



## مطالعه تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت و تولید انترویی در جابه‌جایی توام نانوسیال آب - مس در یک محفظه‌ی دوزنقه‌ای

علیرضا آقایی<sup>1</sup>، حسین خراسانی‌زاده<sup>2\*</sup>، قنبرعلی شیخ‌زاده<sup>3</sup>

- 1- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان
  - 2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان
  - 3- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و پژوهشکده انرژی، دانشگاه کاشان، کاشان
- \*کاشان، صندوق پستی 87317-51167، khorasan@kashanu.ac.ir

### چکیده

جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی و ترانسفورماتورهای برق، راکتورهای هسته‌ای، بیوشیمی و پدیده‌های فیزیکی مثل زمین‌شناسی مطرح می‌باشد. در این تحقیق اثر میدان مغناطیسی بر میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انترویی جابه‌جایی توام نانوسیال آب-مس با لحاظ اثر حرکت براونی نانوذرات در محفظه‌ی دوزنقه‌ای مطالعه شده است. دیواره‌های جانبی محفظه عایق، دیواره‌ی بالایی سرد و متحرک به سمت راست یا چپ و دیواره‌ی پایینی گرم است و زوایه‌ی دیواره‌های جانبی با افق  $45^\circ$  است. مطالعه در گراش  $10^4$ ، برای اعداد رینولدز 30، 100، 300 و 1000 (ریچاردسون از 11/11 تا 0/01)، اعداد هارتمن 25، 50، 75 و 100 و کسر حجمی‌های 0/04 تا 0/04 از نانوذرات انجام شده است. معادلات حاکم با روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به‌صورت عددی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن حل شده‌اند. نتایج نشان دادند که با اعمال میدان مغناطیسی و افزایش آن، سرعت جابه‌جایی نانوسیال و قدرت جریان کاهش می‌یابد و رفتار از جابه‌جایی توام به آزاد و یا هدایت حرارتی تغییر می‌کند. به‌همین دلیل در همه‌ی اعداد رینولدز و کسر حجمی‌ها با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. در تمام حالت‌های بررسی شده، انترویی تولیدی ناشی از اصطکاک بسیار ناچیز می‌باشد و عمده انترویی تولیدی ناشی از انتقال حرارت برگشت ناپذیر است و همچنین تغییرات انترویی تولیدی کل با عدد هارتمن مشابه تغییرات عدد ناسلت متوسط می‌باشد. تغییر در جهت حرکت درپوش در رینولدز 30 باعث تغییر ناسلت متوسط و انترویی تولیدی کل می‌شود ولی در رینولدز 1000 تأثیر آن ناچیز است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 05 بهمن 1392  
پذیرش: 16 فروردین 1393  
ارائه در سایت: 02 مهر 1393

کلید واژگان:

نانوسیال  
تولید انترویی  
میدان مغناطیسی  
محفظة دوزنقه‌ای  
خواص متغیر

## Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure

Alireza Aghaei, Hossein Khorasanizadeh\*, Ghanbar Ali Sheikhzadeh

Department of Mechanical Engineering, Kashan University, Kashan, Iran  
\* P. O. B. 87317-51167, Kashan, Iran, khorasan@kashanu.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 25 January 2014  
Accepted 5 April 2014  
Available Online 24 September 2014

#### Keywords:

Nanofluid  
Entropy generation  
Magnetic field  
Trapezoidal enclosure  
Variable properties

### ABSTRACT

The flow under influence of magnetic field is experienced in cooling electronic devices and voltage transformers, nuclear reactors, biochemistry and in physical phenomenon like geology. In this study, the effects of magnetic field on the flow field, heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid mixed convection in a trapezoidal enclosure have been investigated. The top lid is cold and moving toward right or left, the bottom wall is hot and the side walls are insulated and their angle from the horizon is  $45^\circ$ . Simulations have been carried out for constant Grashof number of  $10^4$ , Reynolds numbers of 30, 100, 300 and 1000 (Richardson from 11.11 to 0.01), Hartmann numbers of 25, 50, 75 and 100 and nanoparticles volume fractions of zero up to 0.04. The finite volume method and SIMPLER algorithm have been utilized to solve the governing equations numerically. The results showed that with imposing the magnetic field and enhancing it, the nanofluid convection and the strength of flow decrease and the flow tends toward natural convection and finally toward pure conduction. For this reason, for all of the considered Reynolds numbers and volume fractions, by increasing the Hartmann number the average Nusselt number decreases. Furthermore, for any case with constant Reynolds and Hartmann numbers by increasing the volume fraction of nanoparticles the maximum stream function decreases. For all of the studied cases, entropy generation due to friction is negligible and the total entropy generation is mainly due to irreversibility associated with heat transfer and variation of the total entropy generation with Hartmann number is similar to that of the average Nusselt number. With change in lid movement direction at Reynolds number of 30 the average Nusselt number and total entropy generation are changed, but at Reynolds number of 1000 it has a negligible effect.

Please cite this article using:

A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 183-194, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

رشد روز افزون صنعت بهبود پارامترهای انتقال حرارت را به‌منظور خنک‌کاری بهتر و بیشتر ضروری ساخته است. امروزه صنعت توانایی تولید دستگاه‌هایی را با تراکم بالا از تراشه‌های کامپیوتری دارد. این دستگاه‌ها اغلب به‌دلیل تولید گرمای زیاد در سطحی کوچک، نیازمند روش‌های نوینی برای خنک‌کاری می‌باشند. در سال‌های اخیر نانوسیال‌ها، که دارای ضریب رسانایی حرارتی بیشتری نسبت به سیال‌های معمولی هستند، بیشتر مورد توجه بوده‌اند. رسانایی حرارتی بیشتر نانوذرات نسبت به سیال پایه، که اغلب فلزی و یا در مواردی غیرفلزی مثل نانولوله‌های کربنی هستند، باعث بیشتر شدن رسانایی حرارتی نانوسیال‌ها می‌شود [1]. جابه‌جایی توام به‌دلیل اینکه ترکیبی از اثرات حرکت درپوش محفظه و جابه‌جایی طبیعی می‌باشد، کاربردهای زیادی در الکترونیک، صنایع غذایی، راکتورهای هسته‌ای، روغن‌کاری صنعتی، استخرهای خورشیدی، کلکتورهای خورشیدی، مبدل‌های حرارتی، صنایع ذوب فلزات، شیشه‌سازی و دیگر موارد دارد [2].

تولید انرژی که نشان دهنده‌ی مقدار بازگشت‌ناپذیری در طی یک فرآیند می‌باشد، معیاری برای عملکرد دستگاه‌های مهندسی است [3]. تولید انرژی باعث کاهش بازده ترمودینامیکی می‌شود. تحلیل انرژی نشان می‌دهد که در چه قسمت‌هایی از یک مدل فیزیکی و یا سیستم، اتلاف انرژی بیشتر است [4]. از آنجایی که تولید انرژی معیاری از نابودی قابلیت کاردهی در دستگاه‌ها است، تعیین آن در موضوع افزایش بازده دستگاه‌ها ضروری است [5].

نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی، دارای این ویژگی است که خواص مغناطیسی و سیال بودن را هم‌زمان دارد. جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در خنک‌کاری سیستم‌های الکترونیکی، خنک‌کاری ترانسفورماتورهای برق، راکتورهای هسته‌ای، بیوشیمی، پدیده‌های فیزیکی مانند پدیده‌های زمین‌شناسی، جریان‌های آتشفشانی و موارد مشابه دیگر مطرح می‌باشد [6]. به‌عنوان نمونه وجود جریان‌های جابه‌جایی در صنعت ریخته‌گری باعث پدیدار شدن یک ساختار ناهمگن و درشت دانه در قطعه‌ی ریخته‌گری می‌شود. با کمک علم هیدرودینامیک مغناطیسی می‌توان میزان این جریان‌های جابه‌جایی را کاهش داد. البته در مواردی هم کاهش جریان‌های جابه‌جایی در اثر میدان مغناطیسی، باعث کم شدن مقدار انتقال حرارت می‌شود، که مطلوب نیست. نمونه‌ی این پدیده می‌تواند برای یک قطعه الکترونیکی که تحت تأثیر میدان مغناطیسی است و به کمک سیالی خنک می‌شود روی دهد. در سال‌های اخیر مطالعه جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی و اثر آن بر تولید انرژی، به‌دلیل اهمیتی که در صنعت دارد، بیشتر مورد توجه بوده است [7].

در بیشتر مطالعات اخیر محفظه‌های مربعی و مستطیلی به‌دلایل مختلف از جمله سادگی میدان محاسباتی بیشتر مورد توجه بوده‌اند. از محفظه‌های دوزنقه‌ای در میکرو کانال‌ها [8]، صنعت ریخته‌گری و فضاها ناخواسته، مثل قطعه الکترونیکی که در یک فضای دوزنقه‌ای قرار گرفته است، استفاده می‌شود. با این وجود تاکنون میدان جریان، انتقال حرارت و تولید انرژی در جابه‌جایی توام نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در یک محفظه‌ی دوزنقه‌ای مطالعه نشده است. به‌همین دلیل در بررسی مطالعات پیشین ابتدا به جابه‌جایی توام نانوسیال در محفظه‌ها، سپس به تولید انرژی ناشی از جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌ها، بعد از آن به تأثیر میدان مغناطیسی بر جابه‌جایی و در پایان به مطالعات مربوط به جریان و دمای نانوسیال در

جابه‌جایی داخل محفظه‌های دوزنقه‌ای پرداخته می‌شود. در ضمن ترتیب ارجاع به مطالعات گذشته بر مبنای سال انتشار نتایج آن‌ها می‌باشد.

