTRAN and for checking of accuracy of written code it was checked with one adapted articles. In this paper, the influence of factors such as Rayly number, Hartman number, aspect ratio and the ratio of silver nano-particles on the heat transfer is investigated. The results show that by increasing the Rayly number increases of heat transfer. The horizontal and vertical speed decreases with increasing aspect ratio compartment. Increasing Rayley number will increase the effect of the influence of Hartmann number and heat transfer. By proportion of aspect ratio equal 0.4 that warm wall temperature too close to the cold wall, heat transfer was increased.

## Keywords

Nano-fluid, Natural convection, magnetic field, SIMPLE algorithm

اول انتقال حرارت از سطح گرم به سطح سرد در اثر جابجایی آزاد صورت می گیرد و در حالت دیگر انتقال حرارت از سطح گرم به سطح سرد در اثر هدایت روی می دهد.

بهبودسازی سیستم های انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به وسیله افزایش سطح آن ها صورت می گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه ها می شود؛ لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک کننده های جدید و موثر نیاز است. سال ها پیش مشخص شده بود که با اضافه نمودن ذرات جامد به صورت معلق به سیال پایه، انتقال حرارت افزایش خواهد یافت چرا که ضریب هدایت حرارتی این ذرات در سیال پایه، انتقال حرارت سیال افزایش قابل ملاحظه ای داشته باشد. ذرات جامدی که به این منظور مورد استفاده قرار می گیرند، در اندازه های نانو متری مورد استفاده قرار گرفته و از انواع مختلفی نظیر ذرات فلزی، غیر فلزی و یا پلیمری می باشند. نانوسیالات به علت افزایش قابل توجه خواص حرارتی، توجه بسیاری از دانشمندان را در سال های اخیر به خود جلب کرده است. این مساله یعنی افزایش ضریب

## ۱- مقدمه

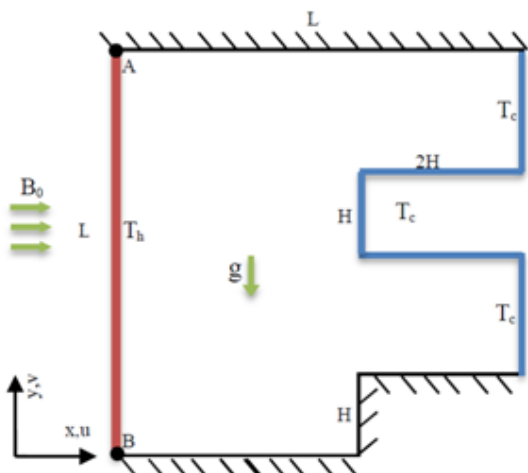
بر اساس طبیعت جریان سیال می توان انتقال حرارت جابجایی را به جابجایی اجباری و جابجایی آزاد تقسیم بندی کرد. در جابجایی اجباری عامل حرکت سیال یک عامل خارجی، مانند پمپ، فن و یا وزش باد است. ولی در جابجایی آزاد (طبیعی) حرکت سیال در اثر نیروهای غوطه وری است که در نتیجه تغییرات جرم حجمی در اثر گرا دیان دما در سیال به وجود می آید. اگر سیالی بین دو صفحه افقی در دماهای متفاوت قرار گرفته باشد دو حالت اتفاق می افتد. در یک حالت دمای صفحه پایینی بیشتر از دمای صفحه بالایی است و در حالت دیگر دمای صفحه پایینی کمتر از دمای صفحه بالایی است. در حالت بیشتر بودن دمای صفحه پایینی چون چگالی در جهت گرانش کاهش می یابد، اگر اختلاف دما از حد بحرانی بیشتر شود شرایط ناپایدار ایجاد می شود. در حالت کمتر بودن دمای صفحه پایینی چون چگالی در جهت نیروی گرانش کم نمی شود، امکان ایجاد جریان چرخشی و شرایط ناپایدار وجود نداشته و حرکت توده سیال به وجود نمی آید. نهایتاً در حالت

با افزایش عدد رینولدز و عدد ریچاردسون و کسر حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش می یابد. مکولاتی<sup>۱</sup> و همکاران [۱۲] به بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب-آلومینا در محفظه C شکل مورب تحت میدان مغناطیسی پرداختند. نتایج نشان می دهد با افزایش عدد هارتمن، تاثیر نانوسیال بر ناسلت متوسط کاهش مییابد.

