

Research Paper

Magnetic Field Effects on Heat Transfer Enhancement in an Enclosure in Microgravity Conditions

M. ghoharkhah^{1*} and B. Alizadeh²

1,2. Faculty of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

*goharkhah@sut.ac.ir

In this numerical study, the effect of the magnetic field on the convective heat transfer of a magnetic fluid in an enclosure is investigated in the microgravity condition. Two cases of a single magnetic field source under the enclosure and two sources on the top and below the enclosure are considered. The simulations are carried out for different magnetic field intensities and magnetic source distances from the enclosure. Results indicate that the heat transfer in the microgravity is much lower than that of natural conditions due to the lack of the flow vortex. Applying the magnetic field and the induced vortex due to the magnetic body force cause a significant improvement in the heat transfer. Results show that the heat transfer rate in the microgravity condition can be increased up to 6.5 times. Moreover, placing two magnetic field sources improves the main vortex and leads to a 19.7 times enhancement of the heat transfer rate compared to the case of a single source.

Keywords: Convective heat transfer, Square enclosure, Magnetic fluid, Microgravity, Magnetic field

1. Assistant Professor (Corresponding Author)
2. M.Sc.

مقاله علمی - پژوهشی

تأثیر میدان مغناطیسی بر افزایش انتقال حرارت در یک محفظه در شرایط میکرو جاذبه

محمد گوهرخواه^۱ و بهزاد علیزاده^۲

۱ و ۲ - دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

*goharkhah@sut.ac.ir

در این مطالعه عددی، تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد سیال مغناطیسی داخل یک محفظه، در شرایط میکرو جاذبه، مورد بررسی قرار گرفته است. دو حالت، قرارگیری یک منبع میدان مغناطیسی زیر محفظه و دو منبع میدان در بالا و پایین محفظه بطور مجزا در نظر گرفته شده و شبیه‌سازی‌ها برای شدت میدانها و فواصل مختلف منبع های میدان از محفظه انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد به علت عدم تشکیل گردابه جریان در شرایط میکرو جاذبه نرخ انتقال حرارت بسیار کمتر از حالت طبیعی است. با اعمال میدان مغناطیسی، گردابه القایی توسط نیروی حجمی، انتقال حرارت جابجایی در شرایط میکرو جاذبه را افزایش می‌دهد. محاسبات نشان می‌دهد در حالت تک منبع، نرخ انتقال حرارت در حالت میکرو جاذبه را تا ۶.۵ برابر می‌توان افزایش داد. همچنین قرار دادن دو منبع میدان مغناطیسی سبب افزایش قدرت گردابه داخل محفظه شده و در نتیجه موجب افزایش ۱۹/۷ برابری انتقال حرارت نسبت به حالت تک منبع می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت جابجایی، محفظه مربعی، سیال مغناطیسی، میکرو جاذبه، میدان مغناطیسی

علائم و اختصارات

V(m/s)	سرعت سیال		
X, Y(m)	مکان قرارگیری منبع میدان مغناطیسی		
x, y(m)	مختصات کارتیزین	(T)	چگالی شار مغناطیسی
$\beta(1/K)$	ضریب انبساط حجمی	$C_p(J/kgK)$	ظرفیت گرمایی ویژه
ϵ_t	عملکرد حرارتی	d(m)	فاصله عمودی منبع میدان از محفظه
$\mu(kg/m s)$	لزجت دینامیکی	$\vec{F}_R(N)$	نیروی مغناطیسی
$\mu_0(\frac{N}{A^2})$	نفوذپذیری مغناطیسی خلأ	H(A/m)	شدت میدان مغناطیسی
$\rho(kg/m^3)$	چگالی	$k(\frac{W}{mk})$	ضریب هدایت حرارتی
χ_m	حساسیت مغناطیسی	m(Am)	قدرت میدان مغناطیسی
0	حالت مرجع	M(A/m)	مغناطیسی شونده
c	مربوط به دیواره سرد	Pr	عدد پرانتل
h	مربوط به دیواره گرم	P(Pa)	فشار
mf	مربوط به میدان مغناطیسی	q"	شار حرارتی
		Ra	عدد رایلی
		Sq	شار حرارتی بی بعد
		T(K)	دما
		V_m	پتانسیل مغناطیسی اسکالر

مقدمه

یکی از مهمترین مسائل در طراحی تجهیزات فضایی، خنک کاری قطعات است. در فضا و در شرایط جاذبه پایین، انتقال حرارت بسیار متفاوت از حالت عادی و بر روی زمین است. زیرا، به علت نبود جاذبه و در نتیجه

۱. استادیار، (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد

نیروی شناوری، چرخش طبیعی سیال اطراف بخش تولید کننده حرارت امکان پذیر نبوده و انتقال حرارت جابجایی طبیعی مختل خواهد شد. یکی از روش هایی که برای انتقال حرارت در شرایط میکرو جاذبه پیشنهاد شده، استفاده از فروسیال تحت اثر میدان مغناطیسی است [۱].

فروسیال عبارت است از نانو ذرات مغناطیسی مانند آهن، نیکل و کبالت یا ترکیبات آنها که در یک سیال پایه مانند آب یا الکل پراکنده شده است [۲]. تفاوتی که فروسیال با سایر نانو سیال ها دارد این است که میدان مغناطیسی خارجی، سبب القای نیروی حجمی در سیال بنام نیروی کلون می شود. بنابراین، با طراحی مناسب توزیع میدان مغناطیسی، می توان با استفاده از این نیروی مغناطیسی توده سیال را به حرکت در آورده و انتقال حرارت را بهبود بخشید.

تاکنون تحقیقات زیاد در زمینه بهبود انتقال حرارت جابجایی آزاد با استفاده از فروسیال تحت میدان مغناطیسی انجام شده است. گانگولی و همکاران [۳] به بررسی تاثیر میدان مغناطیسی ثابت بر انتقال حرارت جابجایی فروسیال در داخل یک محفظه مربعی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که سیال سرد از پایین دیواره سرد به علت حساسیت مغناطیسی بالاتر، به سمت ناحیه با شدت میدان بیشتر حرکت می کند در حالی که سیال گرم به علت حساسیت پایین تر به سمت بالای دیواره گرم و به دور از ناحیه با شدت میدان قوی حرکت می کند. در نتیجه، سرعت حرکت سیال در نزدیکی دیواره های سرد و گرم افزایش یافته و این امر نرخ انتقال حرارت جابجایی را بهبود می بخشد. ساوادا و همکاران [۴] انتقال حرارت در یک ناحیه حلقوی را تحت اثر میدان مغناطیسی یکنواخت ایجاد شده با آهن ربای دائمی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که زمانی که میدان مغناطیسی با شدت ضعیف در خلاف جهت نیروی گرانش اعمال شود، می تواند نقش مهمی را در بهبود انتقال حرارت سیال مغناطیسی ایفا کند ولی زمانی که در جهت گرانش باشد تغییرات جزئی در توزیع دما مشاهده می گردد. همچنین نشان دادند که انتقال حرارت یک سیال مغناطیسی با اعمال شدت میدان مغناطیسی مناسب می تواند کنترل شود. کراکو و همکاران [۵] تاثیر میدان مغناطیسی بر جابجایی ترمومغناطیسی را در یک حفره مکعبی بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که زاویه بین جهت گرادیان دما و میدان مغناطیسی بر ساختار انتقال حرارت و در نتیجه شدت شار حرارتی تاثیر می گذارد. آشوری و شفیع [۶] انتقال حرارت جابجایی نانو سیال مغناطیسی را در یک محفظه مربعی در حضور میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که در غیاب میدان مغناطیسی انتقال حرارت بیشتر از نوع هدایتی می باشد و با اعمال میدان مغناطیسی انتقال حرارت جابجایی طبیعی بیشتر به چشم خورده و با افزایش شدت میدان مغناطیسی، افزایش می یابد. همچنین رابطه ای برای عدد ناسلت به صورت تابعی از برخی پارامترها مانند اختلاف دمای دیواره و عدد پرانتل ارائه نمودند. بلامز و همکاران [۷] انتقال حرارت جابجایی مغناطیسی را در یک ناحیه استوانه ای تحت میدان مغناطیسی یکنواخت و غیر یکنواخت مورد بررسی قرار