منصور و همکاران [1] مطالعه‌ای عددی برای جابه‌جایی توام نانوسیال، در محفظه‌ای که در آن شار گرمایی ثابتی اعمال می‌شود، انجام دادند. بر اساس یافته‌های آنان با افزایش کسر حجمی نانوذرات حرکت جریان سیال کند می‌شود، ولی ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. قاسمی و امین‌الساداتی [9] جابه‌جایی توام نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم را در محفظه مثلثی قائم‌الزاویه بررسی کردند. براساس گزارش آن‌ها در تمام محدوده اعداد ریچاردسون مورد بررسی، با افزایش کسر حجمی نانو ذرات انتقال گرما افزایش می‌یابد. پیشکار و قاسمی [10] انتقال حرارت و جریان نانوسیال را در جابه‌جایی توام در کانالی افقی دارای پره بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها با افزایش کسر حجمی و عدد رینولدز انتقال حرارت افزایش می‌یابد. چمخا و ابونادا [11] انتقال حرارت و جریان سیال را در جابه‌جایی توام در یک محفظه مربعی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش کسر حجمی و کاهش عدد ریچاردسون عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد.

در مطالعات اخیر کمینه کردن تولید انرژی برای یافتن شرایط طراحی بهینه‌ی دستگاه‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. فاموری و هومن [12] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی سیال در یک محفظه مستطیلی به‌صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش عدد رایلی انرژی تولیدی افزایش می‌یابد. موخوادیای [13] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی سیال در محفظه‌ی مربعی به‌صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج او تولید انرژی ناشی از انتقال حرارت، سهم بیشتری نسبت به تولید انرژی ناشی از لزجت سیال دارد. شاهی و همکاران [14] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی با شار حرارتی ثابت روی جداره‌های آن بررسی نمودند. بر اساس نتایج آن‌ها هنگامی که مانع گرم روی جداره پایینی و در فاصله بدون بعد  $0/8$  از جداره سمت چپ قرار داشته باشد، تولید انرژی کمینه است. خراسانی‌زاده و همکاران [15] تولید انرژی را در جریان جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در یک محفظه مربعی با پره‌ای روی ضلع پایینی بررسی نمودند. براساس نتایج آنان با افزایش عدد رایلی در همه کسر حجمی‌های نانوذرات، انرژی تولیدی کاهش می‌یابد. چو و همکاران [16] تولید انرژی نانوسیال‌های آب- مس، آب- اکسید آلومینیوم و آب- اکسید تیتانیوم را برای جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه با دیواره‌های موجی شکل به‌صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها نانوسیال آب- مس دارای بیشترین نرخ انتقال حرارت و کمترین مقدار تولید انرژی در بین نانوسیال‌های مورد بررسی بود. بررسی انجام شده در این بخش نشان می‌دهد که در زمینه تولید انرژی سیال و نانوسیال در جابه‌جایی طبیعی داخل محفظه‌ها مطالعات مختلفی انجام شده است [17]- [22] ولی در زمینه تولید انرژی در جابه‌جایی توام نانوسیال مطالعه‌ی کمتری انجام شده است.

ناجم و همکاران [23] تأثیر میدان مغناطیسی را بر جابه‌جایی طبیعی سیال در محفظه‌ی مربعی مایل در اعداد گراشف و هارتمن مختلف بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها میدان مغناطیسی بر جریان و انتقال حرارت سیال در زاویه‌های انحراف کوچک‌تر و اعداد گراشف بالاتر تأثیر بیشتری دارد. کانداسامی و همکاران [24] تأثیر میدان مغناطیسی را بر جابه‌جایی طبیعی در یک محفظه در شرایطی که بخشی از دیواره‌های عمودی آن فعال بود بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها با افزایش عدد هارتمن ناسلت متوسط

زاویه‌ی  $45^\circ$  دیواره‌های جانبی با افق و کسرهای حجمی 0.0/01، 0.0/02، 0.0/03 و 0.0/04 از نانوذرات انجام شده است.

## 2- هندسه، معادلات حاکم و شرایط مرزی

طرح‌واره هندسه‌ی محفظه‌ی دوزنقه‌ای مورد بررسی در شکل 1 نشان داده شده است. مبدا مختصات گوشه سمت چپ محفظه می‌باشد. طول محفظه 0/1 متر بوده و ارتفاع آن 0/025 متر در نظر گرفته شده است. دیواره‌های جانبی عایق ( $\theta_s=45^\circ$ )، دیواره بالایی سرد (در دمای  $T_c$ ) و متحرک در جهت راست ( $+U_0$ ) یا چپ ( $-U_0$ ) و دیواره پایینی گرم (در دمای  $T_h$ ) هستند. محفظه پر شده از نانوسیال آب - مس تحت اثر یک میدان مغناطیسی ثابت است. خواص ترموفیزیکی آب به‌عنوان سیال پایه و نانوذرات مس در جدول 1 ارائه شده است. تمام دیواره‌ها عایق الکتریکی در نظر گرفته شده‌اند.

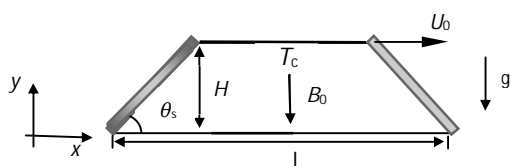
اثر میدان مغناطیسی به‌صورت نیروی حجمی لورنتز به شکل  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  در معادلات تکانه وارد می‌شود، که در آن  $\vec{B}$  شدت میدان مغناطیسی و  $\vec{J}$  چگالی جریان الکتریکی می‌باشد. معادله بقای جرم (1)، معادلات بقای تکانه در دو راستای  $x$ ، (2) و  $y$ ، (3) با در نظر گرفتن اثر میدان مغناطیسی، معادله تولید انرژی (5) و تابع جریان (6) به ترتیب عبارتند از [37]:

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

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \sigma_{nf} B_0^2 (v \cos \phi \sin \phi - u \sin^2 \phi) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_{nf} \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] + \frac{(\rho \beta)_{nf}}{\rho_{nf}} g (T - T_c) + \sigma_{nf} B_0^2 (u \cos \phi \sin \phi - v \cos^2 \phi) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{1}{(\rho c_p)_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{nf} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] \quad (4)$$



شکل 1 طرح‌واره محفظه دوزنقه‌ای مورد بررسی و شرایط مرزی

جدول 1 خواص ترموفیزیکی سیال پایه (در دمای 300 K) و نانوذرات [6]

آب (سیال پایه)	مس	خواص فیزیکی
4179	385	$c_p$ (Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
997/1	8933	$\rho$ (kgm <sup>-3</sup> )
0/613	401	$k$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$21 \times 10^{-5}$	$1/67 \times 10^{-5}$	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )
0/05	$5/96 \times 10^7$	$\sigma$ (kg <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> .s <sup>3</sup> .A <sup>2</sup> )
0/001003	-	$\mu$ (Pa.s)

کاهش می‌یابد. پیرمحمدی و قاسمی [25] اثر میدان مغناطیسی را بر جابه‌جایی طبیعی سیال در یک محفظه مربعی مایل به‌صورت عددی بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد میدان جریان و انتقال حرارت سیال به‌شدت وابسته به مقدار میدان مغناطیسی و زاویه‌ی محفظه می‌باشد. صادقی و قاسمی [26] جریان جابه‌جایی توام نانوسیال آب - مس را در کانالی تحت تأثیر میدان مغناطیسی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها افزایش عدد هارتمن در اعداد ریچاردسون بالا منجر به کاهش انتقال حرارت می‌شود. ملک‌پور و قاسمی [27] اثر میدان مغناطیسی را بر انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال در محفظه‌ی مثلثی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها با افزایش عدد هارتمن، سرعت جریان در محفظه کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها گزارش کردند با افزایش درصد حجمی نانوذرات انتقال حرارت افزایش می‌یابد. عاشوری‌نژاد و همکاران [28] تأثیر میدان مغناطیسی را بر جابه‌جایی طبیعی نانوسیال آب - نقره در فضای بین دو محفظه دایره‌ای هم‌محور به‌صورت عددی بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی و عدد رایلی افزایش ولی با افزایش عدد هارتمن کاهش می‌یابد.

باساک و همکاران [29] به‌صورت عددی جابه‌جایی طبیعی را داخل محفظه‌ی دوزنقه‌ای بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها عدد ناسلت متوسط در حالت شار یکنواخت، بیشتر از حالت شار غیر یکنواخت می‌باشد. وارل [30] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی را در محفظه دوزنقه‌ای در محیطی متخلخل با تیغه‌ای افقی در وسط دوزنقه به‌صورت عددی بررسی نمود. بر اساس نتایج او با افزایش عدد رایلی ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. صالح و همکاران [31] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی نانوسیال‌های آب - مس و آب - اکسید آلومینیم را در یک محفظه‌ی دوزنقه‌ای بررسی کردند. بر اساس نتایج آن‌ها همواره عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال آب - مس از مقدار آن برای نانوسیال آب - اکسید آلومینیم بیشتر است. نسرين و سالم جریان سیال و انتقال حرارت آب - مس را در یک محفظه دوزنقه‌ای به‌صورت عددی بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها در بیشترین عدد پرانتل و کمترین نسبت منظری بیشترین میزان انتقال حرارت روی می‌دهد [32]. فانی و همکاران [33] اثر اندازه نانوذرات را بر بازده حرارتی نانوسیال در یک میکرو کانال دوزنقه‌ای بررسی نمودند. براساس نتایج آن‌ها با افزایش قطر نانوذرات مقدار انتقال حرارت کاهش می‌یابد.

