# اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت غیردائم جابجایی آزاد نانوسیال آب– مس در یک محفظه متخلخل مربعی

مجید طهماسبی کهیانی<sup>۱</sup>، بهزاد قاسمی<sup>۲</sup> و افراسیاب رئیسی<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه شهرکرد (تاریخ دریافت: ۹۸۹۲۱/۱ تاریخ پذیرش:۱۳۹۵/۲/۸)

#### چکیدہ

در این مقاله انتقال حرارت غیردائم جابجایی آزاد در یک محفظه متخلخل مربعی اشباءشده با نانوسیال آب- مس در حضور میدان مغناطیسی، بهصورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. دیوارههای افقی این محفظه عایق و دمای اولیه آن  $T_i$  میباشد. دمای دیوارههای عمودی چپ و راست در ابتدا برابر با  $T_c = T_i$  است. در شروع دمای دیوار عمودی سمت راست به  $T_c > T_c$  تغییر مییابد. در معادلات بیبعدشده سه پارامتر راست در ابتدا برابر با  $T_c = T_i$  است. در شروع دمای دیوار عمودی سمت راست به  $T_c > T_c$  تغییر مییابد. در معادلات بیبعدشده سه پارامتر مؤثر وجود خواهد داشت که عبارتند از: Ha ، Ra و  $\varphi$ . Ra عد مرایل بوده و تابعی از اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد میباشد، Ha عدد هارتمن بوده و نشان دهنده شد راست کم عبارتند از: Ha ، Ra و  $\varphi$ . Ra می و شرد می از اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد میباشد، Ha عدد هارتمن بوده و نشان دهنده شدت آن معادلات بیبعد حاکم بر اساس موده و نشان دهنده شدت آر عنوان مغناطیسی است و  $\phi$ . بیانگر نسبت حجمی نانوذرات به حجم کل نانوسیال میباشد. معادلات بیبعد حاکم بر اساس مدل دارسی بهدست آمدهاند و برای حل این معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. اثر تغییر پارامترهای فرق بر میدان جریان و دما، نرخ انتقال حرارت و مدت زمان لازم جهت حصول حالت دائم در شرایط مختلف بررسی شده است. اثر تغییر پارامترهای فرق بر میدان جریان و دما، نرخ انتقال حرارت و مدت زمان لازم جهت حصول حالت دائم در شرایط مختلف بررسی شده است. اثر تغییر پارامترهای فرق بر میدان جریان و دما، نرخ انتقال حرارت، مدترمان رسیدن به حالت پایا و تغییر مکانیزم غالب انتقال حرارت در مسئله میباشد. جوابها بیانگر کاهش یا افزایش نرخ انتقال حرارت، مدترمان رسیدن به حالت پایا و تغییر مکانیزم غالب انتقال حرارت در مسئله میباشد. حوابها بیانگر کاهش زمان دستیایی به حالت دائم با افزایش است. درحالی که افزایش  $\phi$  موجب افزایش زمان پایایی مسئله میشود. در خصوص Ha دارت و مدت زمان دازم در این دائم دارسی مدوند به حالت پایا و تغییر مکانیزم غالب انتقال حرارت و مدت بران جران دائم در مر شرایط مختلف بررسی شده است. نتایج نشان دهنده تاثیرگذاری پارامترهای اشاره می بر خران و نما، در ماله می میشود. در حسیل می و مال بر کاهش یا افزایش زمان دستیایم در مر میله می واند دائم دانم در مر می و مال و در درمان در مال و مان پایای م

واژههای کلیدی: نانوسیال، محیط متخلخل، جابجایی آزاد، غیردائم، میدان مغناطیسی

# Effect of Magnetic Field on UnSteady Natural Convection Heat Transfer of Cu– Water Nanofluid in a Square Porous Cavity

M. Tahmasebi Kohyani, B. Ghasemi, and A. Raisi

Mechanical Engineering Department Shahrekord University (Received:22/November/2015; Accepted:28/November/2016)

#### ABSTRACT

Magnetic field effect on unsteady natural convection heat transfer of Cu–Water nanofluid in a square porous cavity was studied numerically in here. At first, initial temprature of the cavity was  $T_i$  and vertical walls were at temprature  $T_c = T_i$ . Suddenly the right wall's tamprature was changed to  $T_h$  and the horizontal walls were adiabatic. The effective parameters in this study were Ra , Ha, and  $\varphi$  . which appear in the non-dimensionalized equations. Ra is a function of temperature difference between hot and cold walls, Ha is a parameter that depends on the magnetic field, and  $\varphi$  is the volume fraction of nano particles. The non-dimensionalized governing equations were obtained based on darcy model. A control volume approach was used for solving these equations. The effect of the variation of parameters, Ra , Ha and  $\varphi$ , on heat transfer rate, fluid flow, isotherms, and the steady time of solution were investigated. The solutions show that steady time decreases, as Ra increases or  $\varphi$  decrease. While, variation of Ha for high Ra has different effects on steady time.

Keywords: Nano Fluid, Porous Medium, Natural Convection, Un Steady, Magnetic Field

۱- دانشجوی دکتری: matkoh@yahoo.com

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): ghasemi@eng.sku.ac.ir

۳-دانشیار: raisi@eng.sku.ac.ir

#### فهرست علائم

٧٨

	Н	طول ضلع محفظه
	Х,Ү	طولهای بدون بعد در جهتهای x و y
	g	شتاب جاذبه زمين
	Ra	عدد رایلی
	На	عدد هارتمن وابسته به ميدان مغناطيسي
	$\overline{\mathbf{N}u}$	نوسلت ميانگين
	Nu	نوسلت موضعى
	Т	دما
	U	سرعت در جهت X
	V	سرعت در جهت y
	С	ظرفیت حرارتی
	Κ	ضريب نفوذپذيرى محيط متخلخل
	k	ضريب رسانش حرارتي
	t	زمان
	Fo	زمان بدون بعد
	Fo	زمان بدون بعد ویژه
		علائم بوناني
	α	ضيب بخش جرارتـ ضيب بخش جرارتـ
)	$\varphi$	سريب پاشن افرادي نسبت حجمہ ذرات نانو به حجم کا إسبال
	θ	دمای بدهن بعد
	θ υ	دمای بدون بعد لنحت سینماتیکہ
	θ υ β	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انیساط گرمایی
	θ υ β βο	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی
	θ υ β β <sub>0</sub> Ψ	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع حریان
	θ υ β φ Ψ	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع حریان بدون بعد
	θ υ β φ Ψ Ψ ε	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان بدون بعد ضریب تخلخل محیط
	θ Β β Ψ Ψ ε	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان تابع جریان بدون بعد ضریب تخلخل محیط
	θ υ β ψ Ψ ε	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان تابع جریان بدون بعد ضریب تخلخل محیط <b>زیر نویس ها</b>
	θ υ β ψ Ψ ε pm	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان تابع جریان بدون بعد ضریب تخلخل محیط <b>زیر نویسها</b> محیط متخلخل
	θ υ β $β_0$ Ψ Ψ ε pm nf pm pf	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان تابع جریان بدون بعد ضریب تخلخل محیط محیط متخلخل محیط متخلخل
	θ υ β φ ψ ψ ψ ε pm nf pm,nf pm,nf	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان بدون بعد تابع جریان بدون بعد تابع مریان محیط محیط متخلخل نانوسیال و محیط متخلخل
	θ β β ψ Ψ ε pm nf pm,nf p	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان بدون بعد تابع جریان بدون بعد زیر نویسها ضریب تخلخل محیط نانوسیال درات جامد
	θ υ β $β_0$ Ψ Ψ ε pm nf pm,nf p h	دمای بدون بعد لزجت سینماتیکی ضریب انبساط گرمایی شدت میدان مغناطیسی تابع جریان بدون بعد تابع جریان بدون بعد تابع میان بدون بعد زیر نویسها محیط متخلخل محیط متخلخل نانوسیال و محیط متخلخل ذرات جامد