دادند. بررسی آنها نشان داد زمانی که میدان مغناطیسی غیر یکنواخت به سیلندر اعمال شود، شدت انتقال حرارت سیال در داخل محفظه افزایش پیدا می کند ولی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت به رغم ایجاد گرادیان میدان قوی، افزایش شدت انتقال حرارت چشم گیر نمی باشد. بانرجه و همکاران [۸] به بررسی تاثیر میدان مغناطیسی خارجی با دو منبع میدان از نوع دوقطبی خطی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد یک حفره مربعی پرداختند. نتایج آنها حاکی از آن بود که افزایش کسر حجمی نانو ذرات، قرارگیری منبع میدان در موقعیت مناسب نسبت به حفره و افزایش شدت میدان مغناطیسی سبب بهبود انتقال حرارت جابجایی می شود. ون و همکاران [۹] انتقال حرارت سیال مغناطیسی را در یک محفظه مستطیلی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که اعمال میدان مغناطیسی سبب تشکیل و رشد یک جفت گردابه متقاطع می شود که در طی آن بهبود عدد ناسلت و نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد حاصل می گردد. زابلوچیس و همکاران [۱۰] انتقال حرارت سیال را در یک ناحیه استوانه ای را با دمای ثابت در انتهای بالا و پایین استوانه و شرایط مرزی آدیاباتیک در دیواره های جانبی مورد بررسی قرار دادند. جابجایی نانو سیال در اثر گرانش و میدان مغناطیسی ایجاد شده از یک منبع میدان که در داخل محفظه قرار گرفته است انجام می پذیرد. نتایج آنها حاکی از آن بود که نرخ انتقال حرارت می تواند توسط میدان مغناطیسی به شدت افزایش یابد. تاجاوا و همکاران [۱۱] به بررسی تاثیر جهت میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد پرداختند. نتایج آنها حاکی از آن بود که با قرارگیری میدان مغناطیسی در هر یک از جهت های مختلف نتایج تغییر پیدا می کند و با در نظر گرفتن نیروی گرانشی و با افزایش قدرت میدان مغناطیسی، مغناطیسی که در نزدیکی منطقه مرکزی قرار دارد نوعی گردش در سیال ایجاد کرده و زمانی که دیواره گرم هندسه تحت میدان مغناطیسی قرار میگیرد، بیشترین انتقال حرارت اتفاق می افتد.

علاوه بر مطالعات فوق انتقال حرارت جابجایی فروسیال در یک محفظه، تحت شرایط میکرو جاذبه نیز مورد بررسی محققین قرار گرفته است. هورستن و همکاران [۱۲] انتقال حرارت فروسیال را در یک ناحیه حلقوی بین دو استوانه که از داخل گرم و از بیرون سرد می شد، بصورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آنها در مدت زمان شش دقیقه ای ایجاد شرایط میکرو جاذبه، انتقال حرارت جابجایی مغناطیسی را مشاهده نمودند ولی پروفیل جریانی متفاوت با پیش بینی خود بدست آوردند. اودنباخ با آزمایشی تجربی پایداری لایه ای از فروسیال را در شرایط میکرو جاذبه بررسی نموده و توزیع دمای داخلی فروسیال را بدست آورد [۱۳]. زیب پایداری و انتقال حرارت جابجایی فروسیال در ناحیه ای استوانه ای را در شرایط میکرو جاذبه بصورت تئوری و با روش های عددی مورد مطالعه قرار داد [۱۴]. نتایج او نشان داد عامل انتقال حرارت جابجایی گرادیان شعاعی دما و میدان مغناطیسی است. جاسمین [۱۵] مسئله پایداری

در دو حالت ۱ (الف) و (ب) استفاده شده است. در حالت (الف) منبع میدان زیر دیواره پایینی قرار داشته و در حالت (ب) از دو منبع میدان بالا و پایین حفره استفاده شده است. تأثیر شدت میدان مغناطیسی و همچنین فاصله منبع از حفره نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.

معادلات حاکم

معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی

معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در حالت تک فاز عبارتند از [۳، ۱۶ و ۱۷]

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_t \nabla V) + \rho g + \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho C_P T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V C_P T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

محاسبه نیروی حجمی مغناطیسی

آخرین پارامتر در معادلات مومنتوم، نیروی حجمی کلونین^۴ نامیده می‌شود که تابعی از بردارهای مغناطیس شوندگی^۵، M و چگالی شار مغناطیسی^۶، B بصورت زیر است [۱۸، ۱۹]:

$$F_K = (M \cdot \nabla) B \quad (4)$$

چگالی شار مغناطیسی، با استفاده از قانون گاوس^۷ به صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{M} + \vec{H}) \quad (5)$$

همچنین، قانون آمپر^۸ برای میدان مغناطیسی \vec{H} با چگالی جریان صفر عبارت است از:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

با توجه به فرض نارسانایی فروسیال، جریان الکترومغناطیسی القایی ناشی از جریان نانو سیال مغناطیسی قابل صرف نظر کردن است، لذا می‌توان نوشت:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0 \quad (7)$$

همچنین رابطه بین میدان مغناطیسی و بردار مغناطیس شوندگی عبارت است از [۳]:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (8)$$

که χ_m حساسیت مغناطیسی به صورت تابعی از دما عبارت است از:

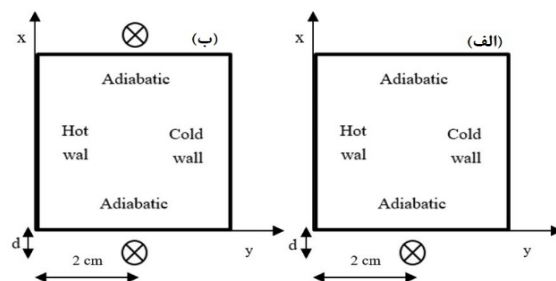
$$\chi_m(T) = \frac{\chi_0}{1 + \beta(T - T_0)} \quad (9)$$

فروسیال در شرایط میکروجاذه را با در نظر گرفتن لزجت گردایی و چرخشی بصورت تحلیلی مطالعه نمود. برای این منظور با روش شبه طیفی چبیشف چند نمونه شرط مرزی را مورد بررسی قرار داد. نتایج او نشان می‌دهد فروسیال در شرایط میکروجاذه پایدارتر بوده و گرادیان دمای بالایی برای شروع جابجایی مورد نیاز است.

مروری بر مطالعات گذشته نشان می‌دهد که کارهای عددی بسیار کمی در زمینه تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت فروسیال در محفظه در شرایط جاذه پایین انجام شده و درک بهتر مفهوم انتقال حرارت حاکم بر این مسائل نیازمند مطالعات بیشتر است. در کار حاضر تأثیر میدان مغناطیسی ناشی از یک دوقطبی مغناطیسی بر انتقال حرارت فروسیال اکسید آهن در یک محفظه مربعی در شرایط میکروجاذه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هندسه و منبع میدان در نظر گرفته شده، مشابه مرجع [۳] است. با این حال، علاوه بر بررسی شرایط میکروجاذه، تأثیر استفاده از یک منبع میدان زیر محفظه و یا دو منبع میدان در بالا و پایین محفظه مورد بررسی قرار گرفته و میزان افزایش انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان محاسبه می‌گردد. همچنین تأثیر شدت میدان مغناطیسی و فاصله منبع از محفظه نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. علاوه بر این، مکانیزم ایجاد نیروی مغناطیسی و نحوه تغییر توزیع دما و میدان جریان توضیح داده می‌شود.