یکی از نکات قابل تامل در مطالعات مربوط به جابه‌جایی نانوسیال‌ها، عدم هم‌خوانی بین نتایج تجربی [34,35] و کارهای عددی [7-12] می‌باشد. شاید یکی از دلایل عدم این هم‌خوانی در نظر نگرفتن برخی پدیده‌ها از جمله تأثیر حرکت براونی بر ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. حرکت براونی نانوذرات در نانوسیال‌ها، در واقع حرکت تصادفی و پیوسته‌ی آن‌ها در سیال می‌باشد. مولکول‌های مایع مدام بر نانوذرات ضربه وارد کرده و آن‌ها را درون سیال پراکنده می‌کنند [36]. در مطالعه‌ی حاضر اثر این پدیده نیز در ضریب رسانایی حرارتی نانوسیال در نظر گرفته شده است. در این تحقیق تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت و تولید انرژی نانوسیال با خواص متغیر در جابه‌جایی توام در محفظه‌ی دوزنقه‌ای با دیواره‌های جانبی عایق و ساکن، دیواره‌ی بالایی سرد و متحرک و دیواره‌ی پایینی گرم و ساکن بررسی شده است. مطالعه در عدد گراشوف  $10^4$ ، برای اعداد ریچاردسون 30، 100، 300 و 1000 (ریچاردسون از 11/11 تا 0/01)، اعداد هارتمن 25، 50، 75 و 100 و

جمله‌های اول و دوم در سمت راست رابطه (12) به ترتیب به انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت و اصطکاک اشاره دارند.

تابع جریان بدون بعد، از رابطه (13)، محاسبه می‌شود:

$$\Psi(X,Y) = \int U dY + \Psi_0 \quad (13)$$

با توجه به هندسه مسئله، شرایط مرزی بی‌بعد، رابطه 14، عبارتند از:

$$\begin{aligned} U=V=0, \theta=1 & \quad \text{روی دیواره‌ی پایینی محفظه} \\ U=1, V=0, \theta=0 & \quad \text{روی دیواره‌ی بالایی محفظه} \\ U=V=0, \frac{\partial \theta}{\partial n}=0 & \quad \text{روی دیواره‌های جانبی محفظه} \end{aligned} \quad (14)$$

ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال [37]، چگالی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حجمی، ضریب پخش و لزجت نانوسیال [38] و ضریب هدایت حرارتی [39] به ترتیب از روابط (15) تا (16) به دست می‌آیند:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1\right)\phi}{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} + 2\right) - \left(\frac{\sigma_p}{\sigma_f} - 1\right)\phi} \quad (15)$$

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_p \quad (16)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho c_p)_f + \phi(\rho c_p)_p \quad (17)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_p \quad (18)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (19)$$

$$\mu_{nf} = \mu_f(1-\phi)^{-2.5} \quad (20)$$

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + C k_p \text{Pe} \frac{A_p}{k_f A_f} \quad (21)$$

تأثیر حرکت براونی با در نظر گرفتن اثر دما در رابطه‌ی ضریب هدایت حرارتی ظاهر می‌شود. در نظر گرفتن این اثر باعث می‌شود مقدار ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بیش از حالتی باشد که تأثیر این حرکت در نظر گرفته نمی‌شود. رابطه (21) خصوص نانوسیال‌های حاوی نانوذرات کروی با کسر حجمی بین 1% تا 8% می‌باشد و سیال پایه می‌تواند آب یا اتیلن گلیکول باشد [39]. در این رابطه  $C=36000$ ،  $\text{Pe} = \frac{U_p d_p}{\alpha_f}$  و  $A_p = \frac{d_p \phi}{d_p(1-\phi)}$  می‌باشد. مقدار سرعت مربوط به حرکت براونی ( $U_p$ ) از رابطه 22 به دست می‌آید:

$$U_p = \frac{2k_B T}{\pi \mu_f d_p^2} \quad (22)$$

$d_p$  و  $d_f$  به ترتیب قطر مولکول‌های آب و نانوذرات مس بوده و به ترتیب برابر  $2 \times 10^{-10}$  و  $100 \times 10^{-9}$  متر می‌باشند.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، از رابطه 23 محاسبه می‌شود:

$$h_{nf} = \frac{q}{T_h - T_c} \quad (23)$$

عدد ناسلت موضعی که از رابطه (24) به دست می‌آید، عبارت است از:

$$Nu = \frac{h_{nf} H}{k_f} \quad (24)$$

شار حرارتی دیواره‌ها بر واحد سطح، از رابطه (25) به دست می‌آید:

$$q = -k_{nf} \left. \frac{T_h - T_c}{H} \frac{\partial \theta}{\partial n} \right|_{\text{wall}} \quad (25)$$

$$S_{gen} = \frac{k_{nf}}{T_0^2} \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{\mu_{nf}}{T_0} \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_{nf} B_0^2 U^2}{T_0} \quad (5)$$

$$\psi(x,y) = \int u dy + \psi_0 \quad (6)$$

برای بی‌بعد سازی در جابه‌جایی توام از کمیت‌های معرفی شده در رابطه (7) استفاده شده است که عبارتند از:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, L = \frac{l}{H}, V = \frac{v}{U_0}, U = \frac{u}{U_0}, \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T} \\ P = \frac{\rho}{\rho_f U_0^2}, T_0 = \frac{T_h + T_c}{2}, \Delta T = T_h - T_c \end{aligned}$$

$$Gr = \frac{g \beta_f H^3 (T_h - T_c)}{\nu_f^2}, Re = \frac{U_0 H}{\nu_f}, Ri = \frac{Gr}{Re^2}$$

$$Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Ha = B_0 H \sqrt{\frac{\sigma_f}{\mu_f}}, \chi = \frac{(\mu_f Re^2 \nu_f^2 T_0)}{\Delta T^2 k_f H^2} \quad (7)$$

عدد هارتمن ( $Ha$ ) معیاری از نیروی حجمی لورنتز می‌باشد و افزایش آن نشان دهنده‌ی افزایش شدت میدان مغناطیسی است. با کمک کمیت‌های بی‌بعد معرفی شده و با توجه به اعمال میدان مغناطیسی عمودی در جهت منفی  $Y$  معادلات بی‌بعد بقای جرم، بقای تکانه و بقای انرژی و تولید انرژی به ترتیب از روابط (8) تا (12) به دست می‌آیند.

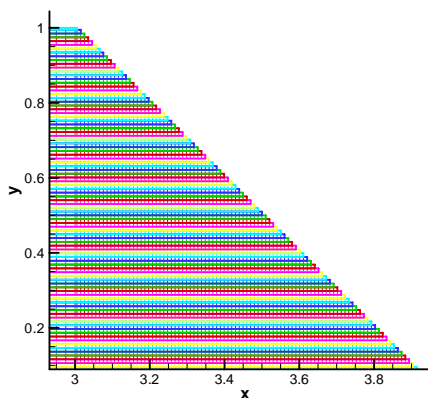
$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} = 0 \quad (8)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f Re} \left[ \frac{\partial}{\partial X} (\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu_{nf} \frac{\partial U}{\partial Y}) \right] - \frac{\sigma_{nf} \rho_f}{\sigma_f} \frac{U}{\rho_{nf} Re_f} Ha^2 \quad (9)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\rho_{nf} \nu_f Re} \left[ \frac{\partial}{\partial X} (\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (\mu_{nf} \frac{\partial V}{\partial Y}) \right] + \frac{(\rho\beta)_{nf} Ri \theta}{\rho_{nf} \beta_f} \quad (10)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Re Pr \alpha_f (\rho c_p)_{nf}} \left[ \frac{\partial}{\partial X} (k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y} (k_{nf} \frac{\partial \theta}{\partial Y}) \right] \quad (11)$$

$$S_{gen}'' = \frac{k_{nf}}{k_f} \left[ \left( \frac{\partial \theta}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)^2 \right] + \chi \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \left[ 2 \left( \frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{\partial V}{\partial X} \right)^2 \right] + \frac{\sigma_{nf} T_0 \mu_f^3 Re^2 U^2 Ha^2}{\sigma_f ((\theta \times \Delta T) + T_c) k_f (\Delta T^2 \rho_f^2 H^2)} \quad (12)$$



شکل 2 نمونه شبکه بندی انجام شده در بخشی از میدان حل

جدول 2 عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای نانوسیال آب-مس در  $\phi=0/04$  و  $Re=100$ ،  $Ha=50$  برای شبکه‌های مختلف

تعداد نقاط	$Nu_{Avg}$
24531	3/41
29161	3/53
34191	3/61
39621	3/65
45451	3/67

3-2- اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج برنامه کامپیوتری، هندسه حل چمخاه و ابونادا [11]، الیوسکی و همکاران [41] و قاسمی و همکاران [42] با برنامه تهیه شده شبیه‌سازی شدند. نتایج حاصل شده مربوط به ناسلت متوسط و انترویی کل با نتایج آن‌ها در جدول‌های 3 تا 5 مقایسه شده‌اند. چنانچه مشاهده می‌شود برای وضعیت‌های مشابه، تفاوت نسبی مقادیر به‌دست آمده برای عدد ناسلت متوسط و انترویی کل ناچیز است و لذا از صحت نتایج مدل‌سازی‌ها اطمینان حاصل می‌شود.