در این تحقیق نیز به بررسی انتقال حرارت جابجایی آزاد با حضور نانوسیال در یک محفظه جدید که به شکل F می باشد پرداخته شده و با تغییر پارامترهای مختلف نظیر عدد رایلی، نسبت ابعادی محفظه و نسبت نانوذرات، تاثیر این عوامل بر میزان و نوع انتقال حرارت در این هندسه خاص بررسی می گردد.

## ۲- بیان مسأله

مدل فیزیکی که مورد بررسی قرار می گیرد مطابق شکل ۱ محفظه F شکل دو بعدی پر شده از نانوسیال آب-نقره با طول و ارتفاع L می باشد. محفظه تحت تاثیر میدان مغناطیسی ثابت می باشد. دیواره های عمودی سمت چپ در دمای گرم و ثابت  $T_h$  و دیواره های میانی و سمت راست در دمای سرد و ثابت  $T_c$  قرار دارد. همچنین سایر دیواره ها عایق می باشند. نسبت ابعادی را به صورت  $AR=H/L$  در نظر می گیریم. در این تحقیق اثر پارامترهای مختلف بر میدان جریان و دما و نرخ انتقال حرارت بررسی می گردد.



شکل ۱ مدل فیزیکی بررسی شده تحت میدان مغناطیسی

## ۳- معادلات حاکم بر جریان و شرایط مرزی

برای استخراج معادلات حاکم بر رفتار سیال فرضیات ساده کننده زیر را انجام می دهیم:

- ۱- خواص فیزیکی سیال ثابت در نظر گرفته می شود.
  - ۲- حل در یک دستگاه کارتزین  $(x, y)$  دوبعدی مورد بررسی قرار می گیرد.
  - ۳- اتلافات حرارتی لزجت وجود ندارد.
  - ۴- در دیواره های محفظه و هم چنین مرزهای جسم جامد شرط مرزی عدم لغزش به کار رفته است.
- با توجه به فرضیات بالا معادله پیوستگی، معادلات مومنوم در جهت  $x$  و  $y$  و معادله انرژی در حالت دائم به صورت زیر خواهد بود:

هدایت حرارتی سیال با افزودن ذرات ریز به سیال موضوع جدیدی نبوده و از حدود صد سال پیش در رابطه با ذرات میلی متری و میکرومتری مورد توجه قرار گرفته است. نانوسیالات به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شده است. نانوسیالات را می توان با تعریفی این چنین معرفی کرد که، سیالات حاوی ذرات معلق جامد که سبب ایجاد جهشی در پدیده انتقال حرارت می شوند. این نانو ذرات می توانند خواص انتقالی و حرارتی سیال پایه را تغییر دهند.

سیدیک<sup>۱</sup> و همکاران [۱] اثر جابجایی توام روی یک محفظه پر از ذرات با استفاده از شبکه بولتزمن را بررسی کردند. آن ها اثرات عدد گراشوف و اعداد رینولدز را بررسی کردند. نتایج نشان داد که مقدار عدد گراشوف تاثیر قابل توجهی بر روی الگوی جریان و راندمان دارد.

نجم و همکاران [۲] انتقال حرارت جابجایی توام غیردائم در یک کانال افقی با بلوک های مستطیل شکل گرم که به صورت دوره های در دیوار پایینی توزیع شده بودند درحالی که دیوار بالایی را در یک درجه حرارت ثابت پایین قرار داده بودند را بررسی کردند. آن ها اثر عدد رینولدز، عدد رایلی و ارتفاع نسبی بلوک را بررسی کردند.

در برد مدار الکترونیکی یکپارچه با افزایش تراکم بسته، برای اطمینان از عملکرد رضایت بخش اجزای برد الکترونیکی در درجه حرارت بالا، به یک فرآیند خنک کاری موثر نیاز است. استراتژی های متعدد انتقال حرارت نوآورانه به صورت تجربی و عددی در جریان سیال توسط اینکروپرا<sup>۲</sup> [۳] و پترسون و اورتگا<sup>۳</sup> [۴] بیان شده است. در چند دهه گذشته، انتقال حرارت جابجایی توام، علاقه شدیدی در علوم مهندسی و صنعت الکترونیک برای پژوهشگران ایجاد کرده است. هدف اصلی مطالعات پژوهشگران پیدا کردن استراتژی های مختلف جهت افزایش کارایی و خنک کردن حرارت زائدی که در دستگاه های الکترونیکی با هندسه های خاص بوده است [۵-۸].