ديواره سرد c حالت دائم s بيشينه max

# ۱– مقدمه

محیطهای متخلخل و بررسی پدیده انتقال در آنها جایگاه ویژهای در تکنولوژی و صنعت دارد. این اهمیت باعث شده که محققان در سالهای اخیر توجهی ویژه بهبررسی پارامترهای تأثیرگذار بر انتقال حرارت در محیطهای متخلخل داشته باشند. در زمینه استفاده از محیطهای متخلخل، بهعنوان مثال کاربردی میتوان به مبدلهای زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای راکتورها، خنککاری قطعات الکترونیکی، عایقهای حرارتی، انرژیهای زمین گرمایی و غیره اشاره کرد. این موارد و کاربردهای بیشتر را میتوان در مراجع [۱-۴] یافت. بررسی انتقال حرارت در محیطهای متخلخل با شرایط مرزی مختلف یکی از موضوعات مهم در این زمینه بهشمار میرود و مقالات زیادی در این زمینه به ثبت رسیده است. اندرسن و لاریت [۵] جابجایی طبیعی در یک محفظه که دارای دیوارههای عمودی سرد و دیواره کف گرم در دمای یکنواخت میباشد را بررسی کردهاند. کیمورا و بیجن<sup>۲</sup> [۶] جابجایی طبیعی را به صورت عددی در یک محفظه مستطيلي كه سطح كف آن خنك نگه داشته شده است و به یکی از دیوارههای عمودی نیز شار وارد میشود را بررسی نمودهاند. پپ و سعید<sup>۳</sup> [۷] در زمینه محیطهای متخلخل ساده مقالهای ارائه کردند که با افزایش عدد رایلی، زمان رسیدن به عدد نوسلت ثابت کمتر و با کاهش عدد دارسی، اختلاف بین دو مدل میکروسکپی و ماکروسکپی زیاد میشود. چائو و اوزی<sup>۴</sup> [۸] بهبررسی جابجایی طبیعی در یک محفظه مورب که نیمی از کف آن عایق و به نیم دیگر شار گرمایی وارد شده و دیوار بالایی نیز خنک شده است، پرداختهاند. گرانزارولی و میلانز<sup>۵</sup> [۹] بهبررسی محفظهای که دارای دیوارههای عمودی سرد در دمای یکنواخت بوده و شار حرارتی نیز از کف محفظه وارد می شود، پرداختهاند. سعید [۱۰] انتقال حرارت جابجایی در یک محیط متخلخل که توسط دو لایه با ضخامت محدود احاطه شده است را مورد بررسی قرار داده است که از جمله نتایج آن می توان به افزایش مقدار سیر کولیشن با دو عامل کاهش ضخامت دیوارهها و افزایش نسبت ضریب رسانش

1 - Anderson	and	Lauriat
--------------	-----	---------

- 2 Kimura and Bejan
- 3 Pop and Saeid
- 4 Chao and Ozoe
- 5 Granzarolli and Milanez

متخلخل نیمه بی نهایت در حضور صفحه جامد پرداختند. آنها به ارائه نتیجه تحقیقات به صورت حل عددی و تحلیلی مبادرت ورزیدند و در اعداد ریلی مختلف رژیمهای گوناگون انتقال حرارت غيردائم و جواب دائم مسئله را يافته و مورد تحليل و بررسی قرار دادهاند. به عنوان نمونه نشان دادهاند که در اعداد ریلی بزرگرسیدن به حالت دائم به شدت شتاب می گیرد. اسلام و نانداکوما<sup>۵</sup> [۱۸] اثرات تولید انرژی داخلی یکنواخت بر واحد حجم بر انتقال حرارت غیردائم در محیطهای متخلخل را مورد تحقيق قرار دادهاند و انگيزه خود از اين كار را اهميت موضوع و کاربرد آن در ذخیره پسماندهای رادیواکتیو و علوم زمین گرمایی بیان کردهاند. از نتایج این تحقیق می توان به بررسی اثر افزایش و کاهش میزان تولید انرژی بر رژیم جریان و اثرات آن بر جواب پایدار مسئله اشاره کرد. چمخا و اسماعیل<sup>8</sup> [۱۹] به بررسی انتقال حرارت ترکیبی جابجایی آزاد و هدایت در محفظه مستطيلي حاوى محيط متخلخل و نانوذرات كه بهوسیله یک دیوار جامد مثلثی گرم می شد پرداختهاند. آنها اثر اضافه نمودن نانوذرات مس، اکسیدآلومینیوم و اکسیدتیتانیوم به سیال پایه آب در محیط متخلخل را در شرایط متفاوت پارامترهای اثرگذاری همچون عدد ریلی، Ra، نسبت حجمی ذرات نانو، arphi، ضخامت دیوار جامد، D، و نسبت رسانش حرارتی محیط متخلخل به جامد، kr<sub>0</sub>، را مورد تحقیق قرارداده و در هر حالت مشخصههای حرارت و سیالاتی همچون خطوط دما ثابت، جریان و میزان انتقال حرارت میانگین و موضعی را ارائه نمودند. از نتایج مهم این بررسی میتوان بهشدتیافتن انتقال حرارت در اعداد ریلی پایین با افزایش  $\phi$  اشاره کرد. همچنین نشان داده شد که وابسته بهمیزان arphi با افزایش یا كاهش ضخامت ديوار جامد انتقال حرارت تغيير خواهد كرد. یاب و سان<sup>۷</sup> [۲۰] جابجایی آزاد در محفظه مثلثی قائمالزاویه حاوی محیط متخلخل در حضور نانوذرات را در شرایطی که قسمتی از دیوار عمودی محفظه دارای دمای ثابت  $T_h$  و دیوار شیبدار در دمای  $T_c$  بوده است را مورد بررسی قرار دادهاند. معادلات حاصل بر فرضیات دارسی استوار بوده و نانوسیال براساس مدل تیواری و داس<sup>۸</sup> [۲۱] شبیهسازی شده است. در این شرایط اثر پارامترهای مختلفی همچون عدد ریلی، Ra،