هندسه، شرح مسئله و شرایط مرزی

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، هندسه مورد مطالعه حفره یا محفظه‌ای مربعی شکل به طول ۴ سانتی متر بوده که دیواره بالا و پایینی آن عایق و دیواره راست و چپ به صورت هم‌دما به ترتیب سرد و گرم می‌باشند. دمای دیواره سرد ۳۰۰ و دیواره گرم ۳۵۰ کلونین در نظر گرفته شده است. سیال داخل محفظه، نانو سیال مغناطیسی (فروسیال) $Fe_3O_4/Water$ می‌باشد.



شکل ۱- هندسه مورد مطالعه، شرایط مرزی و حالت های مورد بررسی

جهت بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد در شرایط میکروجاذه، از منبع میدان مغناطیسی دوقطبی خطی^۳

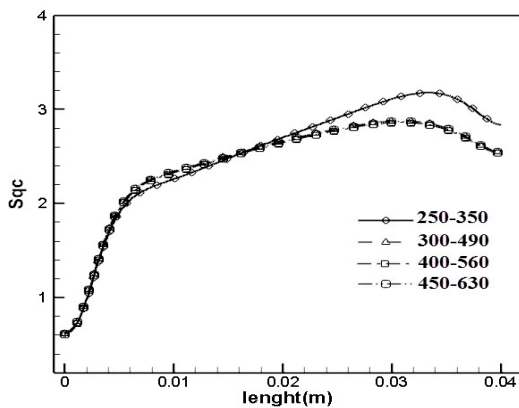
4. Kelvin body force
5. Magnetization
6. Magnetic flux density
7. Gauss
8. Amper

3. Magnetic Line Dipole

(الف) یک منبع میدان و (ب) دو منبع میدان، ارائه شده است. به منظور بررسی تاثیر شدت میدان مغناطیسی و فاصله منبع میدان بر انتقال حرارت، شبیه سازی ها با چهار شدت میدان $m=3, 10, 15, 20$ Am و در سه فاصله $d=0.6, 1, 2.5$ cm انجام شده است.

بررسی استقلال نتایج از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از اندازه شبکه مورد استفاده، شبیه سازی عددی حالت (الف) با استفاده از تعداد مختلف شبکه حل انجام شده است. در شکل ۲ تغییرات موضعی شار حرارتی بی بعد (معادله ۱۲) بر روی دیواره سرد، با استفاده از شبکه بندی های مختلف، و برای شدت میدان $m = 30Am$ نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات موضعی شار حرارتی بی بعد بر روی دیواره سرد با استفاده از شبکه بندی های مختلف

پارامتر Sq در شکل ۲، شار حرارتی موضعی بی بعد می باشد و از رابطه ۱۲ محاسبه شده است [۳].

$$Sq = q_w'' / (\mu C_p / Pr) \cdot (T_h - T_c / h) \quad (12)$$

که در آن q_w'' شار حرارتی دیواره های سرد و گرم، μ ویسکوزیته نانوسیال، C_p و Pr به ترتیب ظرفیت گرمایی و عدد پرانتل نانوسیال، $T_h - T_c$ اختلاف دمای دو دیواره سرد و گرم و h اندازه ضلع حفره مربعی می باشد. شکل ۲ نشان می دهد غیر از شبکه بندی 250×350 ، سایر شبکه بندی ها منجر به نتایج تقریباً یکسانی می شوند. لذا، شبکه بندی 300×490 برای انجام شبیه سازی های اصلی انتخاب شده است.

اعتبارسنجی

جهت اطمینان از صحت و دقت نتایج عددی، مقایسه ای بین نتایج کار حاضر و مطالعه ارائه شده در مرجع [۳] بر روی حالت (الف)، انجام شده است. در شکل ۳ تغییرات شار حرارتی موضعی بی بعد بر روی دیواره گرم و سرد برای حالت (الف) با شدت میدان $m = 30Am$ و عدد رایلی $Ra = 2.5 \times 10^7$ نشان داده شده است.

که در رابطه فوق β ، ضریب انبساط حجمی و X_0 و T_0 به ترتیب، مقادیر مرجع ضریب حساسیت مغناطیسی و دما می باشند. میدان مغناطیسی را می توان بصورت گرادینان پتانسیل مغناطیسی اسکالر بیان کرد. یعنی:

$$\vec{H} = \nabla V_m \quad (10)$$

که برای میدان مغناطیسی ناشی از یک دو قطبی خطی بصورت زیر بدست می آید [۳]:

$$V_m(x, y) = \frac{m}{2\pi} \frac{x-x_0}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (11)$$

روش حل عددی، شرایط مرزی و خواص نانوسیال مغناطیسی

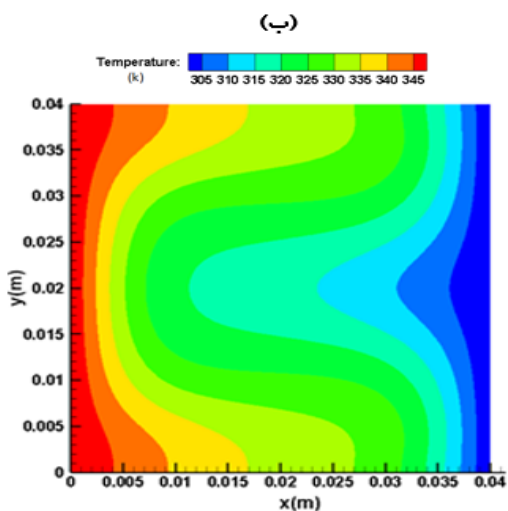
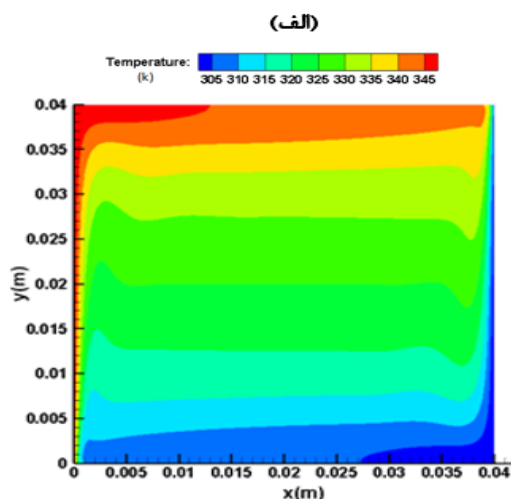
در مطالعه حاضر، فروسیال بصورت تک فاز در نظر گرفته شده و خواص آن تابعی از خواص سیال پایه و نانوذرات محاسبه شده است. مقادیر چگالی، ظرفیت گرمایی، لزجت و ضریب هدایت حرارتی به ترتیب برابر با $\rho = 1180 \text{ kg/m}^3$ ، $C_p = 4000 \text{ J/kg}$ ، $\mu = 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$ و $k = 0.7273 \text{ W/mk}$ در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مسئله عبارتند از: شرط عدم لغزش در تمامی دیواره ها، شرط دما ثابت برای دیواره های سرد و گرم و شرط عایق برای دیواره پایینی و بالایی. معادلات پایا و دوبعدی و شرایط مرزی حاکم بر مسئله، با روش حجم محدود حل شده اند. از شبکه های سازمان یافته مستطیلی برای کل دامنه حل استفاده شده و شبکه بندی به گونه ای در نظر گرفته شده که در نزدیکی دیواره ها ریزتر از نواحی داخلی باشد. در این کار عددی از روش حجم محدود در نرم افزار فلونت^۹ برای گسسته سازی معادلات استفاده شده است. معادلات انرژی و مومنتوم از طریق روش آپویند مرتبه دوم^{۱۰} حل شده است. جریان آرام در نظر گرفته شده و برای کوپل کردن فشار و سرعت از الگوریتم سیمپل^{۱۱} استفاده شده است. شایان ذکر است، کد نویسی UDF^{۱۲} جهت اعمال معادلات میدان مغناطیسی و نیروی حجمی به معادله ممنتوم، بکار گرفته شده است. نرخ همگرایی معادلات برای معادله پیوستگی 10^{-5} ، معادلات مومنتوم 10^{-5} و برای معادله انرژی 10^{-8} در نظر گرفته شده است.