محمودی و همکاران [۹] اثر محل ورود و خروج روی انتقال حرارت جابجایی توام در داخل محفظه جهت تهویه مناسب در معرض نانوسیال خارجی را بررسی کردند. این مطالعه برای عدد رینولدز (۵۰-۱۰۰۰)، عدد ریچاردسون (۰-۱۰) و کسر حجمی نانوذرات (۰/۵-۰) انجام شد. نتایج آن ها نشان داد که برای مقادیر بالاتر از اعداد رینولدز و ریچاردسون، حضور نانوذرات تاثیر بیشتری بر بهبود عملکرد انتقال حرارت دارد.

مطالعه میدان مغناطیسی کاربردهای مهمی در فیزیک و مهندسی دارد. مسائل انتقال حرارت و انتقال جرم در حضور اثرات میدان مغناطیسی علاقه زیادی از مهندسان و دانشمندان را برای چندین دهه به خود جلب کرده اند.

رحمان و همکاران [۱۰] انتقال حرارت جابجایی توام در یک کانال افقی با حفره باز را مورد مطالعه قرار دادند. تحقیقات انجام شده برای عدد رایلی، عدد رینولدز و عدد هارتمن صورت گرفته است. نتایج آن ها نشان داد که پارامترهای جریان جابجایی توام به شدت بر میدان جریان و دما تاثیر می گذارد، درحالی که در کانال این اثرات کمتر می باشند. برای مقادیر مختلف اعداد رایلی، تاثیر عدد هارتمن بر خطوط جریان و خطوط همدمای قابل توجه است.

کسای پور و همکاران [۱۱] به بررسی انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال در محفظه T شکل تحت میدان مغناطیسی پرداختند. آنها دریافتند

1 . Sidik  
2 . Incropera  
3 . Ortega

4 . Makulati

که  $u_s$  حرکت براونی سرعت نانوذرات می باشد:

$$u_s = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_s^2} \quad (20)$$

که  $k_B = 1.3807 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  ثابت بولتزمن می باشد. زیر نویس های  $\mu_f$  و  $s$  در روابط فوق بترتیب اشاره به خواص نانوسیال، آب و نانوذرات نقره دارد.

با توجه به تعریف اعداد بی بعد پرانتل، رایلی و هارتمن و همچنین پارامترهای بی بعد سرعت، طول و درجه حرارت و ترکیب این اعداد بی بعد با معادلات بقای ممنتوم و انرژی و ساده سازی آنها به معادلات جدید دست یافته که معادله ممنتوم در راستای  $x$  به صورت معادله ۲۱

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] \quad (21)$$

و در راستای  $y$  به صورت معادله ۲۲ خواهد شد.

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] + \quad (22)$$

$$\frac{(\rho\beta)_{nf}}{\rho_{nf} \beta_f} Ra.Pr.\theta - \frac{\rho_f \sigma_{nf}}{\rho_{nf} \sigma_f} Ha^2.Pr.V$$

همچنین معادله انرژی به صورت رابطه ۲۳ به دست خواهد آمد. [۱۳]

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (23)$$

پرانتل آب خالص  $Pr=6.2$  در نظر گرفته شده و خواص آب و نانو ذرات نقره در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب خالص و نانوذرات نقره [۱۴-۱۵]

خواص ترموفیزیکی	نانو ذرات نقره	آب خالص
$\rho$	۱۰۵۰۰	۹۹۷/۱
$C_p$	۲۳۵	۴۱۷۹
$k$	۴۰۰	۰/۶۱۳
$\beta \times 10^5$	۵/۴	۲۱
$\sigma$	$6/3 \times 10^{-7}$	۰/۰۵

شرط مرزی هیدرودینامیکی مساله شرط عدم لغزش و شرط عدم نفوذ بر روی دیواره ها،  $U, V=0$  می باشد. شرط مرزی حرارتی نیز به این صورت می باشد که برای سطح دیوار گرم  $\theta=1$ ، بر روی دیوار سمت راست با دمای سرد  $\theta=0$  و بر روی دیواره های عایق نیز گرادیان دما برابر صفر است. برای حل عددی معادلات حاکم بر مساله، از روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل و الگوریتم سیمپل استفاده می شود. الگوریتم سیمپل نمایانگر روش نیمه ضمنی برای معادلاتی است که توسط فشار به هم مرتبط می باشد. اساس این روش در انتگرال گیری از معادله دیفرانسیل بر روی حجم کنترل (شبکه) استوار بوده و در آن از پروفیل های مختلف در بین نقاط شبکه در محاسبات انتگرال کمک گرفته می شود. به این منظور دامنه حل را به یک سری حجم کنترل که در هر حجم کنترل یک نقطه شبکه قرار دارد تقسیم کرده و به کمک انتگرال گیری معادله دیفرانسیل جبری میگردد.