دیوارهها به ضریب رسانش محیط متخلخل (Kr) اشاره کرد. در این مقاله همچنین نشان داده شده است که با افزایش Kr عدد نوسلت و گرادیان دمای افقی افزایش مییابند. چمخا و همکارانش [۱۱] یک محفظه متخلخل در معرض تشعشع را مورد بررسی قرار دادند. علاوهبر تحقیقات فوق که در آنها انرژی گرمایی بر روی مرزهای محفظه اعمال میشود، در برخی تحقیقات نیز منبع انرژی در داخل محفظه در نظر گرفته شده است. پپ و سعید [۱۲] به بررسی انتقال حرارت جابجایی در یک محیط متخلخل عمودی با دو منبع حرارتی پرداختهاند که در آن تغییرات پارامترهایی از جمله اعداد رایلی و پکلت و فاصله ميان منابع گرمايي بر نرخ انتقال حرارت مورد توجه واقع شده است. گروسان<sup>۲</sup> و همکارانش [۱۳] به بررسی اثرات تولید حرارت داخلی و میدان مغناطیسی در یک محیط متخلخل پرداختهاند و نشان دادهاند که میزان انتقال حرارت جابجایی بهشدت به پارامترهایی از جمله عدد رایلی و عدد هارتمن، Ha تابعی از شدت میدان مغناطیسی وابسته است. همچنین نشان دادهاند که عدد نوسلت موضعی در دیوارههای افقی با تغییر زاویه میدان مغناطیسی از حالت افقی به عمودی تغییر قابل ملاحظهای دارد. میلی و مرکین<sup>۳</sup> [۱۴] انتقال حرارت جابجایی در محیط متخلخل با تولید انرژی داخلی را مورد مطالعه قرار دادهاند. آنها نشان دادهاند که در اعداد رایلی بزرگ لایههای مرزی با گردابههای ادی در نواحی مرکزی دیوارههای عمودی ایجاد می شود. از دیگر نتایج آن می توان به دستیابی به دمایی بالاتر از دمای دیوار گرم توسط تولید انرژی داخلی درون محیط متخلخل اشاره کرد. طیبی و عباسی [۱۵] اثر آرایشهای مختلف قرارگیری و تغییر ضخامت ماده متخلخل در یک لوله پهنشده را مورد بررسی قرار دادند که ازجمله نتایج آن استفاده از آرایش مرکزی برای افزایش انتقال حرارت و آرایش مرزی برای عایق میباشد. کیهانی و محبی [۱۶] به بررسی عددی جریان سیال و انتقال حرارت در محیط متخلخل بین دو صفحه موازی پرداختهاند و نشان دادند که وجود موانع ثابت در دامنه محاسباتى بهعنوان محيط متخلخل، موجب افزايش عدد نوسلت متوسط می شود. وینسکی و کیمورا<sup>۴</sup> [۱۷] به بررسی انتقال حرارت غیردائم ترکیبی جابجایی آزاد و هدایت در یک محیط

1 - Chamkha

<sup>5 -</sup> Islam and Nandakumar

<sup>6 -</sup> Chamkha and Muneer

<sup>7 -</sup> Sun and Pop

<sup>8 -</sup> Tiwari and Das

<sup>2 -</sup> Grosan3 - Mealey and Merkin

<sup>4 -</sup> Vynnycky and Kimura

اندازه هیتر، Ht، و نسبت حجمی ذرات نانو،  $\varphi$ ، بررسی شده است. از نتایج تحقیق میتوان به حاصل شدن بیشینه انتقال حرارت در بزرگترین عدد ریلی، کوچکترین اندازه محفظه در شرایطی که هیتر در پائین قرار دارد اشاره کرد. دیگر آن که در اعداد ریلی کوچک افزایش نسبت حجمی ذرات نانو،  $\varphi$ ، موجب بهبود انتقال حرارت از محفظه میگردد درحالی که در اعداد ریلی بزرگ این نتیجه عکس میگردد. هرچند تحقیقات فراوانی در رابطه با محیطهای متخلخل انجام شده، اما کمتر به حضور میدان مغناطیسی در مسائلی که نانوسیال محیط را اشباع نموده، توجه شده است. در این راستا تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر وجود همزمان میدان مغناطیسی و نانوسیال بر انتقال حرارت غیردائم در محیطهای متخلخل انجام شده است. رادیواکتیو و علوم زمین گرمایی میباشد.

۲- بیان مسئله و روش حل

شماتیک مسئله مورد بررسی در شکل ۱ نمایش داده شده است. محفظه مربعی بوده دیوارههای افقی آن عایق و دمای اولیه آن  $T_i$  میباشد. دمای دیوارههای عمودی چپ و راست در ابتدا برابر با  $T_c$  بوده که  $T_c = T_i$  است. در شروع دماه دیوار عمودی سمت راست به  $T_c = T_i$  تغییر میابد. همان گونه که از شکل مشخص است محفظه تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت با شدت  $\beta_0$  موازی با اضلاع عمودی محفظه با جهت پایین به بالا است.



شکل (۱): نمایی از محفظه مورد بررسی.

فرض می شود که محیط متخلخل همسانگرد و همگن است و در حالت کاملاً اشباع قرار دارد. نانوسیال و محیط در شرایط تعادل دمای محلی قرار دارند و از اثرات اتلاف اصطکاکی و ترم

$$\mathbf{V}.\mathbf{I} = \mathbf{0} \tag{1}$$

ازطرفی باتوجه به قوانین الکترو مغناطیس خواهیم داشت: I =  $\sigma(-\nabla\phi + V \times B)$  (۲) که در آن،  $\sigma$  رسانش الکتریکی، v بردار سرعت سیال و B میدان مغناطیسی خارجی میباشد و  $\phi \nabla$  – به میدان الکتریکی وابسته است. گارانتد و همکاران [۲۳] نشان دادند معادلات (۱ و ۲) به  $0 = \phi^2 \nabla$  تبدیل میشوند که جواب خاص آن  $0 = \phi \nabla$  است. با مراجعه به کار آلچار و همکاران میشوند میدان الکتریکی درون آن حذف می گردد. با توضیحات میشوند میداد الکتریکی درون آن حذف می گردد. با توضیحات ذکرشده معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی حاکم بر رفتار سیال در حالت دوبعدی به صورت زیر می شود: (۳) پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

$$\vec{\mathbf{V}} = \frac{\mathbf{K}}{\mu} \left( -\nabla \mathbf{P} + \rho \vec{\mathbf{g}} + \mathbf{I} \times \vec{\mathbf{B}} \right),$$

