نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی (JEED)
دوره ۸، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۰، ص: ۱- ۱۲

J. Energy Conversion
Volume: 8, Issue: 3, 2021: 1−12

DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1

بررسی اعمال میدان مغناطیسی در تمامی راستاها بر عملکرد حرارتی حفره ربع دایره‌ای شکل حاوی نانوسیال مغناطیسی آب شور- اکسید آلومینیم

ایمان جلوداری[۱و*] و محمدامین اسماعیلی سیکارودی[۲]

*۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی فیروزآباد، فیروزآباد، فارس، ایران
۲- دکتری مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، مرکز آموزش عالی فیروزآباد، فیروزآباد، فارس، ایران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۵، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

چکیده

در این مقاله به مطالعه تاثیر اعمال میدان مغناطیسی در تمامی راستاها بر عملکرد انتقال حرارت حفره حاوی نانوسیال پرداخته شد. نانوسیال مغناطیسی مورد بررسی در این تحقیق آب شور- اکسید آلومینیم می‌باشد. هندسه مورد مطالعه حفره‌ای ربع دایره شکل است که دیوار سمت چپ سطح سرد، دیوار سمت پایین سطح گرم و باقی سطوح عایق در نظر گرفته شده‌اند. همچنین فرض شده است که کلیه سطوح ثابت میباشند. معادلات حاکم به روش عددی و براساس حجم کنترل و الگوریتم سیمپل حل شده است. مطالعه مورد نظر در غلظت‌های ۰ تا ۰/۰۴ درصد نانوذرات و عدد هارتمن ۰ تا ۹ در عدد رایلی 10^5 صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش در غلظت نانوذرات و قدرت میدان مغناطیسی سبب افزایش اثر کاهنده ناشی از نیروی لورنز می‌گردد، به‌طوری که در غلظت صفر نانوذرات افزایش در قدرت میدان مغناطیسی تاثیری ناچیز بر عملکرد حرارتی حفره حاوی نانوسیال دارد و با افزایش غلظت نانوذرات ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال افزایش می‌یابد و اثرات کاهنده ناشی از میدان مغناطیسی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین افزایش ۲ درصدی در غلظت نانوذرات در عدد هارتمن ۴/۵، بیش از ۴۵ درصد کاهش در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد و این میزان کاهش در غلظت ۴ درصد نانوذرات و هارتمن ۹ به بیش از ۶۵ درصد می‌رسد.

* **عهده‌دار مکاتبات:** jelodari.iman.fabad@gmail.com

کلمات کلیدی: نانوسیال مغناطیسی، حفره ربع دایره، جابجایی آزاد، حل سه بعدی، نیروی لورنز

۱- مقدمه

جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌های مربعی کاربردهای مهندسی متعددی دارد. این نوع مسائل در سیستم‌های خنک کاری قطعات الکترونیکی، تهویه ساختمان‌ها، کلکتورهای ذخیره کننده انرژی خورشیدی، سیستم‌های رآکتورهای هسته‌ای، صنایع ذخیره‌سازی غذایی و سیستم‌های ژئوفیزیکی مصداق پیدا می‌کند. جابه‌جایی طبیعی در محفظه‌ها را می‌توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: ۱- محفظه‌هایی که از وجه جانبی گرم می‌شوند. ۲- محفظه‌هایی که از وجه زیرین گرم می‌شوند. تفاوت اصلی بین دو گروه مربوط به اختلاف دمای اعمال شده بر محفظه‌های تحت بررسی می‌باشد. محفظه‌هایی که از وجه جانبی گرم می‌شوند، به محض اینکه اختلاف دمای بسیار کوچکی در محفظه اعمال شود، پدیده انتقال حرارت جابه‌جایی اتفاق می‌افتد. در حالی که، در محفظه‌هایی که از وجه زیرین گرم می‌شوند، قبل از اینکه علائم حرکت سیال مشاهده شود، می‌بایست اختلاف دمای اعمال

نحوه استناد به این مقاله: ایمان جلوداری، محمدامین اسماعیلی سیکارودی. بررسی اعمال میدان مغناطیسی در تمامی راستاها بر عملکرد حرارتی حفره ربع دایره‌ای شکل حاوی نانوسیال مغناطیسی آب شور- اکسید آلومینیم. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۰; ۸ (۳) :۱-۱۲. **DOR:** 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

شده به مقدار بحرانی خود برسد. از جمله کاربردهای ذکر شده گروه اول، عایق کاری دیوارهای دوجداره و سیستم‌های سرمایش ماشین آلات دوار صنعتی می‌باشد. به عنوان مثال کاربردی از گروه دوم، می‌توان به عملکرد ایزوله‌های حرارتی انتقال حرارت در فضای اتاقک زیر شیروانی یک سقف اشاره کرد.

با توجه به نیاز روز افزون به خنک‌کاری سیستم‌هایی که تلفات حرارتی بالایی دارند، دانشمندان و محققین به سمت دستیابی به سیال‌هایی با خواص انتقال حرارتی بالاتر ترغیب شده‌اند. یکی از ایده‌های مطرح شده، اضافه کردن ذراتی با خواص انتقال حرارتی بالاتر به سیال پایه است[۱]. جنس این ذرات بنا به نوع کاربرد آن‌ها می‌تواند فلز، نافلز یا اکسید فلزی باشد. این ذرات با داشتن ضریب انتقال حرارت بالاتر نسبت به سیال پایه، قابلیت بهبود هدایت حرارتی کل را دارا هستند. در ابتدا این ذرات با ابعاد میلی و میکرو مورد استفاده قرار گرفت. ذراتی با این ابعاد نه تنها خاصیت انتقال حرارت را بهبود نمی‌بخشیدند، بلکه باعث ایجاد رسوب و خوردگی در لوله‌ها و اتصالات نیز می‌شدند. برای اولین بار چویی توانست به ساخت ذراتی با اندازه نانو که نسبت به ذرات ساخته شده قبلی دارای خواص انتقال حرارت بالاتر و پایداری بیشتر بود، دست یابد. محاسبات آزمایشگاهی نشان داد افزایش در غلظت نانوذرات افزایش در ضریب انتقال حرارت هدایت را به همراه دارد که نتیجه آن افزایش میزان انتقال حرارت بود [۲و۳].