نتایج

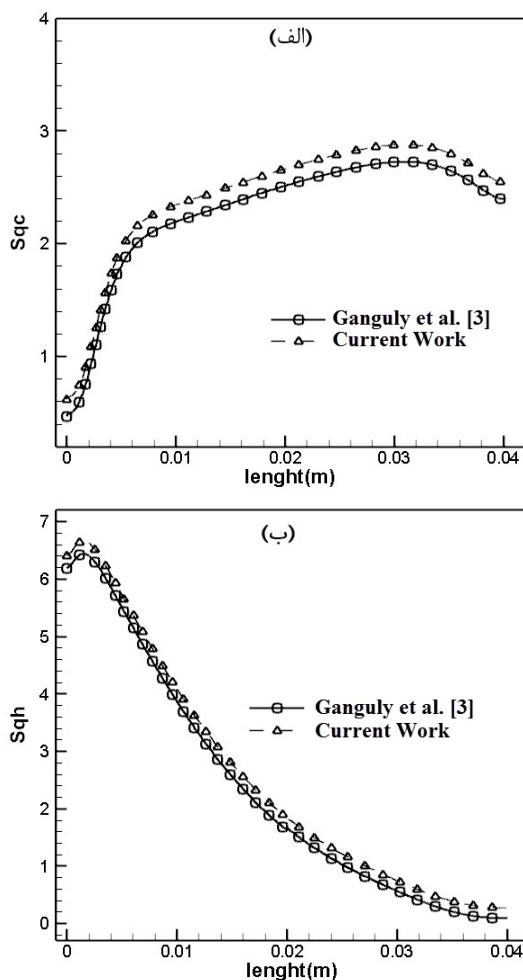
پس از بررسی استقلال نتایج از شبکه و اعتبارسنجی، مکانیزم انتقال حرارت در حالت میکرو جاذبه و تفاوت آن با انتقال حرارت عادی توضیح داده شده و سپس نتایج در دو بخش برای حالت های

9. Fluent
10. Second-order upwind
11. Simple
12. User Defined Function

برای صفحه سرد برعکس است. یعنی از بالا به پایین ضخامت لایه مرزی به تدریج در حال افزایش بوده و در پایین صفحه به حداکثر خود می‌رسد. خطوط دما ثابت عمود بر سطوح عایق بوده و در نزدیکی دیواره‌های هم‌دما، موازی آنها می‌باشد. همچنین وجود یک گردابه داخل محفظه شکل ۴(الف) قابل تشخیص است. به عبارت دیگر سیال در نزدیکی دیواره با جذب حرارت دچار افزایش دما شده، چگالی آن کاهش پیدا کرده و بطرف بالا حرکت می‌کند. پس از رسیدن به مجاورت دیواره سرد، دمای سیال کاهش پیدا کرده، چگالی آن افزایش یافته و در نتیجه تحت اثر جاذبه، بطرف پایین حرکت می‌کند. برخلاف شکل ۴(الف)، گردابه جریان سیال در شکل (ب) موجود نیست. در غیاب جاذبه، مکانیزم انتقال حرارت داخل محفظه از نوع هدایت حرارتی بوده و همین باعث ایجاد توزیع دمایی متقارن نسبت به خط افقی گذرنده از مرکز محفظه شده است. به دلیل عدم جابجایی طبیعی در شکل (ب)، انتظار می‌رود میزان انتقال حرارت آن به مراتب کمتر از حالت (الف) باشد.



شکل ۴- توزیع دما داخل محفظه مربعی در غیاب میدان مغناطیسی (الف) در حالت طبیعی و (ب) در حالت میکرو جاذبه



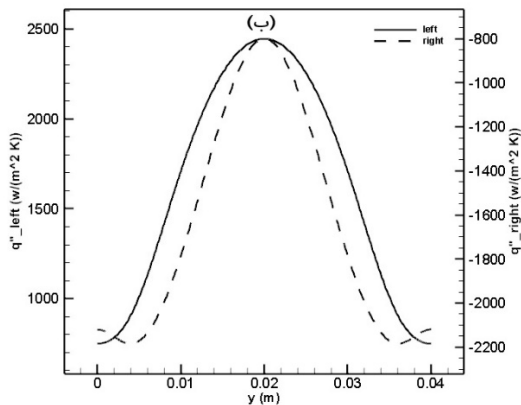
شکل ۳- نتایج کار حاضر و مطالعه ارائه شده مرجع [۳] تغییرات موضعی شار حرارتی بی‌بعد بر روی (الف) دیواره سرد و (ب) دیواره گرم

همانگونه که مشاهده می‌شود، نتایج عددی کار حاضر تطابق خوبی با نتایج مرجع [۳] داشته و ماکزیمم اختلاف در بیشترین حالت برابر با ۵ درصد می‌باشد.

مقایسه مکانیزم انتقال حرارت در حالت طبیعی و میکرو جاذبه

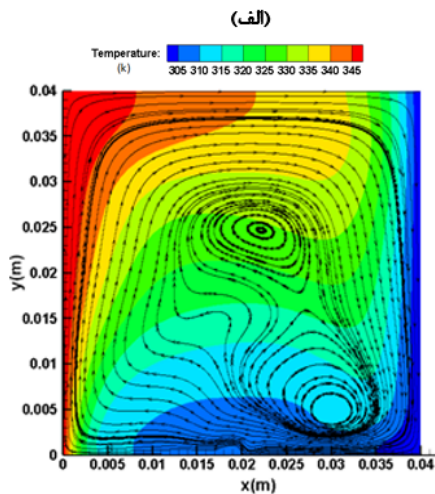
برای بررسی نقش جاذبه در انتقال حرارت و تغییرات دمایی، توزیع دمایی داخل محفظه مورد مطالعه در غیاب میدان مغناطیسی، در حالت طبیعی و در غیاب جاذبه، به ترتیب در شکل ۴ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

شکل ۴ (الف) و (ب) تفاوت مکانیزم حاکم بر انتقال حرارت در حالت با و بدون جاذبه را نشان می‌دهد. در شکل (الف) لایه مرزی حرارتی جابجایی آزاد بر روی صفحه گرم از پایین صفحه شروع به رشد کرده و ضخامت لایه مرزی به تدریج افزایش می‌یابد. روند تغییر ضخامت لایه مرزی حرارتی همانگونه که انتظار می‌رفت



ادامه شکل ۵- تغییرات شار حرارتی موضعی بر روی دیواره های سرد و گرم (الف) در حالت طبیعی و (ب) در غیاب جاذبه

در شکل ۶، توزیع دمای سیال داخل محفظه به همراه خطوط جریان به ازای مقادیر مختلف شدت میدان رسم شده است. با مقایسه توزیع دمای شکل ۶ و شکل ۴، می توان دریافت توزیع دما در حالت میکرو جاذبه تحت اثر میدان مغناطیسی، به حالت جابجایی آزاد تحت نیروی شناوری ناشی از جاذبه (شکل ۴- الف) شباهت پیدا کرده است. بنابراین، نیروی حجمی مغناطیسی نقش مشابهی با نیروی جاذبه ایفا نموده است. بررسی خطوط جریان نیز این مسئله را تایید می کند. مشابه حالت جابجایی آزاد، یک گردابه اصلی و بزرگ وجود دارد که در جهت ساعتگرد سبب چرخش سیال در مجاورت دیواره های گرم و سرد می شود. از سوی دیگر، تعدادی گردابه محلی کوچک داخل محفظه وجود دارد که تعداد و محل آنها وابسته به شدت میدان مغناطیسی است. به عنوان مثال، با افزایش شدت میدان، از 3Am به 10Am گردابه دومی نزدیک دیواره عایق پایین ایجاد شده و با افزایش شدت میدان، دو گردابه به هم نزدیک می شوند.