جدول 3 مقایسه عدد ناسلت متوسط در جابه‌جایی توام

Ri	$\phi$	کار حاضر چمخاه و ابونادا [11]	درصد اختلاف
0/01	0/02	33/14	32/80
	0/1	36/40	1/36
	0/02	4/76	3/25
1	0/1	4/84	2/22
	0/02	1/68	2/32
10	0/1	1/93	3/98

جدول 4 مقایسه انترویی کل در جابه‌جایی طبیعی

Ra	x	کار حاضر الیوسکی و همکاران [41]	درصد اختلاف
$10^3$	$10^{-2}$	4/58	2/97
	$10^{-4}$	1/15	0/86
$10^5$	$10^{-2}$	19/14	0/53
	$10^{-4}$	23/65	0/92

با قرار دادن رابطه‌های (23) و (25) در رابطه‌ی (24)، می‌توان عدد ناسلت موضعی را از رابطه (26) محاسبه نمود:

$$Nu = - \left( \frac{k_{nf}}{k_f} \right) \frac{\partial \theta}{\partial n} \Big|_{wall} \quad (26)$$

عدد ناسلت متوسط روی دیواره‌ی گرم از رابطه (27) به‌دست می‌آید:

$$Nu_{Avg} = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx \quad (27)$$

3- شبیه سازی عددی

معادلات حاکم به‌کمک روش حجم محدود و الگوریتم سیمپلر به‌صورت عددی حل می‌شوند. ابتدا یک میدان حل مستطیلی لحاظ می‌شود. سپس دو شبکه یکنواخت یکی برای نواحی مثلثی مجاور دیوارهای جانبی و دیگری در مرکز دوزنقه بر میدان حل منطبق می‌شود. شبکه مجاور دیوارهای جانبی ریزتر از شبکه ناحیه مرکزی است. برای مدل‌سازی دیواره‌های مورب ناحیه‌های اضافی میدان حل به‌شیوه‌ی پیشنهادی [40]، یعنی صفر کردن سرعت و اعمال شرط مرزی دمایی در آن نواحی از حل خارج می‌شوند. در شکل 2 بخشی از میدان حل که شامل ناحیه مثلثی سمت راست محفظه است، نشان داده شده است. در مرحله بعدی حول هر گره یک حجم کنترل ایجاد می‌شود. از معادلات حاکم روی هر حجم کنترل انتگرال‌گیری شده و سپس معادلات منفصل شده و دستگاهی از معادلات جبری به‌دست می‌آید. برای انفعال جملات پخش و جابه‌جایی از طرح پیوندی (هبرید) استفاده می‌شود. در این روش برای اعداد پکلت با قدر مطلق کوچکتر از 2، از طرح تفاضل مرکزی و برای اعداد پکلت با قدر مطلق بزرگتر از 2 از طرح جریان بالادست استفاده می‌شود [40]. برای دستیابی به همگرایی برای مولفه‌های سرعت از ضریب زیرتخفیف 0/5 و برای دما از ضریب زیرتخفیف 0/7 استفاده شده است. برای حل معادلات حاکم بر مسئله حاضر از یک برنامه کامپیوتری به زبان فرترن استفاده شده است. این برنامه برای هندسه، شرایط مرزی، مدل به‌کار رفته برای خواص وابسته به‌دمای نانوسیال، و لحاظ نمودن اثر میدان مغناطیسی و محاسبه تولید انترویی توسعه داده شده است.

به عنوان معیار همگرایی از رابطه (28) برای محاسبه خطا برای فشار، سرعت و دما استفاده می‌شود.

$$\text{خطا} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\xi_{i,j}^{k+1} - \xi_{i,j}^k|}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |\xi_{i,j}^{k+1}|} \leq 10^{-8} \quad (28)$$

M و N تعداد نقاط شبکه به ترتیب در جهت x و y، k تعداد تکرار و  $\xi$  معرف متغیری است که حل می‌شود. تکرار برای حل دستگاه معادلات تا رسیدن به خطای  $10^{-8}$  ادامه یافته است.

3-1- استقلال نتایج از شبکه

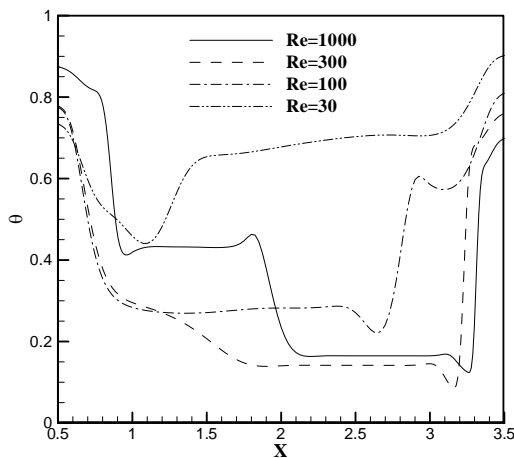
به‌منظور یافتن شبکه مناسبی که منجر به استقلال نتایج از شبکه شود، عدد ناسلت متوسط برای جابه‌جایی نانوسیال آب- مس در محفظه برای شبکه با تعداد نقاط مختلف به‌دست آمده و در جدول 2 به همراه شرایط منظور شده ارائه شده‌اند. با توجه به مقادیر ناسلت متوسط مشاهده می‌شود که شبکه با تعداد نقاط 39621 مناسب است.

در عدد رینولدز 30 با حضور میدان مغناطیسی، رفتار تغییرات مولفه‌ی عمودی سرعت نسبت به حالتی که میدان مغناطیسی وجود ندارد عوض می‌شود. در حالی که در رینولدز 1000 میدان مغناطیسی قدرت کافی را برای تغییر رفتار مولفه‌ی سرعت ندارد، هر چند که در این حالات نیز میدان مغناطیسی کاهش اندازه‌ی سرعت را به‌همراه دارد. با توجه به منحنی‌های نشان داده شده در اعداد رینولدز کم میدان سرعت بیشتر تحت تأثیر میدان مغناطیسی اعمالی قرار می‌گیرد.

در شکل 4 تغییرات دما در مقطع میانی محفظه بر حسب X در  $\varphi=0/02$  در رینولدزهای مختلف در هارتمن صفر نشان داده شده است و چنانچه مشاهده می‌شود با افزایش عدد رینولدز و به‌دلیل بهبود انتقال حرارت در محفظه تغییرات دما افزایش یافته است.

در شکل 5 خطوط جریان، دما ثابت و انترویی کل برای نانوسیال آب- مس در  $\varphi=0/02$ ، در اعداد هارتمن مختلف برای  $Re=30$  و  $Re=1000$  نشان داده شده است. ابتدا به بررسی رفتار خطوط جریان، دما ثابت و انترویی کل در هارتمن صفر پرداخته می‌شود و سپس رفتار این خطوط در حضور میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا درک بهتری از اثر میدان مغناطیسی حاصل شود.

در هارتمن صفر برای همه‌ی اعداد رینولدز مورد بررسی به‌جز رینولدز 1000 دو گردابه تشکیل می‌شود و با افزایش عدد رینولدز گردابه طرف چپ محفظه قوی‌تر شده و به طرف راست متمایل و گردابه دوم را در فضای سمت راست محدود می‌کند. ولی چنانچه در شکل 5 دیده می‌شود در رینولدز 1000 سه گردابه تشکیل می‌شود. در اعداد رینولدز کم (مانند رینولدزهای 30 و 100) که جابه‌جایی طبیعی قوی‌تر از جابه‌جایی اجباری است، متاثر از نیروی شناوری گردابه‌هایی بزرگ ولی با قدرت کم در محفظه شکل می‌گیرد. با افزایش عدد رینولدز و غلبه‌ی جابه‌جایی اجباری بر جابه‌جایی طبیعی شکل گردابه‌ها هر چه بیشتر تحت تأثیر سرعت درپوش قرار می‌گیرد، بدین صورت که گردابه‌ها کشیده‌تر و کوچک‌تر شده ولی قدرت بیشتری می‌یابند، به‌گونه‌ای که در رینولدز 1000 یک گردابه‌ی بزرگ در مرکز محفظه این قدرت را دارد که سیال را در دو طرف خود به حرکت وادار کند. در جدول 6 مقادیر بیشینه و بدون بعد تابع جریان برای وضعیت بدون وجود میدان مغناطیسی برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است.