همراه با پیشرفت تکنولوژی در زمینه‌هایی مثل رشد بلور، ریخته‌گری فلزات و رآکتورهای هسته‌ای، بررسی تاثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد پا به عرصه پژوهش‌های نوین گذاشت. میدان مغناطیسی تاثیر بسزایی روی میدان جریان و به تبع آن روی میزان انتقال حرارت دارد، زیرا وجود میدان مغناطیسی سبب به وجود آمدن نیروی لورنز در میدان جریان می‌شود و این نیرو در حالت کلی سبب کاهش جریان جابه‌جایی و میزان انتقال حرارت می‌گردد. ملک‌پور و قاسمی[۴] انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون هندسه‌ای مربع شکل حاوی نانوسیال آب- اکسید آلومینیم تحت تاثیر میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند افزایش در غلظت نانوذرات، افزایش در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد. جلوداری و نیک سرشت[۵] در یک حل سه بعدی تاثیر افزایش غلظت نانوذرات و اعمال میدان مغناطیسی را بر عملکرد حرارتی حفره مکعب شکل مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها نشان داد اگر چه افزایش در قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش میزان انتقال حرارت نانوسیال می‌گردد، اما میدان الکتریکی ناشی از حل کامل معادلات میدان مغناطیسی می‌تواند اثر کاهنده ناشی از میدان مذکور را کاهش دهد. سلیمفندیگل و همکاران[۶] به مطالعه تاثیر میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی حفره مکعب شکل حاوی نانوسیال اکسید سلیکون و آب پرداختند. آن‌ها دریافتند که در اعداد ریچاردسون و هارتمن بالا افزایش در غلظت نانوذرات، کاهش در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد. الرشید و همکاران [۷] در یک حل سه بعدی به مطالعه تاثیر قدرت و شیب میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی حفره مکعبی حاوی نانوسیال تیوب نانوکربن- آب پرداختند. شرایط مرزی به نحوی تعیین شده بود که دیوار عمودی در دماهای متفاوت و دیوارهای دیگر عایق در نظر گرفته شده بودند. آن‌ها تغییرات عدد رایلی، غلظت نانوذرات، عدد هارتمن و زاویه شیب میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی حفره حاوی نانوسیال را مورد مطالعه قرار دادند. الرشید و همکاران دریافتند افزایش در غلظت نانوذرات و عدد رایلی، افزایش در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد و همچنین افزایش عدد هارتمن از مقدار ۵۰ به ۱۰۰ منجر به کاهش ۵۰ درصدی میزان انتقال حرارت می‌شود.

در این مطالعه، برای اولین بار به بررسی تاثیر اعمال میدان مغناطیسی در تمامی جهات و تاثیر غلظت نانوذرات بر میدان سرعت و عملکرد حرارتی نانوسیال آب شور- اکسید آلومینیم در یک محفظه ربع دایره‌ای شکل به صورت سه بعدی پرداخته خواهد شد.

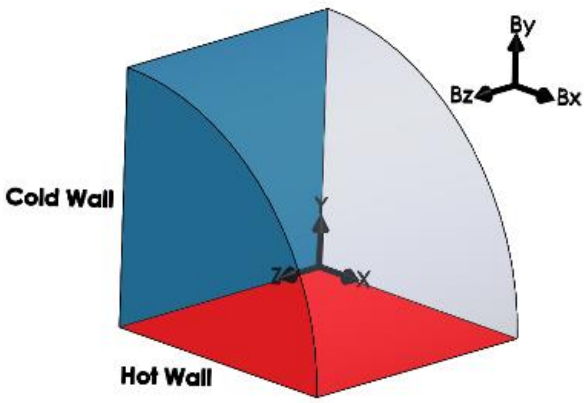
۲- مبانی تحقیق

شکل۱ حفره حاوی نانوسیال مغناطیسی همراه با شرایط مرزی مربوط به آن را نشان می‌دهد. مبدا سیستم مختصات در گوشه سمت چپ و پایین حفره قرار دارد به گونه‌ای که دیواره سمت چپ منطبق بر صفحه $y-z$، دیواره پایین منطبق بر صفحه $x-z$ و راستای عمق حفره منطبق بر محور z می‌باشد. B_x ، B_y و B_z به ترتیب جهت اعمال میدان میدان مغناطیسی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

در راستای محورهای x، y و z را نشان می‌دهد. صفحات افقی و عمودی این حفره دارای دمای ثابتی می‌باشند، به نحوی که دمای صفحه افقی T_H و صفحه عمودی T_C می‌باشد و $T_H > T_C$ است. شایان ذکر است صفحات دیگر عایق در نظر گرفته شده اند. در ابتدا مکانیزم انتقال حرارت حاکم بر مسئله از نوع انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در نظر گرفته می‌شود، بدین ترتیب کلیه دیواره‌ها ثابت و بدون حرکت می‌باشند.