شکل ۶- تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر توزیع دما و خطوط جریان داخل محفظه. (الف) $m=3Am$ ، (ب) $m=10Am$ ، (ج) $m=15Am$ ، و (د) $m=20Am$

به منظور بررسی کمی میزان انتقال حرارت در حالت طبیعی و در غیاب جاذبه، تغییرات شار حرارتی موضعی بر روی دیواره های سرد و گرم در حالت طبیعی و در غیاب جاذبه به ترتیب در شکل ۵ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

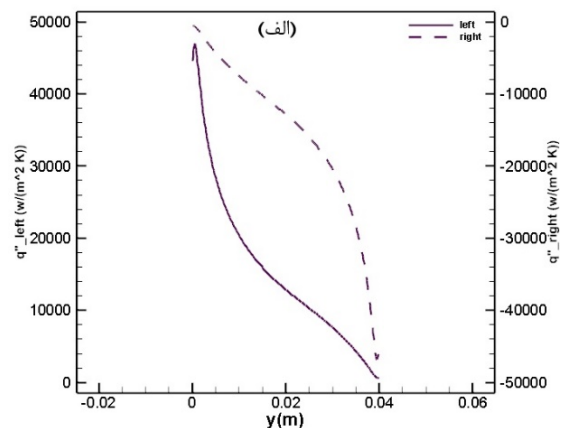
تغییرات شار حرارتی موضعی در شکل ۵ (الف) با توجه به تغییر ضخامت لایه مرزی مشاهده شده در شکل ۴ (الف) قابل توجیه است. با توجه به روند معکوس تغییر ضخامت لایه مرزی حرارتی برای دیواره های سرد و گرم، اندازه شار حرارتی موضعی با افزایش l ، برای دیواره سرد افزایش و برای دیواره گرم، کاهش یافته است. همچنین توزیع دمای کاملاً متقارن محفظه در حالت بدون جاذبه، تغییرات شار حرارتی متقارنی را نسبت به صفحه افقی گذرنده از مرکز محفظه ایجاد کرده است. علاوه بر این، بررسی ماکزیمم شار حرارتی بدست آمده برای شکل ۵ (الف) و (ب) حاکی از بالابودن قابل توجه انتقال حرارت طبیعی نسبت به انتقال حرارت در غیاب جاذبه دارد.

راه حلی که برای رفع این مشکل و افزایش انتقال حرارت در حالت میکرو جاذبه ارائه شده است، استفاده از میدان مغناطیسی خارجی است که در ادامه مورد بررسی قرار می گیرد.

تاثیر یک منبع میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت در حالت میکرو جاذبه

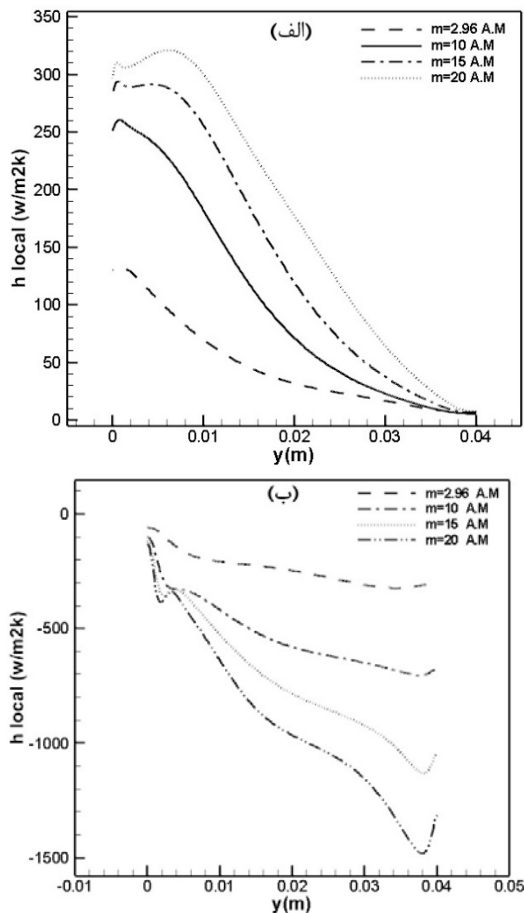
تاثیر شدت میدان بر میزان انتقال حرارت

همانگونه که در شکل ۴ مشاهده شد، توزیع دما داخل محفظه در حالت میکرو جاذبه، به علت عدم نیروی شناوری، کاملاً متفاوت از حالت با جاذبه می باشد. این مسئله با توجه به شکل ۵، باعث کاهش قابل توجه میزان انتقال حرارت در محفظه می گردد. نیروی حجمی مغناطیسی ناشی از دوقطبی مغناطیسی می تواند به عنوان جایگزینی برای نیروی شناوری، موجب جریان سیال داخل محفظه و در نتیجه افزایش انتقال حرارت جابجایی شود.



شکل ۷- تغییرات شار حرارتی موضعی بر روی دیواره های سرد و گرم (الف) در حالت طبیعی و (ب) در غیاب جاذبه

جهت بررسی دقیق‌تر مطالب فوق، تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی بر روی دیواره سرد و گرم به ازای مقادیر مختلف شدت میدان، در شکل ۷ نشان داده شده است.

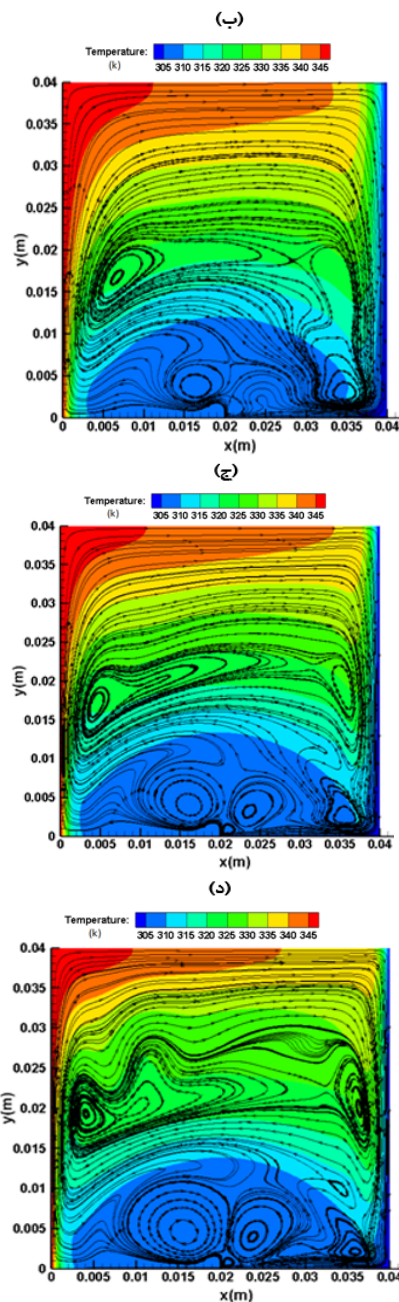


شکل ۷- تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی بر روی (الف) دیواره سرد و (ب) دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف شدت میدان

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌گردد مقدار ضریب انتقال حرارت بر روی دیواره گرم روند نزولی و برای دیواره سرد روند صعودی دارد که با توجه به ضخامت لایه مرزی مشاهده شده در شکل ۶ قابل توجیه است. همچنین، افزایش شدت میدان مغناطیسی، موجب افزایش ضریب جابجایی محلی می‌گردد.

به منظور بررسی کلی تاثیر شدت میدان بر میزان انتقال حرارت، تغییرات ضریب جابجایی متوسط با شدت میدان مغناطیسی برای دیواره‌های راست و چپ محاسبه و به ترتیب در شکل ۸ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

شکل ۸ روند افزایشی تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط با شدت میدان را نشان می‌دهد که علت آن افزایش سرعت جریان نزدیک دیواره‌ها و کاهش ضخامت لایه مرزی است. همچنین، نکته قابل توجه دیگر، تاثیر بیشتر شدت میدان بر انتقال حرارت از صفحه سرد نسبت به صفحه گرم است.