شکل 4 تغییرات دما در مقطع میانی محفظه بر حسب X در محفظه در رینولدزهای مختلف؛  $\varphi=0/02$

جدول 5 مقایسه عدد ناسلت متوسط در جابه‌جایی طبیعی در اعداد رایلی و هارتمن مختلف برای  $\varphi=0/06$

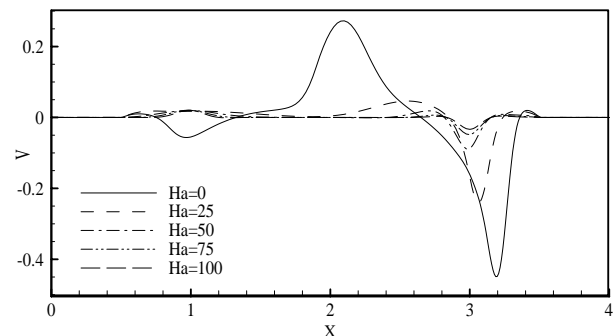
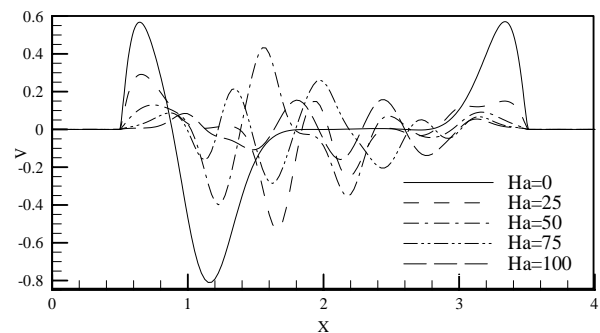
درصد اختلاف	قاسمی و همکاران [42]	کار حاضر	Ha	Ra
0/16	1/184	1/182	30	$10^3$
0/07	1/291	1/290	30	$10^4$
0/04	4/968	4/966	0	$10^5$
0/03	3/108	3/107	30	$10^5$
0/05	1/806	1/805	60	$10^5$

#### 4- نتایج و بحث

در این بخش به بررسی اثر پارامترهای مختلف در مسئله حاضر پرداخته می‌شود. در ابتدا میدان جریان، دما و تولید انترویی با و بدون وجود میدان مغناطیسی بررسی شده و در ادامه اثر کسر حجمی، عدد هارتمن و جهت حرکت درپوش بر ناسلت متوسط و تولید انترویی بررسی می‌شود.

#### 4-1- مطالعه میدان جریان، دما و تولید انترویی با و بدون وجود میدان مغناطیسی

در شکل 3 تغییرات مولفه‌ی عمودی سرعت بی بعد بر حسب X روی خط میانی محفظه، در  $\varphi=0/02$  در اعداد هارتمن مختلف برای اعداد رینولدز 30 و 1000 نشان داده شده است. در این شکل به‌خوبی می‌توان اثر حضور میدان مغناطیسی و افزایش آن را بر محدود کردن حرکت و جابه‌جایی سیال مشاهده کرد. در اعداد رینولدز مورد بررسی، با افزایش عدد هارتمن، اندازه مولفه‌ی عمودی سرعت بی بعد کاهش می‌یابد به‌طوری که برای همه‌ی حالت‌ها کمترین سرعت در هارتمن 100 وجود دارد.



شکل 3 تغییر مولفه‌ی عمودی سرعت بر حسب X روی خط میانی محفظه، در  $\varphi=0/02$  و اعداد هارتمن مختلف برای  $Re=30$  (بالایی) و  $Re=1000$  (پایینی)

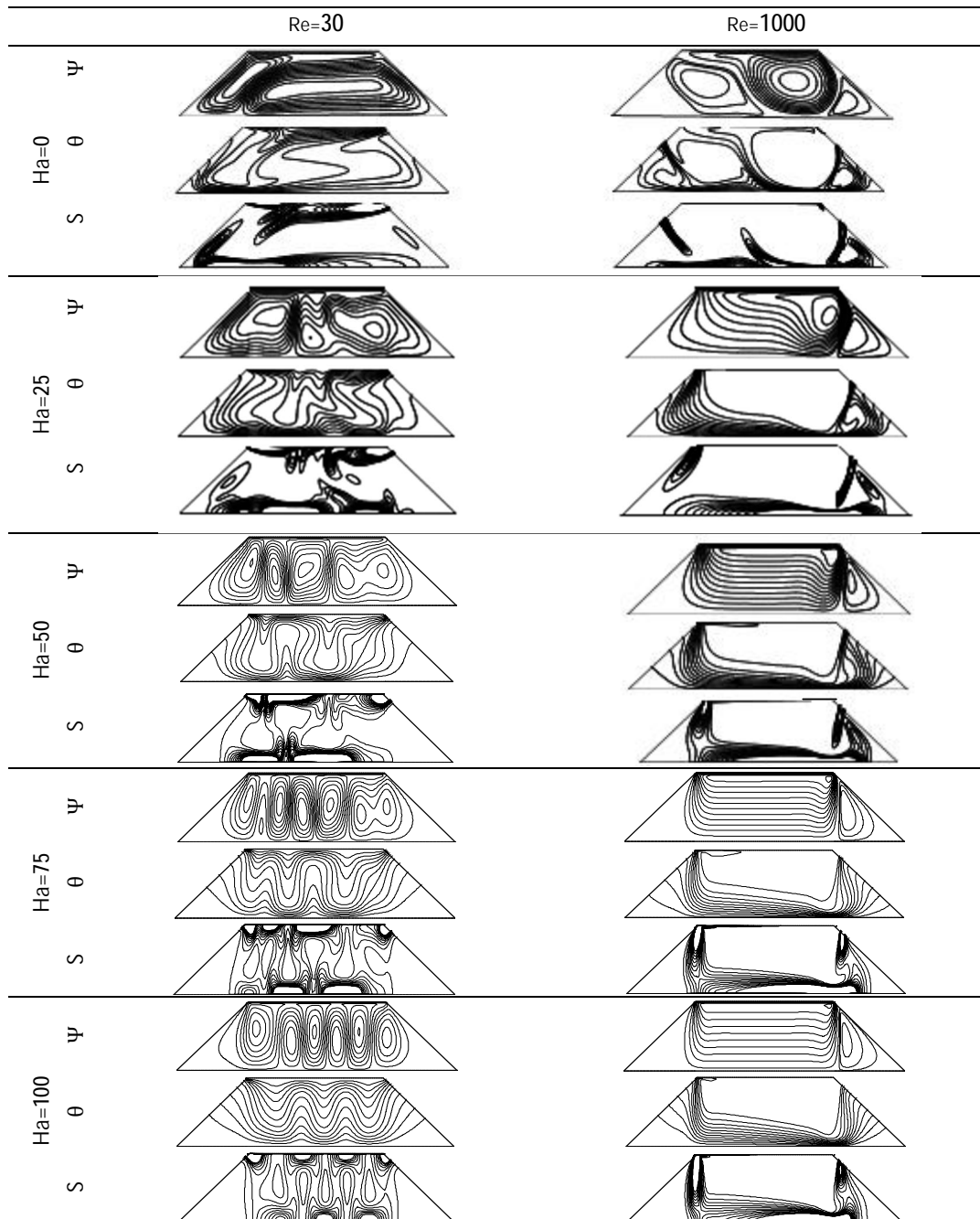
بی‌بعد سازی سرعت با سرعت درپوش انجام شده و لذا هر چه رینولدز بیشتر شود (سرعت درپوش زیاد شود) مقدار بدون بعد تابع جریان کمتر می‌شود ولی مقدار با بعد آن به نسبت افزایش رینولدز بیشتر می‌شود.

در رینولدز 30 تراکم خطوط دما ثابت در نزدیکی دیواره‌ی گرم پایینی در طرف چپ محفظه بیشتر از دیگر بخش‌های دیواره‌ی گرم است، ولی نزدیک دیواره متحرک بالایی همه جا تراکم خطوط دما ثابت مشاهده می‌شود. در اعداد رینولدز 100 و 300 تراکم خطوط دما ثابت در سه ناحیه (محل نزدیکی گردابه‌ها، مجاورت دیواره‌ی گرم و دیواره‌ی متحرک) بیشتر است.

جدول 6 مقادیر بیشینه اندازه تابع جریان در هارتمن صفر برای اعداد رینولدز مختلف و  $\phi = 0/02$

$ \Psi _{max}$	Re
0/2034	30
0/1940	100
0/1728	300
0/1167	1000

توجه شود که با افزایش عدد رینولدز، مقدار بیشینه قدرت جریان کم شده است ولی این به معنای کاهش قدرت گردابه نیست. در این تحقیق



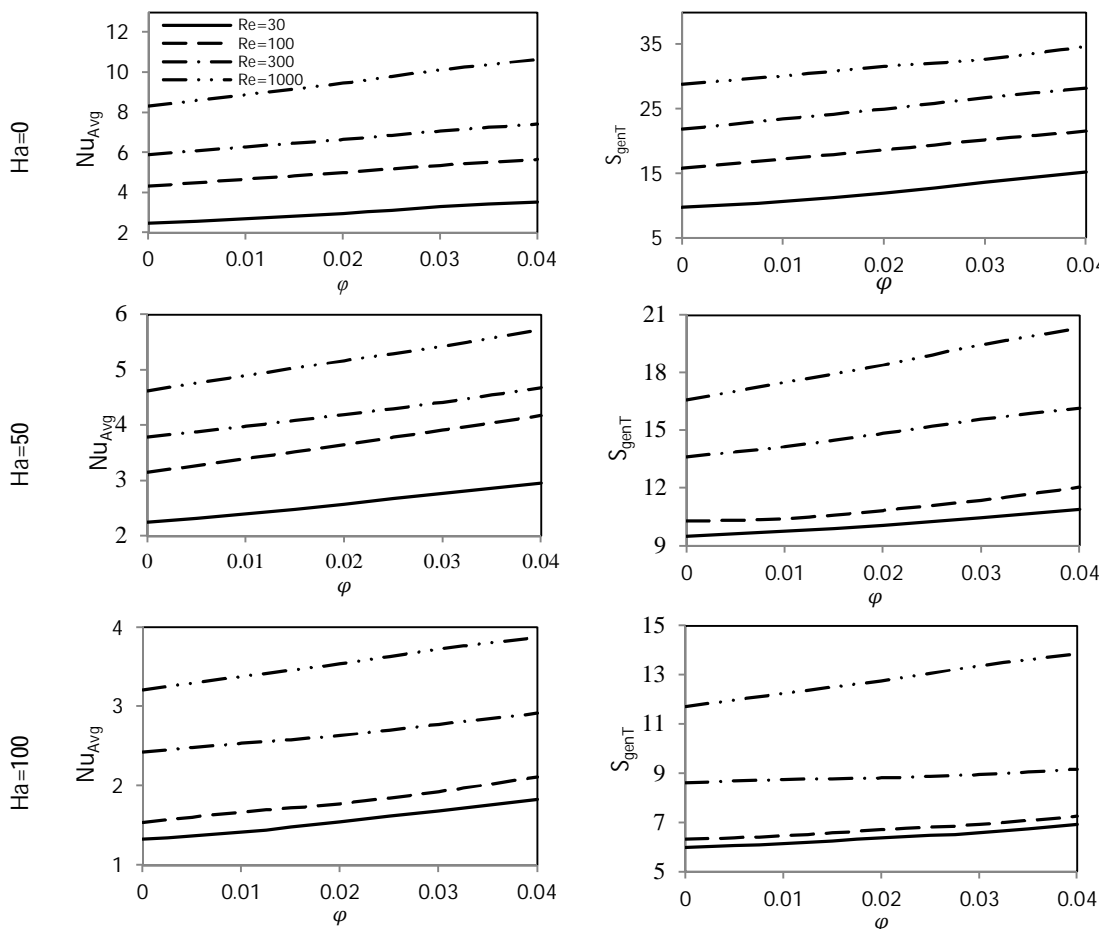
شکل 5 خطوط جریان، دما ثابت و انترویی کل برای نانوسیال آب- مس در  $\phi = 0/02$ ، اعداد هارتمن مختلف و اعداد رینولدز 30 و 1000