شکل۱- نمایی از هندسه مورد مطالعه همراه با شرایط مرزی مربوط به آن

۳- روش تحقیق

در این پژوهش انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد در حالت پایا درون حفره‌ای ربع دایره شکل حاوی نانوسیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی بررسی شده است. جهت بررسی تاثیر اعمال میدان مغناطیسی خارجی بر میزان انتقال حرارت نانوسیال علاوه بر معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی، معادلات کامل میدان مغناطیسی نیز حل خواهد شد. در این تحقیق فرض شده است که نانوذرات اکسید آلومینیم و آب شور در تعادل گرمایی هستند و بین آن‌ها گرادیان دما و سرعت وجود ندارد. سیال بصورت تک-فاز، نیوتنی و تراکم ناپذیر فرض شده است و جریان سه بعدی و آرام می‌باشد. همچنین در مطالعه حاضر، از اثرات تابش نیز صرف نظر شده است. خواص ترموفیزیکی نانوسیال مغناطیسی با سیال پایه آب شور و نانوذرات اکسید آلومینیم در جدول۱ نشان داده شده است[۵].

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب شور – اکسید آلومینیم در دمای ۲۹۵ کلوین

	ρ (Kg/m^3)	C_p $(J/kg.K)$	k $(w/m.K)$	$\beta\times10^{-5}$ $(1/K)$
آب شور	۹۹۷	۴۱۸۰	۰/۶۰۶	۲۲/۸
اکسید آلومینیم	۳۹۷۰	۷۶۵	۴۰	۰/۸۵

معادلات مورد استفاده برای حل عددی، معادلات پیوستگی، مومنتم، انرژی و بقای میدان مغناطیسی می‌باشند که در حالت پایا و سه بعد بصورت زیر نوشته می‌شوند[۵]:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (۱)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

$$\rho_{nf}(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{nf}\frac{\partial u}{\partial z}) \quad (۲)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}B_z(wB_x-uB_z)-\sigma_{e_{nf}}B_y(uB_y-vB_x)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}(E_yB_z-E_zB_y)$$

$$\rho_{nf}(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{nf}\frac{\partial v}{\partial z}) \quad (۳)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}B_x(uB_y-vB_x)-\sigma_{e_{nf}}B_z(vB_z-wB_y)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}(E_zB_x-E_xB_z)-\rho g$$

$$\rho_{nf}(u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\mu_{nf}\frac{\partial w}{\partial z}) \quad (۴)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}B_y(vB_z-wB_y)-\sigma_{e_{nf}}B_x(wB_x-uB_z)$$
$$+\sigma_{e_{nf}}(E_xB_y-E_yB_x)$$

$$\rho_{nf}C_{p_{nf}}(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z})=k_{nf}(\frac{\partial^2T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2T}{\partial z^2}) \quad (۵)$$

$$u\frac{\partial B_x}{\partial x}+v\frac{\partial B_x}{\partial y}+w\frac{\partial B_x}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_x}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_x}{\partial y}) \quad (۶)$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_x}{\partial z})$$
$$+B_x\frac{\partial u}{\partial x}+B_y\frac{\partial u}{\partial y}+B_z\frac{\partial u}{\partial z}$$

$$u\frac{\partial B_y}{\partial x}+v\frac{\partial B_y}{\partial y}+w\frac{\partial B_y}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_y}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_y}{\partial y}) \quad (۷)$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_y}{\partial z})$$
$$+B_x\frac{\partial v}{\partial x}+B_y\frac{\partial v}{\partial y}+B_z\frac{\partial v}{\partial z}$$

$$u\frac{\partial B_z}{\partial x}+v\frac{\partial B_z}{\partial y}+w\frac{\partial B_z}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_z}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_z}{\partial y}) \quad (۸)$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{1}{\sigma_{e_{nf}}\mu_0}\frac{\partial B_z}{\partial z})$$
$$+B_x\frac{\partial w}{\partial x}+B_y\frac{\partial w}{\partial y}+B_z\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(E_x+vB_z-wB_y)+\frac{\partial}{\partial y}(E_y+wB_x-uB_z)+\frac{\partial}{\partial z}(E_z+uB_y-vB_x)=0 \quad (۹)$$

که در آن $Ra,\Pr$ و Ha به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$Ra=\frac{g\beta_{bf}(T_H-T_C)L^3}{\upsilon_{bf}\alpha_{bf}},\Pr=\frac{\upsilon_{bf}}{\alpha_{bf}},Ha=B_0L\sqrt{\frac{\sigma_{e_{bf}}}{\rho_{bf}\upsilon_{bf}}}$$

خواص نانوسیال اشاره شده در معادلات از روابط (۱۰-۱۲) حاصل می‌گردد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_{bf} + \varphi\rho_s \quad (۱۰)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_{bf} + \varphi(\rho c_p)_s \quad (۱۱)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\varphi)(\rho\beta)_{bf} + \varphi(\rho\beta)_s \quad (۱۲)$$

در این معادلات φ بیانگر غلظت نانوذرات و ρ_{nf}، $C_{P_{nf}}$و β_{nf} به ترتیب چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انبساط حرارتی نانو سیال می‌باشند. جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی و ضریب لزجت از مدلهای ارائه شده توسط کورسیونه[۷] استفاده شده است. بر طبق این مدل، ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به ضریب هدایت حرارتی سیال پایه عبارتست از:

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + 4.4\,\mathrm{Re}_p^{0.4}\, pr^{0.66} \left(\frac{T}{T_{fr}}\right)^{10} \left(\frac{k_s}{k_{bf}}\right)^{0.03} \varphi^{0.66} \quad (۱۳)$$

که در آن Tدمای نانوسیال و T_{fr} دمای نقطه انجماد سیال پایه می‌باشد. در این رابطه، Re_p عدد رینولدز ذرات نانو است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{Re}_p = \frac{2\rho_{bf} k_b T}{\pi \mu_{bf}^2 d_p}$$

به طوری که k_b ضریب ثابت بولتزمن است و مقدار آن برابر است با:

$$k_b = 1.38\times10^{-23}\ (J/K)$$

طبق مدل ارائه شده توسط کورسیونه، نسبت ضریب لزجت نانو سیال به ضریب لزجت سیال پایه از رابطه زیر به دست می‌آید،

$$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{1-34.87\left(\frac{d_p}{d_{bf}}\right)^{-0.3}\varphi^{1.03}} \quad (۱۴)$$

که در آن قطر نانو ذرات d_p و d_f قطر معادل یک مولکول سیال پایه می‌باشد و عبارتست از [۸]:

$$d_f = 0.1\left(\frac{6M}{N\pi\rho_{bf_0}}\right)^{1/3}$$

در این رابطه Mوزن مولکولی سیال پایه و N عدد آووگادرو است. همچنین جهت محاسبه ضریب هدایت الکتریکی از روش کوناکانجی و همکاران[۹] استفاده شده است.