(۵) انرژی:  $\Gamma_{pm,nf} \frac{\partial T_{nf}}{\partial t} + u \frac{\partial T_{nf}}{\partial x} + v \frac{\partial T_{nf}}{\partial y} = \alpha_{m,nf} \left( \frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{nf}}{\partial y^2} \right).$ (Y) در این روابط، u و V مؤلفههای سرعت در جهتهای X و Y. T<sub>nf</sub> دمای نانوسیال و K ضریب نفوذپذیری محیط متخلخال

(۴) ممنتوم:

3 - Alchaar

<sup>1 -</sup> Revnic and Grosan

<sup>2 -</sup> Garandet

میباشند. بقیه پارامترها در فهرست علائم آورده شدهاند. پس از سادهسازی معادله ممنتوم میتوان آن را بـهشـکل زیـر نمـایش داد:

		بازى:	س از سادەس	ىمنتوم پى	(۶) م
∂u	$\frac{\partial v}{\partial v}$	$g((1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_f)$	$D_p K \partial T_{nf}$	$\sigma_{nf}KB_0^2$	∂и .
ду	$\partial x$	$\mu_{nf}$	$\partial x$	$\mu_{nf}$	$\partial y$
دول ۱	، در جـ	کاررفته در معادلات فوق	رامترهای به	ب کلیه پا	تعريف
				است.	آمده

$rac{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{r}{$				
مدل محاسبه	پارامتر[مرجع]			
$\alpha_{\rm nf} = k_{\rm nf} / (\rho c)_{\rm nf}$	پخش حرارتی [۲۵]			
$(\rho c)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho c)_f + \varphi(\rho c)_f$	$(x)_p$ [۲۶] ظرفیت حرارتی (۲۶			
$k_{nf} = \frac{(k_{p} + 2k_{f}) - 2\varphi(k_{f} - k_{p})}{(k_{p} + 2k_{f}) + \varphi(k_{f} - k_{p})} k_{f}$	رسانش حرارتی [۱۹]			
$\mu_{nf} = \mu_f / (1 - \varphi)^{2.5}$	لزجت[۲۷]			
$\frac{\sigma_{n_f}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3((\sigma_p / \sigma_f) - 1)\varphi}{((\sigma_p / \sigma_f) + 2) - ((\sigma_p / \sigma_f) - 1)\varphi}$	ضریب رسانش الکتریکی [۲۸]			
$(\rho\beta)_{nf} = (1-\varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho)_f$	انبساط حرارتی [۱۹] <i>(β</i> )			
$\varphi = \forall_p / (\forall_p + \forall))$	نسبت حجمی نانوذرات (			
$(\rho c)_{pm,nf} = (1 - \varepsilon)(\rho c)_{pm} + \varepsilon$	ظرفیت حرارتی میانگین (pc)			
$k_{pm,nf} = (1 - \varepsilon)k_{pm} + \varepsilon k_{nf}$	رسانش حرارتی میانگین			
$\Gamma_{pm,nf} = \varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{(\rho c)_{pm}}{(\rho c)_{nf}}$	نسبت ظرفیت حرارتی میانگین			
$\alpha_{pm,nf} = k_{pm,nf} / (\rho$	$x)_{nf}$ پخش حرارتی میانگین $$			

:۲	حدول	طىق	ىعد	ىدەن	هاي	یار امتر	تعريف	ե
	()).	LJ.		())	0	1 1		

جدول (۲): تعريف پارامتر ها جهت بی بعد سازی معادلات.

شيوه تعريف	پارامتر بدون بعد
$\Psi = \frac{\Psi}{\alpha_{pm,nf}}$	تابع جريان
$ heta = rac{T-T_c}{T_h-T_c}$	دما
$X = \frac{x}{H}; Y = \frac{y}{H}$	مکان در جهت افقی و عمودی
$Fo = \frac{t\alpha_{pm,nf}}{H^2}$	زمان
$\overline{Fo} = \frac{Fo}{\Gamma_{pm,nf}}$	زمان ویژه

معادلات را میتوان به حالت بدون بعد و بر حسب تابع جریان، که به صورت  $\frac{\partial \psi}{\partial y}$  و  $u = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$  تعریف می شود، نوشت: (۷) ممنتوم بیبعد:  $\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = -Ra.\Delta \frac{\partial \theta}{\partial X} - Ha.\Omega \frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2},$ (۸) انرژی بی بعد:  $\frac{\partial\theta}{\partial\overline{Fo}} + \frac{\partial\Psi}{\partial Y}\frac{\partial\theta}{\partial X} - \frac{\partial\Psi}{\partial X}\frac{\partial\theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{pm,nf}}{\alpha_{pm,f}}\left(\frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2\theta}{\partial Y^2}\right).$ در روابط فوق، Ra عدد ریلی است و به صورت تعريف مے شود کے، Ra =  $(g\rho_f \beta_f K\Delta TH)/(\mu_f \alpha_{pm,f})$ و Ha و  $\Delta T = (T_h - T_c)$  و  $\Delta T = (T_h - T_c)$ مغناطیسے بودہ و بے صورت  $Ha = (\sigma_{_f} KB_{_0}^{_2})/\mu_{_f}$  بیان می شود. دو پارامتر ظاهر شده دیگر در معادلات به شکل های 9  $\Delta = \left| (1-\varphi) + \varphi \left( \frac{\rho_p \beta_p}{\rho_s \beta_s} \right) \right| \times (1-\varphi)^{25}$  $\Omega = \left[1 + \frac{3((\sigma_p, \sigma_f) - 1)\rho}{((\sigma_p, \sigma_f) + 2) - ((\sigma_p, \sigma_f) - 1)\rho}\right] \times (1 - \rho)^{25}$ قابل معرفی هستند. همانطور که از تعریف این دو پارامتر مشخص است اثر حضور نانوذرات در سیال پایه توسط آنها به معادله ممنتوم القاء مي گردد. اين امر در معادله انرژي به كمـک ضریب  $rac{lpha_{\scriptscriptstyle pmnf}}{lpha}$  محقق می شود. در جدول ۳ خواص ترموفیزیکی مواد به کاررفته برای مدلسازی مسئله ارائه شده است.