#### ۴- حل معادلات

روشی که برای حل میدان سرعت بیان شد به نام الگوریتم سیمپل مشهور است. این الگوریتم نمایانگر روش نیمه ضمنی برای معادلاتی است که توسط فشار به هم مرتبط می باشند به این ترتیب که ابتدا مقادیر فشار را حدس زده و به کمک آن معادلات سرعت را حل می کنیم. پس از حل،

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

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

در نوشتن این معادلات سیال غیر قابل تراکم، نیوتنی، لزج و دارای خواص ترموفیزیکی ثابت فرض شده است.

در حضور میدان مغناطیسی، نیروی لورنتس به صورت زیر فعال می شود.

$$F = \vec{J} \times \vec{B} \quad (5)$$

هنگامی که میدان الکتریکی خارجی صفر است و میدان الکتریکی القایی نیز ناچیز است، چگالی جریان الکتریکی طبق قانون اهم با سرعت رابطه دارد.

$$J = \sigma(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (6)$$

بردارهای سرعت و میدان مغناطیسی در مساله مورد نظر عبارتند از:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} \quad (7)$$

$$\vec{B} = B_0\hat{i} \quad (8)$$

لذا نیروی لورنتس را برحسب متغیرهای مساله به صورت رابطه ۹ می توان به دست آورد. [۱۳]

$$F = -\sigma v B_0^2 \hat{j} \quad (9)$$

برای تعمیم معادلات بقا برای محفظه پر شده از نانوسیال، نیاز به دانستن خواص ترموفیزیکی نانوسیال مانند چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت حرارتی، ضریب پخش حرارتی و ضریب هدایت الکتریکی نانو سیال داریم.

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (10)$$

$$C_{p,nf} = (1 - \phi)C_{p,f} + \phi C_{p,s} \quad (11)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (12)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_s \sigma_{nf}}{\sigma_f \sigma_f} = 1 + \frac{3(\gamma-1)\phi}{(\gamma+2) - (\gamma-1)\phi} \quad (14)$$

ویسکوزیته دینامیکی موثر نانوسیال هم توسط رابطه بریکمن به صورت معادله ۱۵ است:

$$\mu_{nf} = \mu_f(1 - \phi)^{-2.5} \quad (15)$$

$K_{nf}$  ضریب هدایت گرمایی نانوسیال است. کهپاتل مدلی برای آن پیشنهاد داده است. برای دو جزء مستقل از ذرات کره ای سوسپانسیون این مدل به صورت رابطه ۱۶ می باشد. [۱۳]

$$k_{nf} = k_f \left[ 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \right] \quad (16)$$

که  $k_s$  و  $k_f$  به ترتیب ضریب هدایتی نانوذرات نقره و سیال خالص می باشند. برای نانوسیال آب-نقره،  $c=25000$  پیشنهاد شده است.

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_s (1 - \phi)} \quad (17)$$

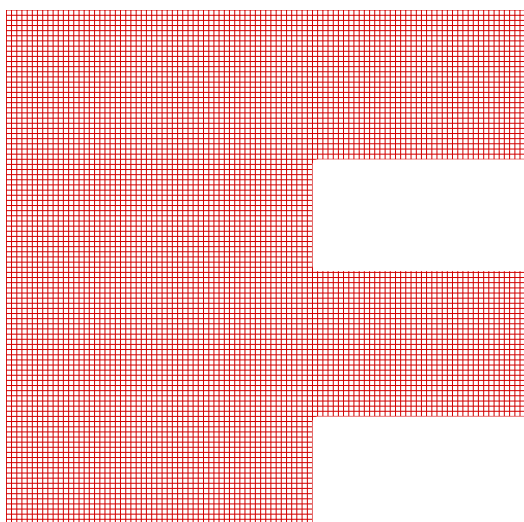
قطر نانوذرات جامد  $ds=100 \text{ nm}$  است و اندازه مولکولی سیال مینا آب به صورت معادله ۱۸ می باشد.

$$d_f = 2\text{\AA} \quad (18)$$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_f} \quad (19)$$

بررسی شد. نمونه ای از این بررسی‌ها به ازای  $Ra=104, 106$  و  $AR=0.2$ ،  $Ha=30$  و  $\phi=0.04$  در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول عدد نوسلت متوسط دیوار گرم ارائه شده است. با توجه به این جدول، مشخص است که تقریباً برای شبکه‌های ریزتر از  $100 \times 100$  جواب‌ها یکسان مانده است. بدین ترتیب شبکه یکنواخت  $100 \times 100$  برای اجرای برنامه انتخاب شده است. همچنین در شکل ۳ نحوه شبکه بندی محفظه را مشاهده می‌کنیم.