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = [2928.485f^2 + 23095.615f + 419.136][-3.373\left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + 7.3092\left(\frac{T}{T_0}\right) - 3.3397] \quad (۱۵)$$

شرایط مرزی حاکم بر مساله نیز به صورت زیر بیان می‌گردد.

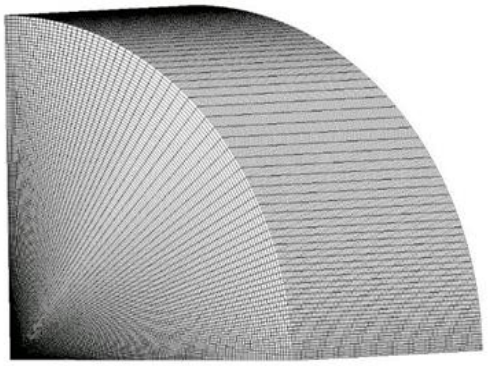
دیوار افقی	$T = T_H$	$u = v = w = 0$
دیوار عمودی سمت چپ	$T = T_C$	$u = v = w = 0$
دیوار سمت راست	$\frac{\partial T}{\partial n^{\rightarrow}}$	$u = v = w = 0$
دیوار سمت جلو و عقب	$\frac{\partial T}{\partial Z} = 0$	$u = v = w = 0$

یک برنامه کامپیوتری تهیه شده و از آن جهت حل معادلات حاکم و شرایط مرزی به روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل استفاده شده است. در گسسته‌سازی عبارت جابه‌جایی معادله مومنتم از روش تقریب بالادست استفاده شده است. شرط

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

همگرایی، مجموع باقی مانده تمامی نقاط شبکه مربوط به معادله پیوستگی، مومنتم، انرژی و بقای میدان مغناطیسی کمتر از 10^{-6} لحاظ شده است. شبکه محاسباتی در نظر گرفته شده جهت حل معادلات به صورت ساختارمند می‌باشد. جهت بررسی عدم وابستگی حل به شبکه، مقدار عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در سه شبکه مورد مطالعه قرار گرفت. بدین منظور سه شبکه ۹۰×۹۰×۹۰، ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ و ۱۳۰×۱۳۰×۱۳۰ انتخاب شده است که درصد خطای بین دوشبکه ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ و ۱۳۰×۱۳۰×۱۳۰ کمتر از یک درصد بوده است (جدول۱). بنابراین شبکه ۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰ به عنوان شبکه محاسباتی جهت حل کلیه معادلات انتخاب شده است (شکل۲).

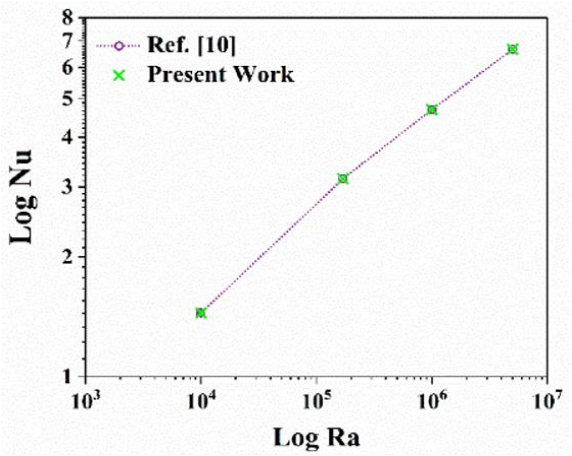


شکل۲- نمایی از شبکه بندی هندسه ربع دایره مورد مطالعه

جدول۱- اعتبار سنجی شبکه محاسباتی

	۹۰×۹۰×۹۰	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	۱۳۰×۱۳۰×۱۳۰
$Ra = 10^5$	۲/۸۱۲	۲/۷۱۶	۲/۷۱۵

به منظور بررسی صحت و دقت تحقیق حاضر، عدد ناسلت محاسبه شده از حل عددی در هندسه حفره ربع دایره‌ای، با نتایج مرجع [۱۰] مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد که تطابق خوبی بین نتایج حاصل از کار عددی با مرجع[۱۰] برقرار است (شکل۳).



شکل۳- مقایسه اعداد ناسلت متوسط حاصل از حل عددی حاضر با مرجع [۱۰] در اعداد رایلی۱۰۴ تا ۱۰۶ ۵×

جهت اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری، به منظور بررسی حل صحیح میدان الکتریکی ناشی از میدان مغناطیسی، نتایج حل عددی با نتایج مراجع [۱۱] و [۱۲] به هنگام اعمال میدان مغناطیسی در جهات y و z مورد مقایسه قرار گرفت. دیده می‌شود که در این حالت نیز نتایج تطابق خوبی با یکدیگر دارند (جدول۳).