**جدول (۳):** خواص حرارتی و فیزیکی محیط متخلخل (آلومینیوم)، نانوذرات (مس) و سیال پایه (آب).

• -			-
خاصيت فيزيكى	آب	مس	آلومينيوم
$C_p(J/kg/K)$	4124	347	٩٠٣
$\rho(kg/m^3)$	997/1	۸۹۳۳	۲۷۰۲
k(W/m/K)	•/818	4.1	۲۳۷
$\beta \times 10^{5} (1/K)$	۲۱	١/۶٧	-
$\sigma(1/\Omega.m)$	•/•۵	۵/۹۶е۷	-
$\alpha \times 10^7 (m^2/s)$	١/۴٧	1187/1	-

شرایط مرزی و اولیه مسئله مورد نظر با استفاده از پارامترهای بدون بعد بهصورت زیر میباشد: (۹) شرایط مرزی:

$$\begin{aligned} \theta(0, \mathbf{Y}) &= 1, \theta(1, \mathbf{Y}) = 0, \\ \theta_{Y}(\mathbf{X}, 0) &= \theta_{Y}(\mathbf{X}, 1) = 0, \\ \Psi(0, \mathbf{Y}) &= \Psi(1, \mathbf{Y}) = \Psi(\mathbf{X}, 0) = \Psi(\mathbf{X}, 1) = 0, \end{aligned}$$

$$(\mathbf{Y}, 0) &= \Psi(1, \mathbf{Y}) = \Psi(\mathbf{X}, 0) = \Psi(\mathbf{X}, 0) = \Psi(\mathbf{X}, 0) = 0.$$

)

www.SID.ir

$$\begin{split} \theta_0(\mathbf{X},\mathbf{Y}) &= \Psi_0(\mathbf{X},\mathbf{Y}) = 0 \, . \\ \text{cr} \quad \text{is in the set of the$$

# ۳- روش حل عددی

برای جبری کردن معادلات بیبعدشده از روش حجم کنترل استفاده شده است. همان طور که از روابط (۷ و ۸) پیدا است، معادلات مذکور به یکدیگر مرتبط بوده و باید بهصورت همزمان حل شوند. برای تقریب جملات پخش از تقریب تفاضل مرکزی و در رابطه با جملات جابجایی پخش از روش پاورلا استفاده شده است [۲۹] برای بهدست أوردن جوابهایی دقیق باید از شبکهبندی متناسب با شرایط مرزی و هندسه مسئله استفاده نمود، زیرا در غیر این صورت جواب ها واگرا شده و یا غیردقیق بهدست میآیند. برای شبکهسازی از روشهای گوناگونی استفاده میشود. در مرجع [۳۰] در این مورد توضيحات كافي آمده است. در مقاله حاضر از روش جبري براي شبکهسازی استفاده شده است. بـرای شـبکهبنـدی از شـبکه غیریکنواخت به گونهای استفاده شده که در نزدیکی مرزهای محفظه اندازه شبکه ریزتر باشد، چون در آنجا تغییرات شدیدتر است. در حلهای عددی یکی از نکات مهم عدم وابستگی جوابها به تعداد نقاط شبکه است، باتوجه به بررسی هایی که روی پارامترهای مهم مسئله، برای نشاندادن عدم وابستگی حل به تعداد نقاط شبکه انجام گرفت، از شبکه بهینه در حل استفاده شده است. نمونهای از این بررسیها در جدول ۴ مشاهده می شود. باتوجه به دادهها مشاهده می شود که تغییرات بیشینه تابع جریان دامنه حل،  $\Psi_{\max}$  و عدد نوسلت، Nu از شبکه ۶۱×۶۱ تا ۱۲۱ × ۱۲۱ بسیار کم است و از شبکه ۱۰۱ × ۱۰۱ به بعد تقریباً تغییراتی ندارد.

تعداد نقاط شبكه.	حل به	م وابستگی	بررسی عدہ	. (۴):	جدور
------------------	-------	-----------	-----------	--------	------

Ha=1	Ra=1		Ra=	= ) • • •		
	$\varphi = \cdot / \cdot \Delta$		$\varphi = \cdot / \cdot \Delta$		φ=	= •/N
ابعاد شبكه	Nu	$\Psi_{max}$	Nu	$\Psi_{\rm max}$		
81 × 81	۲/۱۹۲	371174	14/14	٨/۶٧		
$\lambda$ ) $\times$ $\lambda$ )	۲/۱۹۸	311/3	14/21	۸/۶۴		
1 • 1 × 1 • 1	۲/۲۰۱	٣/١٢١	14/22	۸/۶۳		
171 × 171	۲/۲۰۲	٣/١٢١	14/78	٨/٦٢٩		

پس برای داشتن سرعت و دقت بالاتر در روند حل از شبکه ۱۰۱ × ۱۰۱ استفاده شده است. معادلات جبری بهدست آمده بهوسیله روش تکرار خطبه خط و با استفاده از الگوریتم ماتریس سهقطری حل شدهاند. همگرایی فرآیند تکرار تا رسیدن به محدودیت زیر ادامه مییابد:

$$\left|\overline{Nu}_{h}^{n}-\overline{Nu}_{c}^{n}\right|/\overline{Nu}_{h}^{n}\leq10^{-4}$$
(1)

که در رابطه (۱۲)، n شمارنده تکرارگام زمانی است. در کار حاضر از گام زمانی ۰/۰۰۶ برای حل مسئله استفاده شده است.

## ۴– بحث در نتایج

برای اطمینان از صحت کد کامپیوتری نوشه شده، در ادامه در جدول **۵** نتایج با تولید انرژی در محفظه متخلخل در حالتی که دیوارهای عمودی هر دو در دمای یکسان قرار داشته، و میدان مغناطیسی وجود ندارد با مرجع [۱۳] مقایسه شده است. همچنین در جدول ۶، نتایج مقایسه با مرجع [۲۲] برای حالت محیط متخلخل ساده با شرایط مرزی مشابه کار حاضر آمده است. در جدول **۵** بیشینه تابع جریان و دما و در جدول ۶ عدد نوسلت در محفظه با مراجع اشاره شده در حالت  $\varphi = 0$ مقایسه شده است.

[۱۳] در Q=Ha=0 .	با مرجع	$\theta_{max} \cdot \Psi_{max}$	: مقايسه	حدول (۵):
------------------	---------	---------------------------------	----------	-----------

	پارامتر مورد بررسی در Ra=1000				
نویسنده	$\Psi_{max}$	θ <sub>max</sub>			
Grosan [13]	۳/۵۱	۰/۰۹۸			
کار حاضر	٣/۵٣	٠/• ٩٧			

جدول (۶): مقايسه Nu با مرجع [۲۲].