ادامه شکل ۶- تاثیر شدت میدان مغناطیسی بر توزیع دما و خطوط جریان داخل محفظه. (الف) $m=3$ Am، (ب) $m=10$ Am، (ج) $m=15$ Am و (د) $m=20$ Am

علت ایجاد این گردابه‌ها، وابستگی نیروی مغناطیسی به پارامتر حساسیت مغناطیسی متغیر با دما است [۳]. همچنین با توجه به شکل ۶ افزایش چگالی خطوط جریان نزدیک دیواره‌های سرد و گرم نیز مشاهده می‌گردد. این مسئله نشانگر افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش شدت میدان است. لازم به ذکر است، افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش شدت میدان، با توجه به ضخامت لایه مرزی حرارتی نیز قابل توجیه است. شکل ۶ نشان می‌دهد با افزایش شدت میدان، ضخامت لایه مرزی نزدیک دیواره سرد و گرم کاهش می‌یابد که این به معنی افزایش انتقال حرارت است.

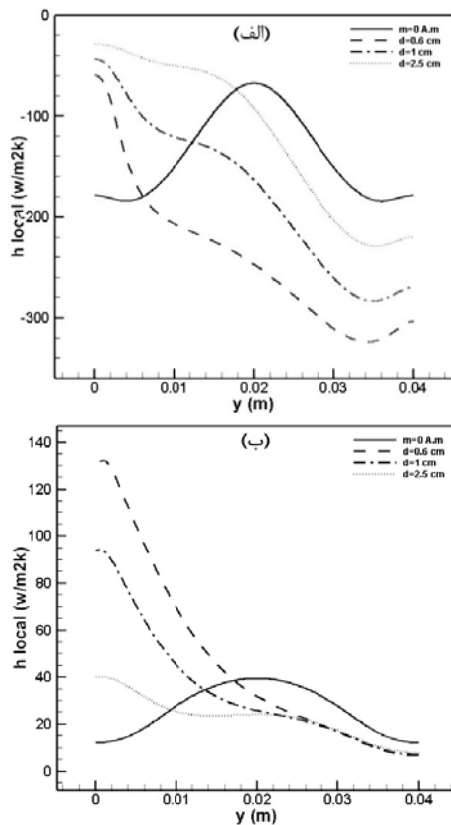
یابد. نکته مهم دیگری که با مقایسه شکل ۹ و ۴ (ب) می‌توان دریافت، این است که با افزایش فاصله توزیع دمای سیال داخل محفظه به حالت بدون میدان نزدیک می‌شود که این نشان از کاهش تاثیر میدان مغناطیسی با افزایش فاصله می‌دهد.

منحنی تغییرات ضریب جابجایی محلی بر روی دیواره‌های سرد و گرم برای فواصل مختلف منبع میدان از صفحه پایینی به ترتیب در شکل ۱۰ (الف) و (ب) نشان داده شده است.

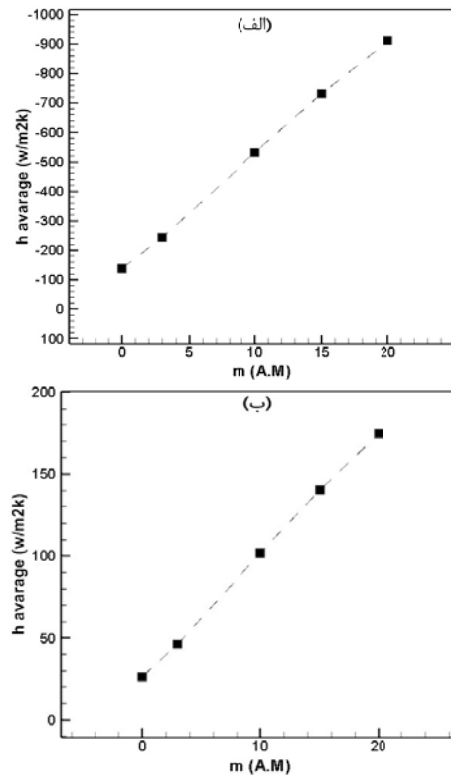
با توجه به شکل ۱۰، ضریب جابجایی محلی برای هر دو صفحه سرد و گرم با افزایش فاصله منبع از صفحه کاهش می‌یابد. همچنین با مقایسه منحنی مربوط به فاصله $d=2.5\text{cm}$ و حالت بدون میدان، می‌توان دریافت، در فواصل دور از صفحه، ضریب جابجایی به منحنی مربوط به حالت بدون میدان میل می‌کند.

تغییرات ضریب جابجایی متوسط با فاصله از صفحه پایینی برای دو صفحه سرد و گرم محاسبه و به ترتیب در شکل ۱۱ (الف) و (ب) رسم شده است.

با اینکه با کاهش فاصله منبع میدان مغناطیسی از صفحه پایینی می‌توان به مقادیر بالاتر انتقال حرارت دست یافت، این کاهش فاصله در عمل به علت وجود موانع فیزیکی مانند عایق بندی، تنها تا حد مشخصی امکان پذیر است و باعث محدود شدن افزایش انتقال حرارت می‌شود.



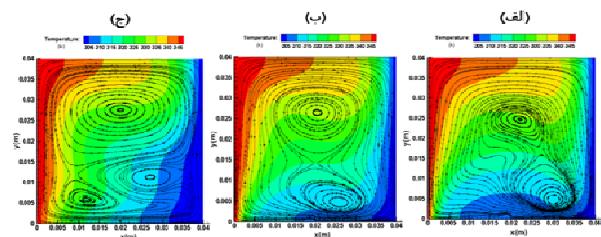
شکل ۱۰- منحنی تغییرات ضریب جابجایی محلی بر روی دیواره‌های (الف) سرد و (ب) گرم برای فواصل مختلف منبع میدان از صفحه پایینی



شکل ۸- تغییرات ضریب انتقال حرارت متوسط روی (الف) دیواره سرد و (ب) دیواره گرم با شدت میدان مختلف

تاثیر فاصله منبع میدان مغناطیسی از دیواره پایین بر میزان انتقال حرارت

به منظور بررسی تاثیر فاصله منبع میدان مغناطیسی از سطح پایینی محفظه، توزیع دمای سیال در سه فاصله منبع 0.6 ، 1 و 2.5 سانتی متر محاسبه و نتایج در شکل ۹ نشان داده شده است.

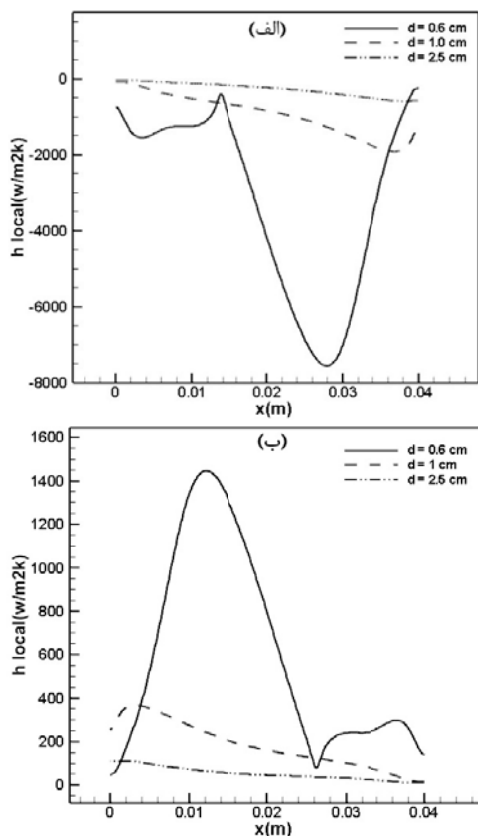


شکل ۹- توزیع دمای سیال در سه فاصله منبع (الف) 0.6 ، (ب) 1 و (ج) 2.5 سانتی متری از سطح پایینی