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

جدول۳- مقایسه اعداد ناسلت متوسط حاصل از حل عددی با مراجع [۱۱] و [۱۲] در $Ha = ۱۰۰$، $Ra = ۱۰^۵$ و $Pr = ۰/۰۲۴$

		رابطه تحلیلی	کار حاضر	درصد خطا
Nu	B_Z	۱/۳۷	۱/۳۲	۳/۷
	B_Y	۲/۲۳	۲/۲	۱/۴

۴- یافته ها

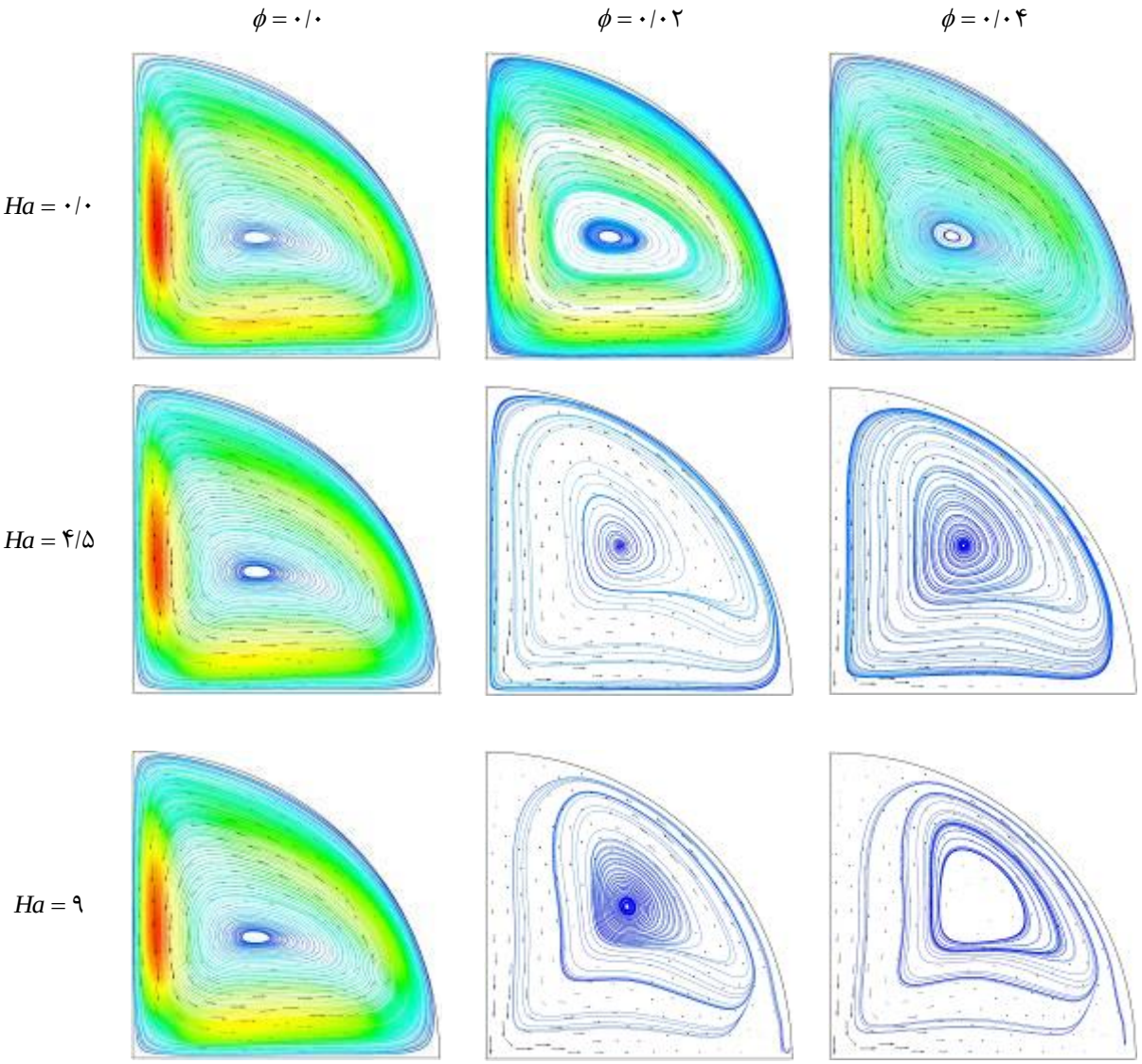
در ابتدا به بررسی میدان جریان حفره حاوی نانوسیال تحت تاثیر میدان مغناطیسی پرداخته می‌شود. همان‌طور که از شکل۴ مشخص می‌باشد، جریان در نزدیکی سطح گرم به علت کاهش چگالی سیال عامل به واسطه تماس سیال با سطح گرم به سمت بالا حرکت می‌کند، در ادامه سیال در امتداد سطح آدیاباتیک به سمت بالا حرکت می‌کند و هنگامی که به سطح سرد می‌رسد به علت افزایش چگالی ناشی از تماس سیال با سطح سرد و اثر گرانش، سیال به سمت پایین حرکت می‌کند. در نهایت سیال سطح افقی پایین را طی کرده و این روند تکرار می‌گردد.

با افزایش غلظت نانوذرات در قدرت صفر میدان مغناطیسی میزان لزجت نانوسیال به مراتب بیشتر می‌گردد، که تاثیر آن بر میزان انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد کاملا قابل مشاهده است. با افزایش قدرت میدان مغناطیسی در غلظت صفر نانوذرات مشاهده می‌گردد که در این حالت می‌توان از اثرات کاهنده ناشی از میدان مغناطیسی بر میدان جریان حفره صرف نظر کرد. علت این پدیده ناشی از کم بودن ضریب هدایت الکتریکی سیال پایه و به تبع آن کم بودن تاثیر نیروی کاهنده نیروی لورنز می‌باشد. اثرگذاری نیروی لورنز در جهت عمود بر میدان مغناطیسی و در راستای خلاف جهت سرعت سیال می باشد و سه عامل ضریب هدایت الکتریکی سیال، سرعت سیال و بزرگی قدرت میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده بر سیال عامل، در بزرگی نیروی لورنز تاثیر گذار می‌باشند. بنابراین زمانی که میدان مغناطیسی خارجی بر سیال خالص فاقد نانوذرات اعمال می-گردد، به علت پایین بودن ضریب هدایت الکتریکی سیال پایه اثرات کاهنده نیروی لورنز نیز ناچیز است. در ادامه با افزایش غلظت نانوذرات و افزایش ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال، میزان تاثیرگذاری میدان مغناطیسی به‌مراتب بسیار زیاد می‌شود که این پدیده سبب کاهش شدید مومنتم سیال می‌گردد به نحوی که در هارتمن ۴/۵، با افزایش غلظت نانوذرات به مقدار ۰/۰۲ کاهش شدیدی در مومنتم سیال رخ می‌دهد و این روند با افزایش غلظت نانوذرات شدت بیشتری می‌یابد. با افزایش قدرت میدان مغناطیسی و غلظت نانوذرات اثرات نیروی لورنز ناشی از میدان مغناطیسی به میزانی تشدید می‌گردد که سبب جهت‌گیری گردابه مرکز حفره در راستای ۴۵ درجه می‌شود، در این حالت اثرات کاهنده ناشی از میدان مغناطیسی بر مومنتم سیال بسیار زیاد است.