نویسنده	Pop [77]		کار حاضر
Ra		Nu	
\ • • (Q=Ha=0)	۳/۱۰۸		٣/١٢
\ · · · (Q=Ha=0)	18/818		18/810
$\cdots (Q=Ha=1)$	11/919		11/408

باتوجه به جداول **۵** و ۶ مشاهده می شود که نتایج به دست آمده با مرجع اشاره شده به خوبی مطابقت دارد. اختلاف موجود بین نتایج، ناشی از تقریب های مختلف و یا معیارهای همگرایی متفاوت استفاده شده در زمان حل می باشد. لازم به ذکر است که Q پارامتر تولید انرژی یکنواخت بر واحد حجم در محیط

می باشد. بعد اطمینان از عملکـرد برنامـه رایانـهای بـه بررسـی مسئله حاضر پرداخته میشود.

### Ha اثر تغییر

در ایـن قسـمت، در ۲۰۰ و Ra اثـر تغییـر شـدت  $\varphi = \cdot / \cdot \Delta$ میدان مغناطیسی در قالب پارامتر Ha بررسی میشود. در شکل ۲ خطوط دما ثابت (راست) و جریان (چپ) برای سه مقدار Ha متفاوت آمده است. در این شکل می توان به کاهش  $\Psi_{\max}$  قدرت گردابههای و حرکت محل بیشینه تابع جریان، بهسمت مرز دما بالا با افزایش Ha اشاره کرد. ازطرفی عمودی شدن خطوط هم دما با افزایش Ha را می توان ناشی از افزایش قدرت سازوکار انتقال حرارت هدایتی از محفظه دانست که با کاهش میزان انتقال حرارت از محفظه و به تبع افزایش زمان دستیابی به حالت دائم،  $Fo_s$  همراه است. که این امر به وضوح در شکل ۳ مشاهده می شود. لازم به ذکر است از هر جفت خط همگرا شونده خط بالا و پایین بهترتیب نشان دهنده تغییرات انتقال حرارت از مرز دما بالا  $\overline{\mathrm{Nu}_{\mathrm{h}}}$  و دما پایین Nu<sub>c</sub> با زمان بدون بعده، Fo، است. در این شکل مختصات افقی محلی که خطوطی نهایتا به یکدیگر همگرا می شوند نشاندهنده  ${
m Fo}_{
m s}$ و مختصات عمودی محل تقاطع خطوط نمایانگر Nu در حالت دائم است. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است، انتقال حرارت از مرز گرم،  $\overline{\mathrm{Nu}_{\mathrm{h}}}$  ، در شروع از مقادیر بزرگ و در مرز سرد، Nu<sub>c</sub>، از مقدار صفر به عدد نهایی در حالت دائم میل می کنند. که با شرایط مرزی و اولیه محفظه مطابقت دارد. نکته قابل ذکر دیگر از شکل ۳ آن که انتقال حرارت از مرز سرد از Fo = 6 شروع شده است که بهدلیل همدمابودن دمای اولیه محفظه با دیواره سرد کاملا منطقی مى باشد.

## $\varphi$ -۲-۴ اثر تغییر-۴

جهت بررسی اثر تغییر نسبت حجمی ذرات نانو مشخصه های حرارت و سیالاتی به ازایHa=1 و ۲۰۰۰ه برای  $\varphi$ های مختلف مورد تحقیق قرار گرفته اند. در شکل f خطوط دما ثابت (راست) و جریان (چپ) برای سه مقدار  $\varphi$  متفاوت آمده است. در این شکل میتوان کاهش قدرت گردابهها با افزایش  $\varphi$  را مشاهده نمود. هرچند در مقادیر  $\varphi$ استفاده شده در شکل  $\delta$  محسوسی در شکل خطوط دما ثابت ایجاد نشده در شکل  $\delta$ 

کاهش میزان انتقال حرارت از محفظه و به تبع آن افزایش  $\varphi$ مشهود  $\overline{\text{Fo}_{\text{s}}}$  با افزایش  $\varphi$ مشهود است. لازم به ذکر است در این مقاله به علت عدم عملی بودن مقادیر بزرگ  $\varphi$  حداکثر از ۰/۱ =  $\varphi$ استفاده شده است.



Ha = 1 :ب-۲



**شکل (۲):** خطوط جریان (چپ) و همدما (راست) بهازای ۲۰/۵ جریان (همتغیر و ۱۰۰ Ra.



شکل (۳): تغییرات Nu با Foدر مرزهای گرم (خطوط بالا)و سرد (خطوط پائین) باتغییر Ha در ۱۰۰= Ra و۰/۰۵ = *φ* 

Ra اثر تغيير ۳-۴ در این بخش هدف بررسی اثر افزایش Ra از ۱۰۰ به ۱٬۰۰۰ 0.88 در شرایط Ha=۱ و  $\phi = 0.00$  است. آنچه از مشاهده شکلهای -15.86 0.50 ۶ و ۷ مشخص است افزایش قدرت گردابه ها و انتقال حرارت از محفظه و بهدنبال آن کاهش مدت زمان دستیابی به حالت پایا 0.06 با افزایش عدد رایلی میباشد.  $\varphi = \cdot / \cdot \cdot = - \epsilon$ 0.94 6.86 -3.19 0.50 -14.71 6.06 ۶- الف: Ra = 100  $\varphi = \cdot / \cdot \Delta : - \epsilon$ 0.94/ 0.94 -6.23 0.63 -9.32 0.50 -13.34 0.06 10 06 ۶- ب. Ra = 500  $\varphi = \cdot / 1 := - \mathfrak{k}$ 0.94 شکل (۴): خطوط جریان (چپ) و همدما (راست) -6.86 بهازای ۲=۱۰۰۰، ۲۵ الا ج $\varphi$ متغییر. Ra 0.50 -14.71 6.06 Nu Ra=1000, Ha=1 Ra = 1000: - 930 شکل (۶): خطوط جریان (چپ) و همدما (راست) بهازای ۲۰۵ بهازای ۲۰۵ بهازای ۲۰۵  $\varphi = +$  و Ra متغییر. Hot wall 20  $\varphi = 0.01$  $\phi = 0.05$ همان گونه که انتظار می رفت افزایش Ra موجب افقی شدن 10 خطوط همدما يعنى افزايش قدرت مكانيزم انتقال حرارت Cold wal  $\phi = 0.1$ جابجایی در محفظه شده است. در شکل ۸ تغییرات نوسلت 0 -<sup>–</sup><sub>10</sub>Fo موضعی در دیوارههای گرم و سرد با عدد رایلی در حالت دائم (خطوط بالا) شکل (۵): تغییرات  $\overline{\mathrm{Nu}}$  با  $\overline{\mathrm{Fo}}$  در مرزهای گرم (خطوط بالا) ارائه شده است نكات قابل استنباط از این شكل عبارتند از:

۱- افزایش نوسلت موضعی در مرزها با افزایش عدد رایلی و

و سرد(خطوط پائین) بهازای ۲=۱ ، ۲۰۰۰ Ra و  $\varphi$  متغییر.