دیواره‌ی گرم پایینی و دیواره‌ی سرد بالایی تراکم بیشتری دارند. در حالی که در این اعداد رینولدز، با افزایش عدد هارتمن خطوط دما ثابت دارای انحنای بوده و به طور تقریبی به صورت متقارن در همگی محفظه قرار دارند. این رفتار خطوط دما ثابت نشان دهنده‌ی اثر میدان مغناطیسی بر کاهش جابه‌جایی است و باعث می‌شود رفتار غالب به رفتار ناشی از جابه‌جایی طبیعی شبیه شود. در رینولدزهای 300 و 1000 در همگی اعداد هارتمن انحنای خطوط دما ثابت حفظ می‌شود. در رینولدزهای 300 و 1000 سرعت درپوش به اندازه‌ی زیاد است که نیروی ناشی از آن می‌تواند تا اندازه‌ی بر نیروی لورنتز حاصل از میدان مغناطیسی غلبه کند. در این شرایط تراکم خطوط دما ثابت در نزدیکی دیواره‌ی گرم بیش از دیگر ناحیه‌های محفظه می‌باشد.

خطوط انترویی کل در رینولدزهای 30 و 100 در اعداد هارتمن کم، بیشتر در نزدیکی ضلع‌های بالایی و پایینی متراکم هستند. با افزایش عدد هارتمن تراکم خطوط انترویی کل در میانه‌های محفظه نیز مشاهده می‌شود. خطوط انترویی کل در ناحیه‌هایی که خطوط جریان و دما ثابت متراکم هستند، تراکم بیشتری دارند. در رینولدزهای 300 و 1000 تراکم خطوط انترویی کل در نزدیکی دیواره‌ی پایینی و سمت چپ محفظه بیشتر از دو ضلع دیگر آن می‌باشد.

2-4- مطالعه اثر کسر حجمی بر ناسلت متوسط و انترویی تولیدی کل

در شکل 6 تغییرات عدد ناسلت متوسط و انترویی تولیدی کل بر حسب کسر حجمی در اعداد رینولدز و هارتمن مختلف نشان داده شده‌اند.



شکل 6 تغییرات عدد ناسلت متوسط و انترویی تولیدی کل بر حسب کسر حجمی در اعداد رینولدز و هارتمن مختلف

به‌طور کلی تولید انترویی ناشی از برگشت‌ناپذیری‌های مربوط به اصطکاک و انتقال حرارت می‌باشد. از شکل 5 دیده می‌شود که خطوط انترویی کل در رینولدز 1000 در نزدیکی دیواره‌های بالایی و پایینی هم‌چنان متراکم است. مطالعه سهم انترویی ناشی از اصطکاک از انترویی کل نشان می‌دهد که سهم انترویی اصطکاک بسیار کم می‌باشد، به گونه‌ای که بیشینه سهم انترویی اصطکاک در همگی کسرهای حجمی و اعداد رینولدز برابر با 0/0615 درصد است و در رینولدز 1000 برای کسر حجمی 0/04 روی می‌دهد. در نتیجه، به‌طور کلی رفتار خطوط انترویی کل بسیار متأثر از رفتار خطوط دما ثابت می‌باشد.

چنانچه از شکل 5 دیده می‌شود در حضور میدان مغناطیسی و برای رینولدز 30، خطوط جریان انحنایافته و گردابه‌های بیشتری به‌وجود می‌آیند. تمایل سیال برای حرکت در جهت سرعت درپوش و از طرفی اعمال نیروی لورنتز در خلاف جهت حرکت درپوش، باعث افزایش تعداد گردابه‌ها شده است. در رینولدز 30 با افزایش عدد هارتمن، تمایل برای تشکیل گردابه‌های مجزا از یک‌دیگر زیاد می‌شود، به‌طوری‌که در هارتمن 50 و 100 به‌ترتیب 4 و 6 گردابه به‌وجود می‌آید. این گردابه‌ها با افزایش عدد هارتمن فشرده‌تر و کشیده‌تر می‌شوند. در رینولدز 100 نیز همین تمایل وجود دارد ولی به‌دلیل سرعت بیشتر درپوش، با وجود انحنایی که خطوط جریان دارند، گردابه‌های مجزای بزرگ امکان شکل گرفتن پیدا نمی‌کنند. در اعداد رینولدز 300 و 1000، در همگی اعداد هارتمن گردابه‌های ثانویه‌ای نیز تشکیل می‌شود. در رینولدزهای 30 و 100 در عدد هارتمن 50، خطوط دما ثابت در نزدیکی



4-4- مطالعه اثر جهت حرکت درپوش بر ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل

در این بخش و به‌منظور بررسی اثر جهت حرکت درپوش، عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل برای دو وضعیت حرکت درپوش به سمت راست (+U) و حرکت درپوش به سمت چپ (-U)، در کسر حجمی 0.02، 0.04 و اعداد رینولدز 30 و 1000 و اعداد هارتمن 0، 50 و 100 مقایسه می‌شوند. در رینولدز 30، بیشترین کاهش و افزایش در عدد ناسلت با تغییر جهت سرعت درپوش (از +U به -U) در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد هارتمن مورد بررسی به‌ترتیب 30/15 درصد (در Ha=100 و  $\phi=0/04$ ) و 17/34 درصد (در Ha=0 و  $\phi=0/0$ ) می‌باشد. در بیان توجیه کاهش و افزایش عدد ناسلت متوسط می‌توان به مقایسه‌ی بیشینه مقدار تابع جریان در هر دو وضعیت اشاره نمود. این مقادیر در جدول 7 آورده شده است. بیشتر بودن تابع جریان نشان دهنده‌ی جابه‌جایی مناسب‌تر نانوسیال بوده و در نتیجه عدد ناسلت متوسط بیشتر می‌شود.

در رینولدز 1000، بیشترین کاهش و افزایش در عدد ناسلت متوسط با تغییر جهت سرعت درپوش (از +U به -U) در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد هارتمن مورد بررسی به‌ترتیب 1/61 درصد (در Ha=50 و  $\phi=0/0$ ) و 0/4 درصد (در Ha=100 و  $\phi=0/04$ ) می‌باشد. علت این اختلاف‌های اندک اینست که در رینولدز 1000 برای هر دو حالت +U و -U جریان بیش از اینکه تحت تأثیر میدان مغناطیسی اعمالی باشد تحت تأثیر سرعت درپوش است. در نتیجه مقدار نیروی لورنتز، با وجود آن‌که در حالت -U در جهت سرعت درپوش است، به اندازه‌ای نیست که بتواند به افزایش بیشتر عدد ناسلت متوسط کمک کند. در رینولدز 30، بیشترین کاهش و افزایش در انرژی تولیدی کل با تغییر جهت حرکت درپوش (از +U به -U) در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد هارتمن مورد بررسی به‌ترتیب 22/46 درصد (در Ha=0 و  $\phi=0/04$ ) و 14/44 درصد (در Ha=0 و  $\phi=0/0$ ) می‌باشد. در رینولدز 1000 با تغییر جهت حرکت درپوش (از +U به -U) در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد هارتمن مورد بررسی انرژی تولیدی کل کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش در انرژی تولیدی کل 2/14 درصد بوده که در هارتمن 100 و برای  $\phi=0/04$  روی می‌دهد. همچنین در رینولدز 1000، بیشترین و کمترین افزایش در انرژی تولیدی کل با تغییر جهت سرعت درپوش در همه‌ی کسرهای حجمی و اعداد هارتمن مورد بررسی به‌ترتیب 6/26 درصد (در Ha=50 و  $\phi=0/04$ ) و 0/58 درصد (در Ha=100 و  $\phi=0/0$ ) می‌باشد. بر اساس درصد‌های بیان شده در بندهای قبلی می‌توان نتیجه گرفت، تغییر در جهت حرکت درپوش برای رینولدز 30، در عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل اثرگذار است ولی در رینولدز 1000 تأثیر چندانی ندارد.