در ادامه به بررسی میدان دما درون حفره حاوی نانوسیال پرداخته می‌شود (شکل۵). همان طور که از شکل مذکور مشخص می‌باشد خطوط همدما در ابتدای سطح گرم دارای فشردگی بالایی است و به تبع آن در این ناحیه میزان انتقال حرارت بیشتر می‌باشد. در طی حرکت سیال در نزدیک دیوار گرم به علت افزایش ضخامت لایه مرزی و کاهش گرادیان دما از فشردگی خطوط همدما در نزدیکی دیوار گرم کاسته خواهد شد. با افزایش غلظت نانوذرات به مقدار ۰/۰۲ و عدد هارتمن به میزان ۴/۵، خطوط دما ثابت به شکل کمان‌هایی از قطاع ربع دایره میل می‌کنند. در این حالت گرادیان دما نزدیک دیوار گرم به شدت کاهش می‌یابد و این پدیده بیانگر این موضوع می‌باشد که مکانیزم غالب بر انتقال حرارت از حالت جابه‌جایی آزاد به سمت هدایت میل می‌کند. با افزایش غلظت و قدرت میدان مغناطیسی اثرات کاهنده ناشی از میدان مغناطیسی بسیار شدیدتر می‌شوند بنحوی که در غلظت ۰/۰۶ نانوذرات و عدد هارتمن ۹ اکثر خطوط همدما به صورت کمان‌هایی عمود بر دیوار آدیاباتیک نقش می‌بندند.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]



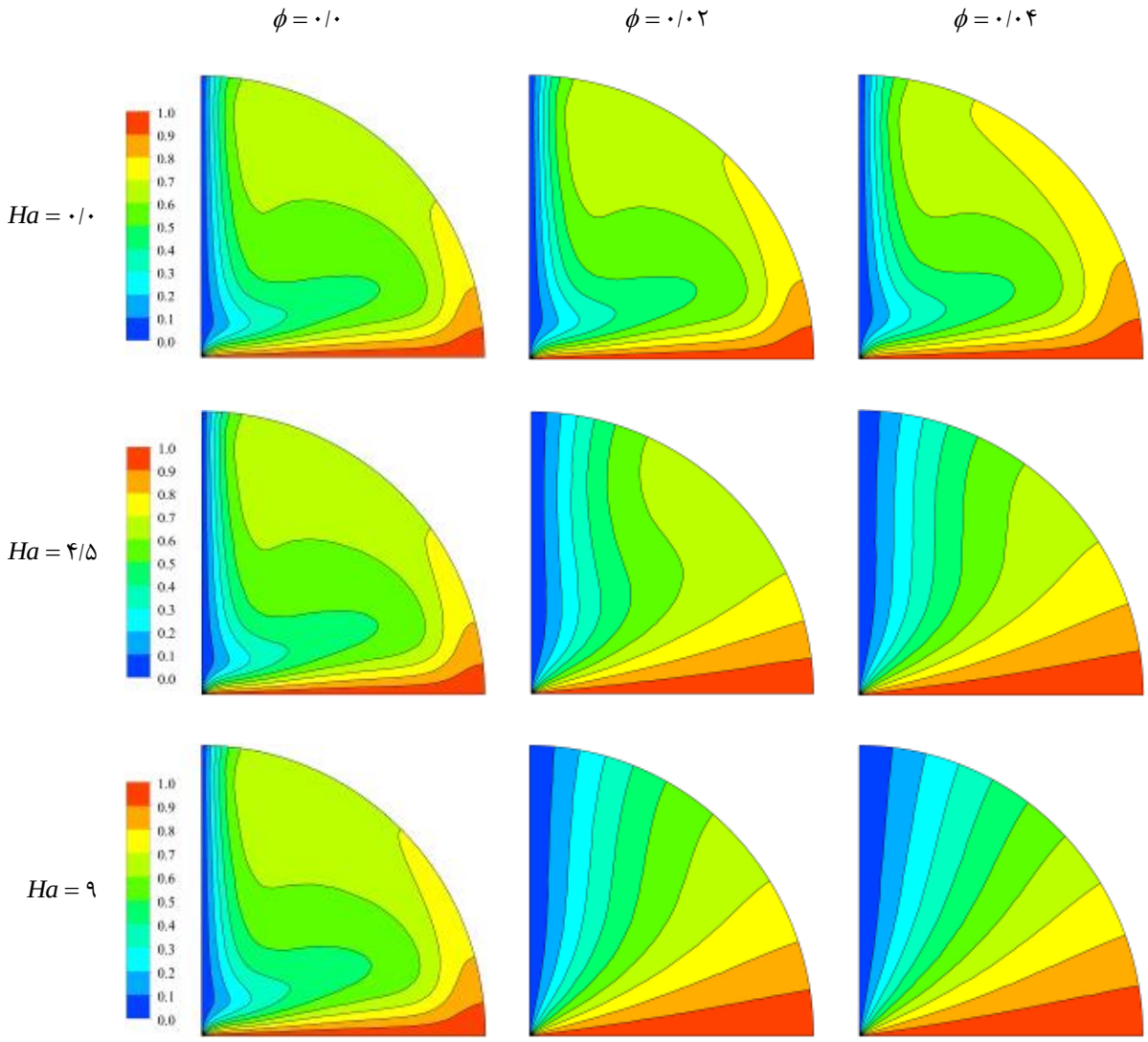
شکل۴- تاثیر غلظت و عدد هارتمن بر خطوط جریان حفره حاوی نانوسیال در صفحه Z / 2 .