۲- بیشترین مقدار نوسلت موضعی در مرز گرم در پایین محفظه و در مرز سرد در بالای آن حاصل شده است، زیرا تجمیع سیال دما بالا با چگالی کمتر در بالای محفظعه و دما پایین با چگالی بیشتر در پایین آن حد اکثر گرادیان دما در محل های ذکر شده را موجب شده است.



# ۴–۴– جمع بندی جواب ها در حالت دائم

هدف در این بخش رویت نتیجه کلی حالات قبل و معین نمودن حالات استثنا در نتایج کار حاضر می باشد. بدین منظور پارامترهای خروجی و اثرگذار بر روند حل در شرایط مختلف در جدول ۶ تجمیع شده است. بررسی جدول مذکور نمایانگر

کاهش مدت زمان دستیابی به حالت پایا با افزایش Ra است. از سوی دیگر در مقادیر بزرگ Ra، ۱٬۰۰۰، مستقل از مقدار  $\varphi$  با افزایش Ha از مقدار صفر تا یک زمان رسیدن به حالت دائم اندکی کاهش خواهد داشت. البته هرچند این کاهش بسیار کوچک است اما شاید بتوان دلیل آن را در ایجاد نیروی تشدیدکننده رژیم جابجایی جریان در محفظه در چنین شرایطی دانست. به ازای مقادیر بزرگتراز یک عدد Ha افزایش Ha مدت زمان حالت پایا با افزایش این پارامتر رابطه مستقیم دارد. مدر مقادیر مقادیر کوچک است و افزایش این پارامتر رابطه مستقیم دارد. از مقادیر کوچک آب معادی از مقدار  $\varphi$  با افزایش آب مدت زمان حالت پایا با افزایش این پارامتر رابطه مستقیم دارد. از مقادیر کوچک آب مقادیر کوچک آب مقدار رابطه مستقیم دارد. محفظه در مقادیرکوچک آب مقادیر زخواهد شد. در خصوص از مقدار رابطه آب موان کارت مان افزایش آب زمان آب مواره زمان گذار مسئله را افزایش و انتقال حرارت افزایش آز محفظه را کاهش می دهد.

جدول (۶): جمعبندی نتایج حاصله.

На	Ra=1			$Ra=1\cdots$			$\varphi$
↓	Nu	$\Psi_{\rm max}$	$\overline{\mathrm{Fo}_{\mathrm{s}}}$	Nu	$\Psi_{\rm max}$	Fos	$\downarrow$
•	۲/۸۰	۴/۲۵	26/26	11/41	۱۸/۷۸	۸/۱۸	
١	۲/۲۰	٣/١٢	21/26	۹/۸۲	۱۵/۶۸	۸/۱۳	•/•۵
١٠	1/17	۰/۹۶	۳۵/۴۰	۴/۱۵	۶/۸۴	14	
•	۲/۵۵	۳/۸۲	26/21	۱۰/۷۱	17/21	٨/٧١	
١	٢	۲/۷۸	<b>T9/VT</b>	۹/۰ ۱	14/22	λ/۶٣	•/1
١٠	١/١٠	٠/٨۴	۳۷/۲۰	۳/۷۲	۶/۰۸	10/24	

و Ra=۱۰۰ بررسی روند پایایی مسئله برای مقادیر Ra=۱۰۰ و  $\varphi = \cdot/1, \text{Ha} = 1$  در Ra=۱۰۰۰

با مشاهده تصویر ۱۰ که نمایانگر شکل گیری خطوط دما ثابت و جریان در زمان های مختلف بهازای ۱/۰ = Ha = 1،  $\varphi = 1$ ،  $\varphi = 1$ ,  $\varphi = 1$ ,  $\varphi = 1$ ،  $\varphi = 1$ ,  $\varphi = 1$ 



شکل (۱۲): تغییرات خطوط جریان (چپ) و همدما (راست) به  $\overline{Fo}$  به ازای ۲/۰ =  $\varphi$  ا ( $\varphi$  = ۱۰۰۰ ع Ra به ترتیب از بالا به پایین در 8/ $\overline{Fo}_s/4$ ,  $\overline{Fo}_s/4$ ,  $\overline{Fo}_s/8$ ,  $\overline{Fo}_s/6$ 

شکل (۱۰): تغییرات خطوط جریان (چپ) و همدما (راست) با  $\overline{Fo}_{s}$  به ازای ۲/۰ = ۲،  $\varphi = ۱. \varphi$  به ترتیب از بالا به پایین در 8/ $\overline{Fo}_{s}$ , 4,  $\overline{Fo}_{s}/4$ ,  $\overline{Fo}_{s}/8$ 

خواهد شد. در خصوص  $\phi$  افزایش آن همواره زمان گذار مسئله را افزایش و انتقال حرارت از محفظه را کاهش میدهد.

۶- مراجع

- Nield, D.A. and Bejan, A. "Convection in Porous Media", Third Ed., 2006.
- Ingham, D.B., Bejan, A., Mamut, E., and Pop, I. "Emerging Technologies Techniques in Porous Media, Kluwer Academic, Dordrecht", 2004.
- Ingham, D.B. and Pop, I., "Transport Phenomena in Porous Media", Pergamon, Oxford, Vol's. 1-2, ,2005.
- 4. Vafai, K.A. "Hand Book of Porous Media", New York, 2000.
- Anderson, R. and Lauriat, G. "The Horizontal Natural Convection Boundary Layer Regime in a Closed Cavity", In Proc.8<sup>th</sup>, Int. Heat Transfer Conf.Vol. 98, pp. 1453-1458, San Francisco USA, 1986.
- Kimura, S. and Bejan, A. "Natural Convection in a Defferentially Heated Corner Region", Phys. Fluids Vol. 28, No. 10, pp. 2980-2989, 1985.
- Pop, I. and Saeid, N.H. "Transient Free Convection in a Square Cavity Filled with a Porous Mediom", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 47, No's. 8-9, pp. 1917-1924, 2004.
- Chao, P. and Ozoe, H. "Laminar Natural Convection in an Inclined Rectangular Box with Lower Surface Half Heaten and Half Insulated", AZME J. Heat and Masstransfer, Vol. 105, pp. 425-432, 1983.
- Granzarolli, M.M. and Milanez, L.F. "Natural Convectionin Rectangular Enclosures Heated from Below and Symmetrically Cooled from the Sides", Int J. Heat Mass Transfer, Vol. 38, No. 6, pp. 1063-1073, 1995.
- Saeid, N.H. "Conjugate Natural Convection Inavertical Porous Layer Sandwiched by Finite Thickness Walls", Int. Heat Transfer Conf., Vol. 34, No. 2, pp. 200-216, 2007.
- Chamkha, A.J. and Khalil Khanafer, I.C. "Natural Convection From an Inclinedplate Embedded in a Variable Porosity Porus Medium due to Solar Radiation", Int. J. Therm Sci., Vol. 41, No. 1, pp. 73-81, 2002.
- Pop, I. and Saeid, N.H. "Mixed Convection from two Thermal Sourses in a Vertical Porous Layer", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 48, No's. 8-9, pp. 4150-4160, 2005.
- Grosan, A.T., Revnic, B.C., Pop, I., and Ingham, D.B. "Magnetic Field and Internal Heat Generation Effects on the Free Convection in a Rectangular Cavity Filled with a Porous Medium", Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No's. 5-6, pp. 1525-1533, 2009.