به‌منظور بررسی بهتر اثر عدد هارتمن و کسر حجمی، در شکل 8 تغییرات عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل بر حسب عدد هارتمن برای رینولدزهای 30 و 1000 در دو حالت (+U) و (-U) در  $\phi=0/02$  نشان داده شده است. در همه‌ی اعداد رینولدز و در هر دو حالت مورد بررسی با

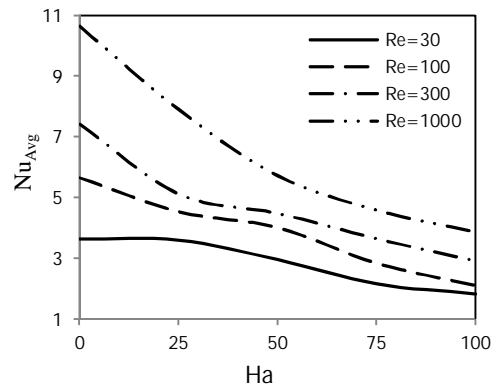
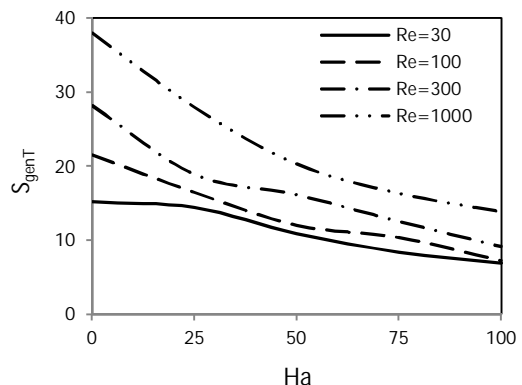
جدول 7 مقادیر بیشینه قدر مطلق تابع جریان در هارتمن 0 و 100 در دو حالت (+U) و (-U)

Ha	$\phi$	+U	-U
0	0	0/1773	0/2250

برای همه اعداد رینولدز و هارتمن مورد بررسی با افزایش کسر حجمی عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی شده و در نتیجه انتقال حرارت بهتر انجام می‌شود. بیشتر بودن مقادیر عدد ناسلت در رینولدزهای بالاتر با افزایش کسر حجمی به دلیل افزایش انتقال حرارت ناشی از جابه‌جایی بهتر نانوسیال تحت تأثیر سرعت بیشتر درپوش است. با توجه به نقش عمده‌ی انتقال حرارت در انرژی تولیدی، با افزایش کسر حجمی رفتار انرژی تولیدی کل مشابه با رفتار عدد ناسلت متوسط افزایشی است. در همه‌ی نمودارها بیشترین افزایش در عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل با افزایش کسر حجمی در رینولدز 1000 روی می‌دهد.

4-3- مطالعه اثر عدد هارتمن بر ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل

در شکل 7 تغییرات عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل بر حسب عدد هارتمن برای  $\phi=0/04$  در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. در تمامی اعداد رینولدز با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. با افزایش عدد هارتمن و تحت تأثیر نیروی لورنتز، حرکت و جابه‌جایی سیال کاهش یافته و در نتیجه عدد ناسلت کم می‌شود. با توجه به رفتار مشابه تغییرات انرژی تولیدی کل با عدد ناسلت، با افزایش عدد هارتمن در تمامی اعداد رینولدز انرژی تولیدی کل نیز کاهش می‌یابد. از آنجایی که سهم عمده در تولید انرژی تولیدی کل مربوط به انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت است، با کاهش انتقال حرارت ناشی از افزایش عدد هارتمن، انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت کاهش می‌یابد و در نتیجه باعث کاهش انرژی تولیدی کل می‌شود.



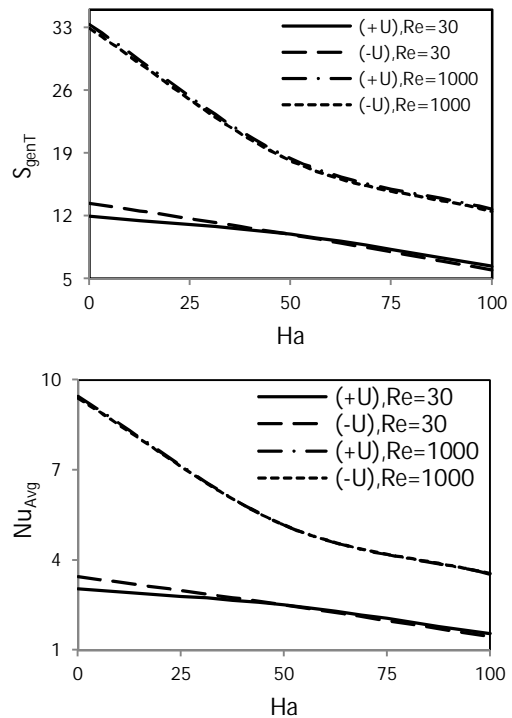
شکل 7 تغییرات عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل بر حسب عدد هارتمن در  $\phi=0/04$  برای اعداد رینولدز مختلف

- (2) برای هر وضعیت با رینولدز و هارتمن ثابت، با افزایش کسر حجمی نانوذرات بیشینه اندازه‌ی تابع جریان کاهش می‌یابد ولی عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل افزایش می‌یابد.
- (3) در همه‌ی اعداد رینولدز و کسرهای حجمی مورد بررسی با افزایش عدد هارتمن، در هر دو حالت حرکت درپوش (+U) و (-U) عدد ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل کاهش می‌یابد.
- (4) در همه‌ی حالت‌های مورد بررسی انرژی تولیدی ناشی از اصطکاک بسیار ناچیز می‌باشد و سهم عمده‌ی تولید انرژی متعلق به انرژی تولیدی ناشی از انتقال حرارت است. به همین دلیل در همه‌ی حالت‌های بررسی شده تغییرات انرژی تولیدی کل مشابه تغییرات عدد ناسلت متوسط می‌باشد.
- (5) در رینولدز 30، بیشترین کاهش و افزایش در انرژی تولیدی کل با تغییر جهت حرکت درپوش در کسر حجمی‌ها و اعداد هارتمن مورد بررسی به ترتیب 22/46 درصد (در  $Ha=0$  و  $\phi=0/04$ ) و 14/44 درصد (در  $Ha=0$  و  $\phi=0/0$ ) می‌باشد، در حالی که در رینولدز 1000 تغییر در جهت حرکت درپوش تأثیری بر تولید انرژی ندارد.

6 - فهرست علائم

$B_0$	میدان مغناطیسی اعمالی
$C_p$	گرمای ویژه فشار ثابت ( $J/kg \cdot K^{-1}$ )
$d_f$	قطر مولکول آب (nm)
$d_p$	قطر نانوذره (nm)
$F$	نیروی لورنتز (N، نیوتن)
$g$	شتاب جاذبه ( $ms^{-2}$ )
$Gr$	عدد گراش
$H$	ارتفاع محفظه (m)
$Ha$	عدد هارتمن
$J$	چگالی جریان الکتریکی ( $Am^{-2}$ )
$k$	ضریب رسانایی حرارتی ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
$k_B$	ثابت بولتزمن
$l$	اندازه‌ی ضلع پایینی محفظه (m)
$NU_{Avg}$	عدد ناسلت متوسط
$p$	فشار (Pa)
$Pe$	عدد پکله
$Pr$	عدد پرانتل
$Re$	عدد رینولدز
$Ri$	عدد ریچاردسون
$S_{gen}$	انرژی تولیدی کل ( $W \cdot m^{-3}K^{-1}$ )
$S''_{gen}$	انرژی تولیدی کل بی‌بعد
$T$	دما (K)
$u$	مولفه سرعت در راستای X
$v$	مولفه سرعت در راستای Y
$U$	مولفه سرعت بی‌بعد در راستای X
$V$	مولفه سرعت بی‌بعد در راستای Y

0/0183      0/0202      0/04      100



شکل 8 تغییرات ناسلت متوسط و انرژی تولیدی کل بر حسب هارتمن برای رینولدزهای 30 و 1000 در دو حالت (+U) و (-U) در  $\phi=0/02$  افزایش عدد هارتمن عدد ناسلت متوسط کاهش می‌یابد. مقادیر عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن، در دو حالت (+U) و (-U) به یکدیگر نزدیک می‌باشد. همچنین برای دیگر کسرهای حجمی نیز رفتار مشابهی برای تغییرات عدد ناسلت و انرژی تولیدی کل با افزایش عدد هارتمن در رینولدزهای مورد بررسی دیده می‌شود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت و تولید انرژی نانوسیال با خواص متغیر در جابه‌جایی توام در محفظه دوزنقه‌ای بررسی شد. مطالعه در عدد گراش  $10^4$ ، برای اعداد رینولدز 30، 100، 300 و 1000 (ریچاردسون از 11/11 تا 0/01)، اعداد هارتمن 25، 50، 75 و 100 و زاویه‌ی  $45^\circ$  دیواره‌های جانبی با افق و کسرهای حجمی صفر، 0/01، 0/02، 0/03 و 0/04 از نانوذرات انجام شد. معادلات حاکم با کاربرد الگوریتم سیمپلر و با استفاده از یک برنامه محاسباتی به زبان فرترن حل شدند. بر اساس نتایج عددی مشاهده شد که:

(1) با اعمال میدان مغناطیسی و به دلیل اثر نیروی لورنتز، سرعت نانوسیال و در نتیجه قدرت آن (تابع جریان) در محفظه کاهش می‌یابد. با افزایش عدد هارتمن بیشینه اندازه‌ی تابع جریان کاهش می‌یابد و جابه‌جایی توام ضعیف شده و وابسته به عدد رینولدز رفتار نانوسیال از جابه‌جایی توام به رفتار نانوسیال در جابه‌جایی آزاد و یا هدایت حرارتی نزدیک می‌شود. بگونه‌ای که در اعداد رینولدز زیاد (300 و 1000) نسبت به رینولدزهای کم (30 و 100) در اعداد هارتمن بالاتری جابه‌جایی توام نانوسیال تضعیف می‌شود.