شکل ۹ نشان می‌دهد با افزایش فاصله منبع از محفظه، ضخامت لایه مرزی حرارتی افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، گردابه قوی روی صفحه پایینی به تدریج تضعیف شده و در نهایت تبدیل به دو گردابه ضعیفتر می‌گردد. همچنین چکالی خطوط جریان نیز نزدیک دو صفحه گرم و سرد کاهش می‌یابد که به معنی کاهش سرعت سیال است. لذا می‌توان انتظار داشت با افزایش فاصله منبع، تاثیر میدان مغناطیسی کم و در نتیجه میزان انتقال حرارت کاهش

ایجاد شده است. خطوط جریان در این حالت نیز تا حدودی متفاوت از دو فاصله دیگر است. یک گردابه بزرگ در مرکز و چهار گردابه در گوشه های محفظه ایجاد شده است. این مسئله از این جهت حائز اهمیت است که در گوشه ها به علت ضخامت بالای لایه مرزی، انتقال حرارت به مراتب پایین تر از سایر نقاط است. گردابه های ایجاد شده به ازای فاصله منبع ۰/۶، باعث افزایش جریان سیال در گوشه ها شده و احتمالاً موجب افزایش نره انتقال حرارت می گردد. همچنین در شکل ۱۲(ب)، دو گردابه در ناحیه مرکزی محفظه وجود دارد که با افزایش فاصله منبع در شکل ۱۲(ج)، با هم ترکیب شده و تشکیل یک گردابه بزرگتر داده اند.

تاثیر فاصله دو منبع میدان از محفظه بر ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد برای دو دیواره سرد و گرم به ترتیب در شکل ۱۳(الف) و (ب) نشان داده شده است.

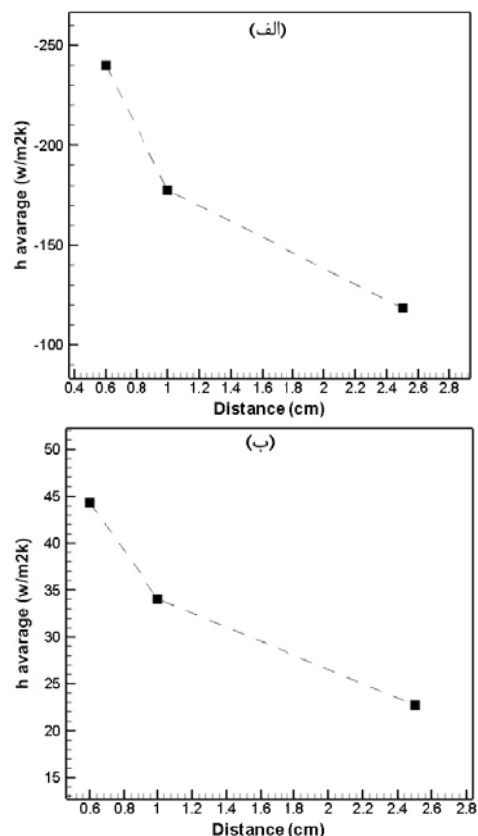


شکل ۱۳- تاثیر فاصله دو منبع میدان از محفظه بر ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد برای دو دیواره سرد و (ب) گرم

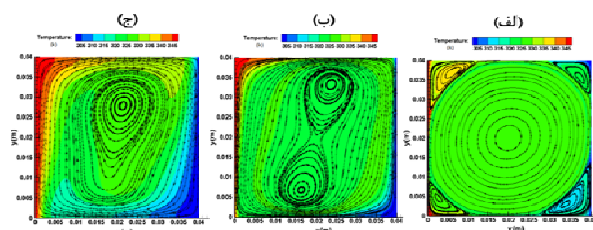
با توجه به شکل ۱۳، منحنی های تغییرات دمایی شکل مشابهی برای دیواره های سرد و گرم داشته و ماکزیمم انتقال حرارت برای دیواره های سرد و گرم به ترتیب در ۰/۲۸ و ۰/۱۲ متر اتفاق می افتد. مشابه حالت تک منبع، ضریب جابجایی متوسط با انتگرال گیری از ضریب جابجایی محلی بر روی دیواره های سرد و گرم محاسبه شده و به ترتیب در شکل ۱۴(الف) و (ب) نشان داده شده است.

تاثیر دو منبع میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت در حالت میکروجرادیه

با توجه به تاثیر مثبت یک منبع میدان مغناطیسی در افزایش انتقال حرارت، امکان افزایش بیشتر نرخ انتقال حرارت با قراردادن دو منبع میدان در $x=0.02m$ و در مجاورت دیوارهای بالایی و پایینی مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور، توزیع دمای محفظه و خطوط جریان به ازای سه فاصله منبع های میدان از محفظه برابر با ۰/۶، ۱ و ۲/۵ سانتی متر محاسبه و در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تغییرات ضریب جابجایی متوسط با فاصله از صفحه پایینی برای دو صفحه (الف) سرد و (ب) گرم



شکل ۱۴- توزیع دمای محفظه و خطوط جریان به ازای سه فاصله منبع های میدان از محفظه برابر با (الف) ۰/۶، (ب) ۱ و (ج) ۲/۵ سانتی متر

شکل ۱۲ بیانگر کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی با کاهش فاصله دو منبع از محفظه می باشد. بطوریکه در فاصله ۰.۶ سانتی متر، ناحیه بزرگ تقریباً دایروی شکل و هم دما در داخل محفظه

برای تمام حالت‌های مورد بررسی محاسبه و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ - حرارت منتقل شده از سطح گرم به سیال و ضریب عملکرد حرارتی برای حالت‌های مختلف مورد بررسی

کارایی حرارتی ϵ_t	نرخ انتقال حرارت از سطح گرم (W)	حالت‌های مورد بررسی	
-	66	m=0 A.m	بدون میدان
1.15	76	M=0.5 A.m	یک منبع با شدت میدان‌های مختلف در $d=0.6$ cm
1.73	115	m=3 A.m	
3.82	252	m=10 A.m	
5.26	347	m=15 A.m	
6.53	431	m=20 A.m	
1.74	115	d=0.6 cm	یک منبع با شدت در $m=3$ A.m فواصل مختلف از محفظه
1.27	84	d=1.0 cm	
0.85	56	d=2.5 cm	
22.7	1498	d=0.6 cm	دو منبع با شدت در $m=0.5$ A.m فواصل مختلف
6.79	448	d=1.0 cm	
1.98	131	d=2.5 cm	

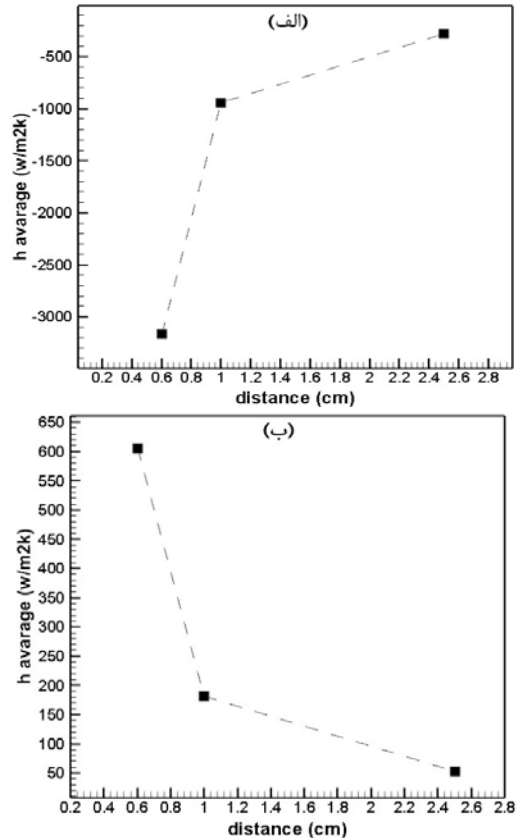
با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود افزایش شدت میدان از ۰/۵ به ۲۰ آمپر متر موجب افزایش ضریب عملکرد حرارتی (نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان) از ۱/۱۵ به ۶/۵۳ می‌شود. همچنین، قرار دادن دو منبع میدان مغناطیسی سبب افزایش قدرت گردابه داخل محفظه شده و به عنوان مثال در شدت $m=0.5$ A.m منجر به ضریب عملکرد ۲۲/۷ می‌شود. این مقدار ۱۹/۷ برابر انتقال حرارت در حالت تک منبعی است.