جدول۴ به بررسی تغییرات غلظت و قدرت میدان مغناطیسی خارجی بر عدد ناسلت می‌پردازد. با افزایش غلظت نانوذرات اگر چه میزان ضریب انتقال حرارت هدایت نانوسیال به مراتب بیشتر خواهد شد اما از طرف دیگر، افزایش در لزجت نانوسیال را نیز به همراه خواهد داشت. این عامل سبب کاهش میزان انتقال حرارت به واسطه افزایش در غلظت نانوذرات می‌گردد. همچنین نتایج نشان می‌دهد افزایش در قدرت میدان مغناطیسی سبب کاهش میزان انتقال حرارت نیز می‌گردد که علت آن اثرات کاهنده ناشی از افزایش قدرت نیروی لورنز به واسطه افزایش در قدرت میدان مغناطیسی خواهد بود. با افزایش غلظت نانوذرات و قدرت میدان مغناطیسی اثرات کاهنده ناشی از میدان مذکور به شدت افزایش یافته به نحوی که در غلظت نانوذرات برابر با ۰/۰۶ و عدد هارتمن برابر با ۹ میزان انتقال حرارت حفره حاوی نانوسیال به شدت کاهش پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود در عدد هارتمن ۴/۵ افزایش در غلظت نانوذرات از مقدار ۰/۰ به ۰/۰۲ کاهش ۴۵ درصدی در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد که این مقدار با افزایش غلظت نانوذرات به ۰/۰۶ به مقدار بیش از ۶۰ درصد خواهد رسید. روند کاهنده مذکور با افزایش غلظت و قدرت میدان مغناطیسی به اندازه‌ای بر کاهش میزان انتقال حرارت شدید خواهد بود که میزان

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

کاهش عدد ناسلت در غلظت ۰/۰۶ نانوذرات و عدد هارتمن ۹ کاهشی بیش از ۶۵ درصد را نسبت به زمانی که سیال خالص تحت تاثیر میدان مغناطیسی نمی‌باشد را به همراه خواهد داشت.



شکل۵- تاثیر غلظت نانوذرات و عدد هارتمن بر میدان دما حفره حاوی نانوسیال در صفحه Z / 2

جدول۴- تغییرات عدد ناسلت با غلظت‌های متفاوت نانوذرات در قدرت‌های مختلف میدان مغناطیسی

	$\varphi =$ ۰/۰	$\varphi =$ ۰/۰۲	$\varphi =$ ۰/۰۴
$Ha =$ ۰/۰	۲/۷۱۶	۲/۵۵۰	۲/۳۷۱
$Ha =$ ۴/۵	۲/۷۰۲	۱/۸۳۶	۱/۶۷۸
$Ha =$ ۹	۲/۶۶۴	۱/۶۷۸	۱/۶۲۳

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی اعمال میدان مغناطیسی در تمامی جهات بر عملکرد حفره ربع دایره شکل حاوی نانوسیال آب شور- اکسید آلومینیم پرداخته شد. تاثیر پارامترهایی همچون غلظت نانوذرات و قدرت میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی و میدان جریان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

- اعمال میدان مغناطیسی بر سیال خالص آب شور تاثیری بسیار ناچیز بر عملکرد حرارتی و میدان جریان حفره مکعب شکل دارد.
- اضافه شدن ۰/۰۲ غلظت نانوذرات اکسید آلومینیم به سیال پایه تحت تاثیر میدان مغناطیسی با هارتمن ۴/۵ کاهش بیش از ۴۵ درصد در میزان انتقال حرارت را به همراه دارد.
- در غلظت ۰/۰۴ نانوذرات و هارتمن ۹؛ خطوط همدما به صورت کمان هایی عمودی بر دیوار آدیاباتیک نقش می-بندند.
- میزان انتقال حرارت حفره حاوی نانوسیال با غلظت ۰/۰۴ نانوذرات تحت تاثیر میدان مغناطیسی با هارتمن ۹ نسبت به سیال پایه بیش از ۶۰ درصد کاهش می‌یابد.

فهرست علائم

شدت میدان مغناطیسی	B	$T, Tesla$
ظرفیت حرارتی ویژه	C_p	$J\,kg^{-1}K^{-1}$
قطر معادل یک مولکول سیال پایه	d_f	m
قطر نانو ذرات	d_p	m
شدت میدان الکتریکی	E	$V.m^{-1}$
ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	h	$W.m^{-2}.K^{-1}$
عدد هارتمن	Ha	
چگالی جریان الکتریکی	J	$A.m^{-2}$
ضریب انتقال حرارت هدایت	k	$W\,m^{-1}K^{-1}$
ثابت بولتزمن	k_b	$1.38066\times10^{-23}\ J\,K^{-1}$
طول مرجع حفره	L	m
وزن مولکولی سیال پایه	M	$kg\,mol^{-1}$
عدد آووگادرو	N	$6.022\times10^{23}\ mol^{-1}$
فشار سیال	p	Pa
عدد پرانتل	Pr	
عدد پرانتل مغناطیسی	Pr_m	
عدد رایلی	Ra	
عددرینولدر	Re	
دما	T	K
سیال پایه در دمای K ۲۹۵	T_{bf_0}	K
دمای دیوار سرد	T_c	K
دمای انجماد	T_{fr}	K
دمای دیوار گرم	T_H	K
مولفه های سرعت در جهت x و y	v, u	$m.s^{-1}$
مختصات دکارتی	y, x	m
ضریب نفوذ حرارتی	α	$m^2.s^{-1}$
ضریب انبساط حرارتی	β	$1/K$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