حروف یونانی

$\alpha$	ضریب پخش حرارتی ( $m^2s^{-1}$ )
$\beta$	ضریب انبساط حرارتی ( $K^{-1}$ )
$\mu$	لزجت ( $kgm^{-2}s^{-1}$ )
$\nu$	لزجت سینماتیکی ( $m^2s^{-1}$ )
$\theta$	دمای بی‌بعد
$\theta_s$	زاویه ساق‌های دوزنقه با قاعده (درجه)
$\rho$	چگالی ( $kgm^{-3}$ )
$\chi$	ضریب بازگشت ناپذیری
$\phi$	زاویه‌ی میدان مغناطیسی نسبت به محور X
$\sigma$	ضریب رسانایی الکتریکی سیال
$\varphi$	کسر حجمی نانوذرات
$\psi$	تابع جریان ( $m^2s^{-1}$ )
$\Psi$	تابع جریان بی‌بعد
پانویس‌ها	
Avg	متوسط
c	سرد
f	سیال
h	گرم
gen	تولیدی
nf	نانوسیال
p	نانو ذره

7- مراجع

[1] 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, pp. 1504-1512, 2010.

[2] M. Bhattacharya, T. Basak, H.F. Oztop, Y. Varol, Mixed convection and role of multiple solutions in lid-driven trapezoidal enclosures, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 63, No. August, pp. 366-388, 2013.

[3] Y.A. Cengel, M.A. Boles, *Thermodynamics an Engineering Approach*, Fifth ed., McGraw-Hill, 2006.

[4] H.F. Oztop, K. Al-Salem, A review on entropy generation in natural and mixed convection heat transfer for energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 911-920, 2012.

[5] A. Bejan, *Second law analysis in heat transfer*, Energy, Vol. 5, No. 8, pp. 721-732, 1980.

[6] O. Mahian, S. Mahmud, I. Pop, Analysis of first and second laws of thermodynamics between two isothermal cylinders with relative rotation in the presence of MHD flow, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 17, pp. 4808-4816, 2012.

[7] M.M. Rashidi, S. Abelman, N. Freidooni-Mehr, Entropy generation in steady MHD flow due to a rotating porous disk in a nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 62, No. July, pp. 515-525, 2013.

[8] J. Li, C. Kleinstreuer, Entropy generation analysis for nanofluid flow in microchannels, *Journal Heat Transfer*, Vol. 132, No. 12, pp. 401-408, 2010.

[9] 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, 1142-1148, 2010.

[10] I. Pishkar, B. Ghasemi, Cooling enhancement of two fins in a horizontal channel by nanofluid mixed convection, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 59, September, pp. 141-151, 2012.

[11] A. J. Chamkha, E. Abu-Nada, Mixed convection flow in single- and double-lid driven square cavities filled with water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid: Effect of viscosity models, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 36, November-December, pp. 82-96, 2012.

[12] M. Famiouri, K. Hooman, Entropy generation for natural convection by heated partitions in a cavity, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, No. 4, pp. 492-502, 2008.

[13] A. Mukhopadhyay, Analysis of entropy generation due to natural convection in square enclosures with multiple discrete heat sources. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 7, pp. 867-872, 2010.

[14] M. Shahi, A.H. Mahmoudi, A. Honarbaksh-Raouf, Entropy generation due to natural convection cooling of a nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 7, pp. 972-983, 2011.

[15] H. Khorasanizadeh, J. Amani, M. Nikfar, Numerical investigation of Cu-water nanofluid natural convection and entropy generation within a cavity with an embedded conductive baffle, *Scientia Iranica F*, Vol. 19, No. 6, 1996-2003, 2012.

[16] C. Cho, C. Chen, K. Chen Natural convection heat transfer and entropy generation in wavy-wall enclosure containing water-based nanofluid, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 61, October, pp. 749-758, 2013.

[17] M. Magherbi, H. Abbassi, A. Ben Brahim, Entropy generation at the onset of natural convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, No. 18, pp. 3441-3450, 2003.

[18] L.B. Erbay Altac, B. Sulus, An analysis of the entropy generation in a square enclosure, *Entropy*, Vol. 5, No. 12, pp. 496-505, 2003.

[19] S. Mahmud, A.K.M. Sadrul Islam Laminar free convection and entropy generation inside an inclined wavy enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, No. 11, pp. 1003-1012, 2003.

[20] P.K. Singh, K.B. Anoop, T. Sundararajan, S.K. Das, Entropy generation due to flow and heat transfer in nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No. 21, pp. 4757-4767.

[21] R.M. Kaluri, T. Basak, Analysis of entropy generation for distributed heating in processing of materials by thermal convection, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 12, pp. 2578-2594, 2011.

[22] T. Basak, R.S. Kaluri, A.R. Balakrishnan, Effects of thermal boundary conditions on entropy generation during natural convection, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 59, No. 5, pp. 372-402, 2011.

[23] N.M. Al-najem, K.M. Khanafer, M.M. El-refaei, Numerical study of laminar natural convection in tilted enclosure with transverse magnetic, *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, Vol. 8, No. 6, pp. 651-672, 2008.

[24] P. Kandaswamy, S.M. Sundari, N. Niithyadevi, Magnetoconvection in an enclosure with partially active vertical walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, No. 7, pp. 1946-1954, 2008.

[25] M. Pirmohammadi, M. Ghassemi, Effect of magnetic field on convection heat transfer inside a tilted square enclosure. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 7, pp. 776-780, 2009.

[26] S. Sadeghi, B. Ghasemi, Mixed convection heat transfer of nanofluids in an inclined channel under magnetic field, *Journal of Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 7, pp. 18-31, 2013 (in Persian).

[27] A. Malekpor, B. Ghasemi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid filled triangular enclosure, *Journal of Modarres Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 10-21, 2013 (in Persian).

[28] H. Ashorynejad, A.A. Mohamadb, M. Sheikholeslami, Magnetic field effects on natural convection flow of a nanofluid in a horizontal cylindrical annulus using Lattice Boltzmann method, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 64, No. February, pp. 240-250, 2013.

[29] T. Basak, S. Roy, I. Pop, Heat flow analysis for natural convection within trapezoidal enclosures based on heatline concept, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 11, pp. 2471-2483, 2009.

[30] Y. Varol, Natural convection in divided trapezoidal cavities filled with fluid saturated porous media, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 9, pp. 1350-1358, 2010.

[31] H. Saleh, R. Roslan, I. Hashim, Natural convection heat transfer in a nanofluid-filled trapezoidal enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 54, No. 1-3, pp. 194-201, 2011.

[32] R. Nasrin, P. Salma, Investigation of buoyancy-driven flow and heat transfer in a trapezoidal cavity filled with water-Cu nanofluid. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, No. 2, pp. 270-284, 2012.

[33] B. Fani, A. Abbassi, M. Kalteh, Effect of nanoparticles size on thermal performance of nanofluid in a trapezoidal microchannel-heat-sink,

- [38] H.C. Brinkman, The viscosity of concentrated suspensions and solution, *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, No. 4, pp. 571–581, 1952.
- [39] H.E. Patel, T. Sundararajan, T. Pradeep, A. Dasgupta, N. Dasgupta, S.K. Das, A micro-convection model for thermal conductivity of nanofluids, *Journal of Physics*, Vol. 65, pp. 863–869, 2005.
- [40] S.V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, McGraw-Hill, Washington DC, 1980
- [41] R.D.C. Oliveski, M.H. Macagnan, J.B. Copetti, Entropy generation and natural convection in rectangular cavities, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 8-9, pp. 1417–1425, 2009.
- [42] B. Ghasemi, S.M. Aminossadati, A. Raisi, Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 9, pp. 1748-1756, 2013.
- Journal of the International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, July, pp. 155-161, 2013.
- [34] A.A. AbbasianArani, J. Amani, Experimental study on the effect of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid on heat transfer and pressure drop, *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, Vol. 42, October, pp. 107-115, 2012.
- [35] A.A. AbbasianArani, J. Amani, Experimental investigation of diameter effect on heat transfer performance and pressure drop of TiO<sub>2</sub>-water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, Vol. 44, January, pp. 520-533, 2013.
- [36] H. Khorasanizadeh, A. Aghaei, H. Ehteram, Numerical study of the effect of Brownian motion on nanofluid mixed convection in an enclosure with a square central heat source, 21st *International Conference on Mechanical Engineering*, Tehran, Iran, 7-9 May, 2013 (In Persian).
- [37] AE. Jery, N. Hidouri, M. Magherbi, AB. Brahim, Effect of an external oriented magnetic field on entropy generation in natural convection, *Entropy*, Vol. 12, No. 6, pp. 1391–1417, 2010.