#### ۵- نتیجهگیری

انتقال حرارت غيردائم جابهجايي آزاد دريك محفظه مربعي متخلخل اشباءشده با نانوسیال آب- مس در حضور میدان مغناطیسی، بهصورت عددی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. دیوارههای افقی این محفظه عایق و دمای اولیه آن $\mathbf{T}_i$ بوده است. دمای دیوارههای عمودی چپ و راست در ابتدا برابر با  $T_c$  بوده که וست. در شروع روند حل دماه دیوار عمودی سمت راست  $T_{\rm c}=T_{\rm i}$ به  $T_{\rm h} > T_{\rm c}$  تغییر یافته است. در معادلات بی بعدشده، سه یارامتر مؤثر وجود دارد که عبارتند از: Ha Ra و $\varphi$ . یارامتر Ra عدد رایلی بوده و تابعی از اختلاف دما در مرزهای گرم و سرد میباشد. Ha پارامتری وابسته به میدان مغناطیسی است و  $\phi$  نشان دهنده نسبت حجمے، نانوذرات به حجم کل نانوسیال میباشد. معادلات بیبعد حاکم براساس مدل دارسی بهدست آمدهاند و برای حل این معادلات از روش حجم کنترل استفاده شده است. اثر تغییر یارامترهایHa ، Ra و arphi بر میدان جریان و دما، نرخ انتقال حرارت و مدت زمان لازم arphiجهت حصول حالت دائم در شرایط مختلف بررسی شده است. نتایج نشاندهنده تاثیرگذاری پارامترهای اشارهشده بر کاهش یا افزایش نرخ انتقال حرارت، مدت زمان رسیدن به حالت پایا و تغییر مکانیزم غالب انتقال حرات در مسئله می باشد. نتایج نمایانگر کاهش مدت زمان دستیابی به حالت پایا با افزایش Ra است. از سوی دیگر در مقادیر بزرگ ۲۵، ۱۰۰۰، مستقل از مقدار  $\varphi$  با افزایش Ha از مقدار صفر تا یک زمان رسیدن به حالت دائم اندکی کاهش خواهد داشت و بهازای مقادیر بزرگتر از یک عدد Ha، افزایش مدت زمان حالت پایا با افزایش این پارامتر رابطه مستقیم دارد. در مقادیر کوچک Ra، ۱۰۰، فارق از مقدار  $\phi$  با افزایش Ha دستابی به حالت دائم طولانی تر Convection", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 30, pp. 679-690, 2009.

- Khanafer, K., Vafai, K., and Lightstone, M. "Buoyancy-driven Heat Transfer Enhancement in a Two-dimensional Enclosure, Utilizing Nanofluids", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 46, pp. 3639-3653, 2003.
- Brinkman, H.C. "The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions", J. Chem. Phys. Vol. 20, No. 4, p. 571, 1952.
- Sheikholeslami, M., Hatami, M., and Ganji, D.D. "Analytical Investigation of MHD Nanofluid Flow in a Semi-Porous Channel", Powder Technology, Vol. 246, pp. 327–336, 2013.
- 29. Patankar, S.V. "Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer", Innovative Research, USA, 1996.
- Hoffmann, K.A. and Chiang, S.T. "Computational Fluid Dynamics for Engineers", 1993.

- Mealey, L.R. and Merkin, J.H. "Steady Finite Rayleigh Number Convective Flows in a Porous Medium with Internal" Heat Generation, Int. J. Thermal Sci., Vol. 48, No. 6, pp. 1068-1080, 2009.
- 15. Taeibi-Rahni. M, Khayat. M., and Aliabbasi. R. "Numerical Simulation of Forced Convection Flow through a Flattened PipeUsing Porous Material in the Central and Boundary Arrangement", Aerospase Mechanics Journal, Thermal Sci., Vol. 9, No. 1, pp. 77-85, 2013, (In Persian)
- 16. Kayhani, M.M. and Mohebi. R. "Numerical Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer on the Porous Media Between Two Parallel Plates Using the Lattice Boltzmann Method", Aerospase Mechanic Journal, Thermal Sci., Vol. 9, No. 1, pp. 63-76, 2013 (In Persian).
- Vynnycky, M. and Kimura, Sh. "Transient Conjugate Free Convection Due to a Vertical Plate in a Porous Medium", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 38, No. 2, pp. 219-231, 1995.
- Islam, M.R, and Nandakumar, K. "Transient Convection in Saturated Porous Layers with Internal Heat Generation", Int. J. Heat Mass Transfer. Vol. 33, No. 1, pp. 151-161, 1990
- 19. Chamkha, A.J. and Muneer, A. "Conjugate Heat Transfer in a Porous Cavity Filled with Nanofluids and Heated by a Triangular Thick Wall", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 67, pp. 135-151, 2013.
- Sun, Q. and Pop, I. "Free Convection in a Triangle Cavity Filled with a Porous Medium Saturated with Nanofluids with Flush Mounted Heater on the Wall", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 50, pp. 2141-2153, 2011.
- Tiwari, R.K. and Das, M.K. "Heat Transfer Augmentation in a Two-Sided Lid-Driven Differentially Heated Square Cavity Utilizing Nanofluids", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 50, pp. 2002-2018, 2011.
- 22. Revnic, C., Grosan, T., Pop, I., and Ingham, D.B. "Magnetic Field Effect on the Unsteady Free Convection Flow in a Square Cavity Filled with a Porous Medium with a Constant Heat Generation", International Journal of Heat and Mass Transfer., Vol. 54, pp. 1734–1742, 2011.
- Garandet, J.P., Albussoiere, T., and Moreau, R. "Buoyancy Driven Convection in a Rectangular Enclosure with a Transverse Magnetic Field", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol. 35, pp.741–748, 1992.
- Alchaar, S., Vasseur, P., and Bilgen, E. "Natural Convection Heat Transfer in a Rectangular Enclosure with a Transverse Magnetic Field", J. Heat Transfer., Vol. 117, pp. 668–673, 1995.
- 25. Abu-Nada, E. "Effects of Variable Viscosity and Thermal Conductivity of Al2O3 Ewater Nanofluid on Heat Transfer Enhancement in Natural