شبه	40x40	60x60	80x80	100x100	120x120	شماره
Ra=104	3.253	3.219	3.205	3.200	3.200	Num
Ra=106	17.880	17.821	17.789	17.776	17.774	



شکل ۳ شبکه بندی محفظه مدل سازی شده

#### ۵- تحلیل نتایج

در این قسمت به بررسی اثر عدد ریلی و عدد هارتمن بر میدان جریان و میدان دما و نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد می‌پردازیم. همچنین مقادیر  $AR=0.2$  و  $\phi=0.04$  در نظر گرفته شده است.

در شکل ۴ خطوط جریان و خطوط همدمای در ریلی های مختلف در  $Ha=30$  برای سیال آب و نانوسیال رسم شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد ریلی و در نتیجه افزایش نیروهای شناوری، خطوط جریان به سمت دیواره‌ها کشیده می‌شوند. این امر منجر به افزایش سرعت جریان در نزدیکی دیواره‌ها می‌شود. همچنین در مرکز کانتور، ماکزیمم تابع جریان مشاهده می‌شود. که با افزایش عدد ریلی، گردابه قوی تری تشکیل می‌شود. در اعداد ریلی پایین، که هدایت حاکم است، لایه‌های حرارتی به همراه خطوط همدمای موازی و عمودی در ناحیه مرکزی محفظه تشکیل می‌شوند. با افزایش عدد ریلی، گردابان دما در نزدیکی دیواره‌ها شدیدتر می‌شود و لایه‌های مرزی حرارتی در نزدیکی دیواره‌های گرم و سرد تشکیل می‌شوند.

سرعت‌های بدست آمده باید به گونه‌ای اصلاح شوند تا معادلات پیوستگی ارضا گردد. برای این منظور، پس از شبکه‌بندی مناسب دامنه‌ی حل و اعمال شرایط مرزی عملیات زیر به ترتیب اجرا می‌شوند.

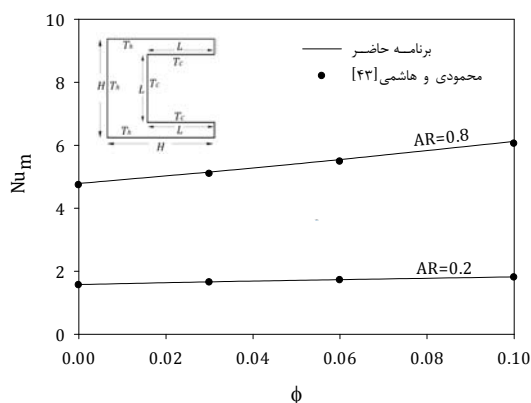
- ۱- میدان فشار  $P^*$  را حدس می‌زنیم.
- ۲- حل معادله های مومنوم جهت محاسبه مقادیر  $U^*$  و  $V^*$
- ۳- حل معادله تصحیح فشار و محاسبه مقادیر فشار
- ۴- تعیین مقادیر  $U$  و  $V$  از معادله های تصحیح سرعت
- ۵- حل معادله دما

با توجه به اینکه اساس الگوریتم حل بر روش تکرار استوار است، از معیار همگرایی طبق رابطه ۱۰ استفاده شده است:

$$\sum_i \sum_j \left[ \frac{\delta^{n+1} - \delta^n}{\delta^{n+1}} \right]_{i,j}^2 \leq 10^{-8} \quad (10)$$

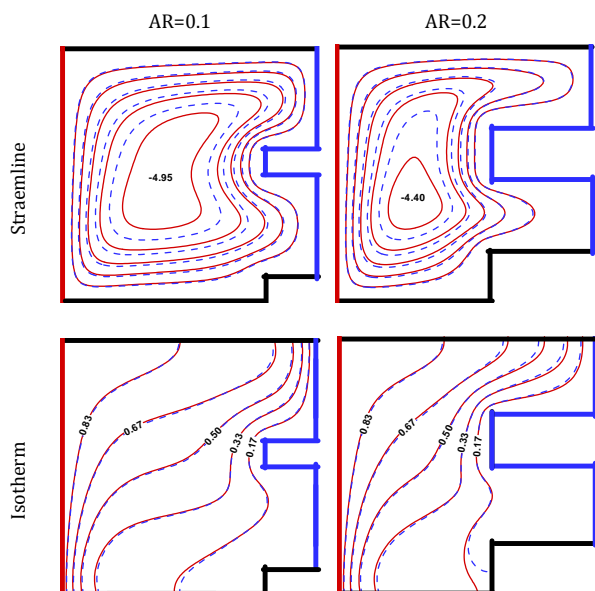
برای مدل کردن هندسه‌های مورد نظر برنامه‌ای به زبان فرترن نوشته شد. معادلات بدون بعد همراه با شرایط مرزی گفته شده به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابه‌جاشده شبکه بندی شده است. جهت حل هم زمان معادلات جبری شده، از الگوریتم سیمپل، که جزئیات کامل آن در مرجع [۱۶] آمده، استفاده شده است. سپس برای اطمینان از عملکرد برنامه کامپیوتری نتایج حاصل از کار حاضر با نتایج مطالعات قبلی مقایسه شده است.