چگالی	ρ	$kg.m^{-3}$
چگالی بار الکتریکی	ρ_e	$C.m^{-3}$
لزجت دینامیکی	μ	$N\,m^{-2}\,s$
ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی	μ_m	$m.kg.A^{-2}.s^{-2}$
لزجت سینماتیکی	υ	$m^2.s^{-1}$
ضریب هدایت الکتریسیته	σ_e	$\Omega^{-1}.m^{-1}$
غلظت نانو ذرات	φ	
سیال پایه	bf	
نانو سیال	nf	
نانو ذرات جامد	s	

مراجع

[۱] داودیان، مهدی، رئیسی، افراسیاب، (۱۳۹۳)، اثر میدان مغناطیسی بر جابه‌جایی طبیعی یک نانوسیال در محفظه مربعی با غشاء جدا کننده در وسط آن، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، شماره پنجم، ۱۱۱-۱۲۰.

[۲] خراتی کوپایی، مسعود، امیدوار، امیر، جلوداری، ایمان، (۱۳۹۲)، ارزیابی فرض عدم وابستگی دمایی خواص ترموفیزیکی آب-اکسیدآلومینیم در انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد درون حفره، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، شماره هشتم، ۷۸-۶۸.

[3] Koopaee, M. K., Omidvar, A., & Jelodari, I. (2014). Numerical study on the steady-state heat transfer rate of nanofluid filled within square cavity in the presence of oriented magnetic field. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 228(8), 1348-1362.

[۴] ملک‌پور، علی، قاسمی، بهزاد، (۱۳۹۲) بررسی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه مثلثی، مجله علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس، شماره سوم، ۲۱-۱۰.

[5] Jelodari, I., & Nikseresht, A. H. (2018). Effects of Lorentz force and induced electrical field on the thermal performance of a magnetic nanofluid-filled cubic cavity. Journal of Molecular Liquids, 252, 296-310.

[6] Selimefendigil, F., Öztop, H. F., & Chamkha, A. J. (2019). MHD mixed convection of nanofluid in a cubic cavity with a conductive partition for various nanoparticle shapes. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow.

[7] Al-Rashed, A. A., Kalidasan, K., Kolsi, L., Aydi, A., Malekshah, E. H., Hussein, A. K., & Kanna, P. R. (2018). Three-dimensional investigation of the effects of external magnetic field inclination on laminar natural convection heat transfer in CNT–water nanofluid filled cavity. Journal of molecular liquids, 252, 454-468.

[8] Corcione, M. (2011). Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids. Energy conversion and management, 52(1), 789-793.

[9] Konakanchi, H., Vajjha, R., Misra, D., & Das, D. (2011). Electrical conductivity measurements of nanofluids and development of new correlations. Journal of nanoscience and nanotechnology, 11(8), 6788-6795.

[10] Aydin, O., & Yesiloz, G. (2011). Natural convection in a quadrantal cavity heated and cooled on adjacent walls. Journal of Heat Transfer, 133(5).

[11] Churchill, S. W., & Usagi, R. (1972). A general expression for the correlation of rates of transfer and other phenomena. AIChE Journal, 18(6), 1121-1128.

[12] Ozoe, H. (2005). Magnetic convection. Imperial College Press.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]

چکیده انگلیسی:

Effect of Omnidirectional Magnetic Field on Thermal Performance of Quarter-Circle Cavity Containing Saline Water–AL2 O3 Magnetic Nanofluid

Iman Jelodari*, Mohammadamin EsmaeiliSikaroodi

Department of Mechanical Engineering, Higher Education Center FiroozAbad, Fars, Iran

Received: May 2021, Accepted: August 2021

Abstract

This study investigated the effect of an omnidirectional magnetic field on the heat transfer performance of a saline water-Al2O3 magnetic nanofluid (MNF) cavity. The cavity was a quarter-circle with a cold left wall and a heated right wall, whereas other surfaces were insulated (adiabatic). All surfaces were assumed constant. The governing equations were solved numerically based on control volume and SIMPLE algorithm. The nanoparticle concentration ranged from 0 to 0.04 percent, the Hartmann number (Ha) was between 0 and 9, and the Rayleigh number (Ra) was 105. Findings indicated that increased nanoparticle concentration and magnetic field intensity enhance the reductive effect of the Lorentz force. Increasing the magnetic field intensity has an insignificant effect on the thermal performance of the fluid with zero nanoparticle concentration. As the nanoparticle concentration increases, the electrical conductivity of the fluid increases too which leads to a significant increase in the reductive effect of the magnetic field so that a 2% increase in nanoparticle concentration at Ha = 4.5 reduces heat transfer by more than 45%, whereas this reduction is higher than 65% at a nanoparticle concentration of 4% and Ha = 9.

Key words: Magnetic nanofluid, Quarter-circle cavity, Free convection, 3D solution, Lorentz force.

*corresponding author: **jelodari.iman.fabad@gmail.com**

Cite this article as: Iman Jelodari, Mohammadamin EsmaeiliSikaroodi, Effect of Omnidirectional Magnetic Field on Thermal Performance of Quarter-Circle Cavity Containing Saline Water–AL2 O3 Magnetic Nanofluid. Journal of Energy Conversion, 2021, 8(3), 1-12. DOR**:** **20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1400.8.3.3.1]