نتیجه گیری

تاثیر میدان مغناطیسی ناشی از یک دوقطبی مغناطیسی بر انتقال حرارت فروسیال اکسید آهن در یک محفظه مربعی در شرایط میکرو جاذبه بصورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. با بررسی مکانیزم ایجاد نیروی مغناطیسی و نحوه تغییر توزیع دما و میدان جریان، تاثیر استفاده از یک منبع میدان زیر محفظه و یا دو منبع میدان در بالا و پایین محفظه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی بدست آمده عبارت است از:

- برخلاف حالت جاذبه طبیعی، لایه مرزی حرارتی بر روی دیواره‌های سرد و گرم و همچنین گردابه جریان در شرایط میکرو جاذبه تشکیل نشده و مکانیزم انتقال حرارت داخل محفظه از نوع هدایت حرارتی است.
- در غیاب میدان مغناطیسی، انتقال حرارت داخل محفظه، در شرایط میکرو جاذبه بسیار کمتر از حالت جابجایی طبیعی است.

روند نزولی کاهش انتقال حرارت مطابق انتظار برای حالت دو منبع نیز به چشم می‌خورد. با کاهش فاصله منبع میدان از ۲/۵ به ۰/۶ سانتی‌متر ضریب جابجایی متوسط در حدود ۶ برابر افزایش می‌یابد.



شکل ۱۴ - تاثیر فاصله دو منبع میدان از محفظه بر ضریب انتقال حرارت جابجایی آزاد برای دو دیواره (الف) سرد و (ب) گرم

در مسائل انتقال حرارت با شرط مرزی دما ثابت، یکی از مهمترین پارامترها، میزان حرارت منتقل شده از دیواره به سیال خنک کننده است. این پارامتر بیانگر میزان تاثیر سیال در خنک کنندگی سطح گرم است. در مطالعه حاضر حرارت منتقل شده از دیواره گرم به سیال برای حالت‌های مختلف مورد بررسی، با انتگرال گیری شار حرارتی موضعی بر روی سطح گرم، محاسبه شده است. علاوه بر این، به منظور بررسی تاثیر کلی اعمال میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت در حالت میکرو جاذبه، پارامتری بنام عملکرد حرارتی بصورت زیر تعریف شده است.

$$\epsilon_t = \frac{q_{mf}}{q_0} \quad (13)$$

که در رابطه فوق، q_{mf} و q_0 به ترتیب، انتقال حرارت از سطح گرم به سیال تحت اثر میدان مغناطیسی و در غیاب میدان می‌باشند. مقادیر انتقال حرارت کل از صفحه گرم به سیال و عملکرد حرارتی

- [7] Blums, E., Mezulis, A. and Kronkalns, G. "Magnetoconvective heat transfer from a cylinder under the influence of a nonuniform magnetic field," *Physics: Condensed Matter*, Vol. 20, No. 20, 2008, pp 204128.
- [8] Banerjee, S., et al., "Effects of the Dipole Position on Thermomagnetic Convection in a Locally Heated Shallow Enclosure: Thermodynamic and Transport Analysis," *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 57, No. 7, 2010, pp. 496-519.
- [9] Wen, C. Y., Chen, C.-Y. and Yang, S.-F. "Flow visualization of natural convection of magnetic fluid in a rectangular Hele-Shaw cell," *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, 2002. pp. 206-208.
- [10] Zablockis, D., Frishfelds, V. and Blums, E., "Numerical investigation of thermomagnetic convection in a heated cylinder under the magnetic field of a solenoid," *physics: condensed matter*, Vol. 20, No. 20, 2008, pp. 204134.
- [11] Tagawa, T., Shigemitsu, R. and Ozoe, H. "Magnetizing force modeled and numerically solved for natural convection of air in a cubic enclosure: effect of the direction of the magnetic field," *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 45, No. 2, 2002. pp. 267-277.
- [12] Horsten, W. V., Odenbach, S., Stierstadt, K., "Magnetic benard convection under microgravity," *Advanced Space Research*, Vol. 11, No. 7, 1991, pp. 251-254.
- [13] Odenbach, S., "Microgravity experiments on thermomagnetic convection in magnetic fluid," *Magnetism and magnetic materials*, Vol. 149, 1995, pp. 155-157.
- [14] Zebib, A., "Thermal convection in a magnetic fluid," *Fluid Mechanics*, Vol. 321, 1991, pp. 121- 136.
- [15] Jasmine, H. A., "Rayleigh-Bénard Convection in Ferrofluids in the Microgravity Environment," *Scientific research*, Vol. 8, No. 3, 2016., pp. 309-319.
- [16] Hadavand, M. and Sousa, A. "Lattice boltzmann simulation of three-dimensional thermomagnetic convection in a micro-channel," *AIP Conference Proceedings*. 2011. AIP.
- [17] Morini, G.L., "Viscous heating in liquid flows in micro-channels," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 17, 2005. pp. 3637-3647.
- [18] Kandelousi, M.S., "Effect of spatially variable magnetic field on ferrofluid flow and heat transfer considering constant heat flux boundary condition," *European Physical Journal Plus*, Vol. 129, No. 11, 2014. pp. 248-257.
- [19] Sheikholeslami, M. and Ganji, D.D., *External magnetic field effects on hydrothermal treatment of nanofluid: numerical and analytical studies*, William Andrew, 2016.
- اعمال میدان مغناطیسی باعث تولید نیروی حجمی متغیر با دما و وابسته به مکان در داخل محفظه می‌گردد.
- نیروی مغناطیسی به عنوان جایگزینی برای نیروی شناوری، با ایجاد جریان سیال داخل محفظه، منجر به توزیع دمایی مشابه حالت جاذبه طبیعی شده و انتقال حرارت جابجایی در شرایط میکروجرادیه را افزایش می‌دهد.
- انتقال حرارت جابجایی در شرایط میکروجرادیه نسبت مستقیم با شدت میدان مغناطیسی و نسبت عکس با فاصله منبع میدان از محفظه دارد.
- افزایش شدت میدان از ۰/۵ به ۲۰ آمپر متر موجب بهبود ضریب عملکرد حرارتی (نرخ انتقال حرارت نسبت به حالت بدون میدان) به میزان ۵/۶۷ برابر می‌شود. افزایش انتقال حرارت با شدت میدان به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی حرارتی است.
- قرار دادن دو منبع میدان مغناطیسی سبب افزایش قدرت گردابه داخل محفظه شده و در نتیجه موجب افزایش ۱۹/۷ برابری انتقال حرارت نسبت به حالت تک منبع می‌شود.

مراجع

- [1] Goharkhah, M., Esmaeili, M., and Ashjaee, M., "Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field," *Space science and technology*, Vol. 11, No. 2, 2018, pp. 11-19
- [2] Rosensweig, R.E., *Ferrohydrodynamics: Courier Corporation*, 2013.
- [3] Ganguly, R., Sen, S. and Puri, I.K., "Thermomagnetic convection in a square enclosure using a line dipole," *Physics of Fluids*, Vol. 16, No. 7, 2004, pp. 2228-2236.
- [4] Sawada, T., et al., "Natural convection of a magnetic fluid in concentric horizontal annuli under nonuniform magnetic fields," *Experimental thermal and fluid science*, Vol. 7, No. 3, 1993, pp. 212-220.
- [5] Krakov, M. and Nikiforov, I., "To the influence of uniform magnetic field on thermomagnetic convection in square cavity," *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 252, 2002, pp. 209-211.
- [6] Ashouri, M., et al., "Correlation for Nusselt number in pure magnetic convection ferrofluid flow in a square cavity by a numerical investigation," *Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, No. 22, 2010. pp. 3607-3613.