عملکرد برنامه حاضر در مسایل نانوسیال در محفظه شکل دار کنترل شده است. در این بررسی، مقدار نوسلت متوسط در یک محفظه C شکل با سه دیوار داخلی در دمای سرد و سه دیوار خارجی در دمای گرم رسم شده است [۱۷]. در این مقاله از نانوسیال آب-مس استفاده شده است. این مقایسه برای  $Ra=105$  در نسبت ابعادی  $(AR=L/H)$  و درصد نانوذرات مختلف انجام شده است. با توجه به شکل ۲ دیده می‌شود که اختلاف نتایج کار حاضر و مرجع [۱۷] در حد قابل قبول است.



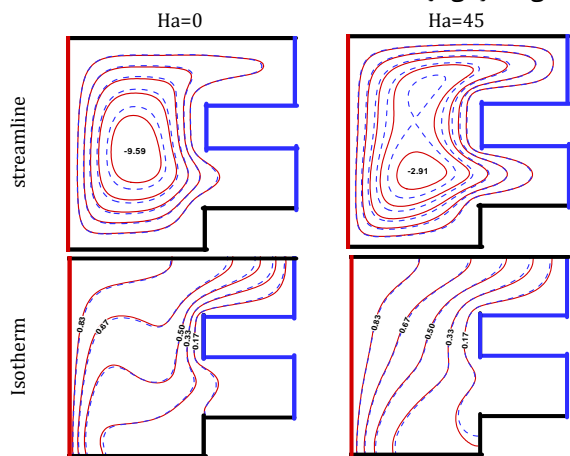
شکل ۲ مقایسه نوسلت متوسط برنامه حاضر با مرجع [۱۷]

جهت حل میدان جریان و دما برنامه ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است. در محاسبات عددی استفاده از شبکه مناسب از اهمیت زیادی برخوردار است، بنابراین لازم است که یک شبکه بندی مناسب جهت انجام محاسبات کامپیوتری انتخاب شود. قبل از بررسی نتایج هندسه مورد نظر لازم است در ابتدا از استقلال نتایج نسبت به شبکه محاسباتی اطمینان حاصل گردد. بدین منظور تاثیر تعداد نقاط شبکه بر عدد نوسلت دیوار گرم برای محفظه در عدد ریلی، عدد هارتمن، نسبت ابعادی و درصد حجمی نانوذرات

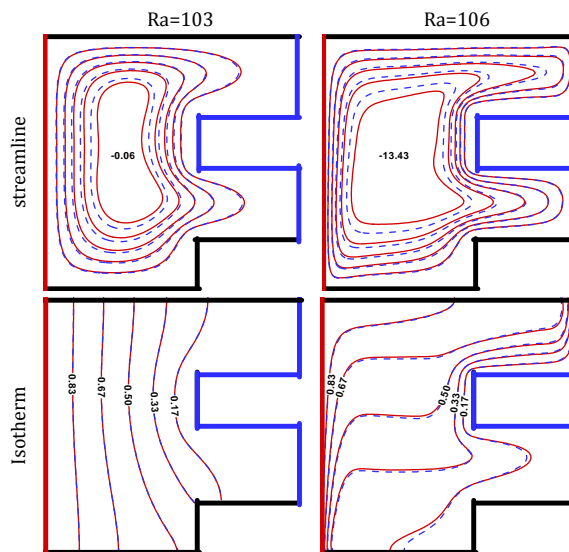


شکل ۶ خطوط جریان و همدمها در نسبت ابعادی های مختلف سیال خالص (—) و نانوسیال (---)

در شکل ۷ خطوط جریان و خطوط همدمها در هارتمن های مختلف در  $Ra=10^5$  برای سیال خالص آب و نانوسیال رسم شده است. نتایج نشان می-دهد با افزایش عدد هارتمن، خطوط جریان به سمت دیوارهای محفظه کشیده می-شوند. این امر منجر به ضعیف شدن گردابه های متقارن می-شود که نشان دهنده کاهش سرعت حرکت جریان است. افزایش میدان مغناطیسی، خطوط جریان را وادار می-کند از حالت پیچیده به سمت خطوط موازی با دیوارهای عمودی متمایل شوند. به عبارتی با افزایش عدد هارتمن، نیروی لورنتس تقویت شده و بر نیروهای شناوری غلبه کرده و انتقال حرارت هدایتی بر رفتار سیال حاکم می-شود. در نانوسیال، با افزایش ضریب هدایت حرارتی، سطح دما بالاتر می-رود. این موضوع باعث کاهش گرادینان دما در نانوسیال نسبت به سیال خالص می-شود. وقتی از نانوسیال استفاده می-کنیم، قابلیت و ظرفیت سیال برای انتقال حرارت افزایش پیدا می-کند و انتقال حرارت هدایتی بیشتر می-شود.

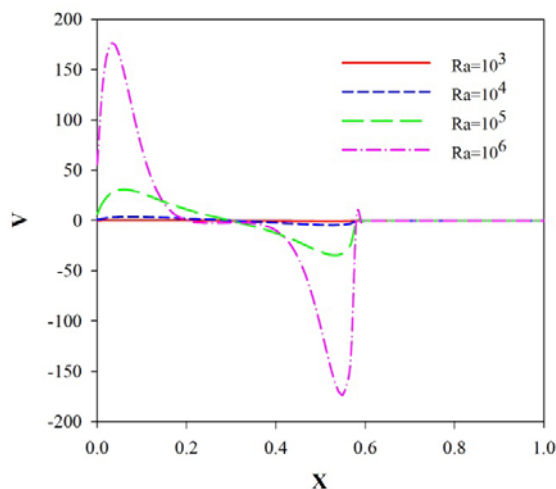


شکل ۷ خطوط جریان و خطوط همدمها در هارتمن های مختلف در  $Ra=10^5$  برای سیال خالص (—) و نانوسیال  $\phi=0.04$  (---)



شکل ۴ خطوط جریان و خطوط همدمها در ریلی های مختلف در  $Ha=30$  سیال خالص (—) و نانوسیال (---)

در شکل ۵ سرعت عمودی  $(Y=0.5)$  برای نانوسیال  $(\phi=0.04)$  به ازای اعداد ریلی مختلف محفظه رسم شده است. نتایج نشان می-دهد با افزایش عدد ریلی، سرعت عمودی در محفظه افزایش می-یابد. دلیل این امر افزایش خاصیت شناوری در محفظه می-باشد.



شکل ۵ سرعت عمودی  $(Y=0.5)$  برای نانوسیال  $(\phi=0.04)$  به ازای اعداد ریلی مختلف  $(Ha=30)$

حال به بررسی اثر نسبت ابعادی محفظه و کسر حجمی نانوذرات بر میدان جریان و میدان دما و نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد می-پردازیم. همچنین در این قسمت  $Ha=30$  و  $Ra=10^5$  در نظر گرفته شده است. در شکل ۶ خطوط جریان و همدمها در نسبت ابعادی مختلف برای سیال پایه (آب خالص) و نانوسیال  $(\phi=0.04)$  رسم شده است. نتایج نشان می-دهد با افزایش نسبت ابعادی محفظه، گردابه جریان در محفظه به دلیل کاهش فضا، کوچکتر می-شود و خطوط جریان در محفظه به دلیل کاهش فضا، به دیوارها نزدیک می-شود.

- [8] Rouijaa, H., El Alami, M., Semma, E., Najam, M., "Natural convection in an inclined T-shaped cavity", *Tech Science Press*, vol. 7, pp. 57-70, 2011.
- [9] Mahmoudi, A. H., Shahi, M., Talebi, F., "Effect of inlet and outlet location on the mixed convective cooling inside the ventilated cavity subjected to an external nanofluid", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp.1158-1137, 2010.
- [10] Rahman, M. M., Parvin, S., Saidur, R., Rahim, N. A., "Magneto hydrodynamic mixed convection in a horizontal channel with an open cavity", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, pp.184-193, 2013.
- [11] Kasaeipoor A, Ghasemi B, Aminossadati SM. Convection of Cu-water nanofluid in a vented T-shaped cavity in the presence of magnetic field. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015 Aug 31;94:50-60.
- [12] Makulati N, Kasaeipoor A, Rashidi MM. Numerical study of natural convection of a water-alumina nanofluid in inclined C-shaped enclosures under the effect of magnetic field. *Advanced Powder Technology*. 2016 Mar 31;27(2):661-72.
- [13] Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C., pp. 113-137, 1980.
- [14] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy, D. D. Ganji, Soheil Soleimani, "Natural convection heat transfer in a cavity with sinusoidal wall filled with CuO-water nanofluid in presence of magnetic field", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 639 (2013) 10-20.
- [15] Elif Buyuk Ogut, "Natural convection of water-based nanofluids in an inclined enclosure with a heat source", *International Journal of Thermal Sciences* 48 (2009) 2063-2073
- [16] Patankar, S.V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publishing Corporation, Washington D. C., pp. 113-137, 1980.
- [17] Mahmoodi, M., Hashemi, S.M., "Numerical study of natural convection of a nanofluid in C-shaped enclosures", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 55, pp. 76-89, 2012.

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق به روش عددی اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان و انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال آب-نقره در محفظه F شکل بررسی گردیده و تاثیر پارامترهای حاکم بر جریان جابجایی آزاد سیال بر میزان انتقال حرارت نیز تحلیل شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش عدد رایلی، انتقال حرارت در محفظه مذکور افزایش یافته و همچنین افزایش عدد رایلی در یک حالت خاص باعث ازدیاد سرعتهای عمودی و افقی سیال در محفظه مذکور می گردد. همچنین نتایج به دست آمده حاکی از آن است که افزایش نسبت ابعادی محفظه مذکور تاثیر معکوس بر سرعت سیال داشته و باعث کاهش سرعتهای افقی و عمودی سیال در محفظه مذکور می گردد. ضمن اینکه افزودن نانو سیال به سیال پایه به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی نانو ذرات باعث افزایش عدد ناسلت شده و در نتیجه تاثیر مستقیم در بهبود انتقال حرارت دارد و همچنین افزایش عدد هارتمن باعث کاهش سرعت عمودی سیال در محفظه و در نتیجه کاهش انتقال حرارت می گردد.

## ۷- فهرست علائم

شتاب جاذبه زمین $m/s^2$	g
ضریب هدایت گرمایی $Wm^{-1}k^{-1}$	K
طول محفظه m	L
عدد نوسلت موضعی $Nu=hL/k$	Nu
فشار سیال Pa	P
فشار بی بعد سیال $P = p/\rho_{nf}v_0^2$	P
عدد رایلی	Ra
دمای K	T
مولفه بدون بعد سرعت	U, V
درصد حجمی نانوذرات جامد	$\phi$
ضریب انبساط حجمی نانوسیال	$(\rho\beta)_{nf}$
ظرفیت حرارتی نانوسیال	$(\rho c_p)_{nf}$
ضریب پخش حرارتی نانو سیال	$(\alpha_{nf})$
ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال	$(\sigma_{nf})$

## ۸- مراجع

- [1] Sidik, N. A. C., Jahanshaloo, L., Safdari, A., "The effect of mixed convection on particle laden flow analysis in a cavity using a Lattice Boltzmann method", *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 67, pp. 52-61, 2014.
- [2] Najam, M., Amahmid, A., Hasanaoui, M., Alami, M. E., "Unsteady mixed convection in a horizontal channel with rectangular blocks periodically distributed on its lower wall", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 24, pp. 726-735, 2003.
- [3] Incropera, F. P., "Convection heat transfer in electronic equipment", *Journal of Heat Transfer*, vol. 110, pp. 1097-1111, 1988.
- [4] Peterson, G. P., Ortega, A., "Thermal control of electronic equipment and devices", *Advances in Heat Transfer*, vol. 20, pp.181-314, 1990.
- [5] [12] Najam, M., El Alami, M., Oubarra, A., "Heat transfer in a "T" form cavity with heated rectangular blocks submitted to a vertical jet: the block gap effect on multiple solutions", *Energy Conversion and Management*, vol. 45, pp. 113-125, 2004.
- [6] Bakkas, M., Amahmid, A., Hasanaoui, M., "Numerical study of natural convection heat transfer in a horizontal channel provided with rectangular blocks releasing uniform heat flux and mounted on its lower wall", *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 2757-2766, 2008.
- [7] Amraqui, S., Mezrhab, A., Abid, C., "Computation of coupled surface radiation and natural convection in an inclined «T» form cavity", *Energy Conversion and Management*, vol. 52, pp. 1166-1174, 2011.