نشریه علمی-تخصصی تبدیل انرژی

J. Energy Conversion (JEED)
Volume: 12, Issue:1, 2025: 43-65

دوره ۱۲، شماره ۱، بهار ۱۴۰۴، ص: ۶۵-۴۳

بررسی عددی اثر استفاده فروسیال‌های متفاوت تحت اثر دوقطبی‌های مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت بر انتقال حرارت و افت فشار در یک کانال دو بعدی

مهزیار قائدی[۱]، حمیدرضا بهرامی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران ghaedi.m@qut.ac.ir

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران، taleshbahrami@qut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۴/۲/۲۷ ، پذیرش: ۱۴۰۴/۲/۲۸

چکیده

در مطالعه حاضر، با استفاده از نرم‌افزار بر پایه حجم محدود، اثر استفاده از دو دوقطبی با قدرت‌های مختلف و فروسیال‌های واقعی و ساخته شده توسط یک برند تجاری, مدل‌سازی شده است. فروسیال‌های متفاوت با کسر حجمی نانوذرات مختلف و خاصیت مغناطیسی متفاوت در کانال جریان دارد و با برقرار کردن میدان مغناطیسی غیریکنواخت ناشی از یک و دو دوقطبی با قدرت‌های مختلف مشخصه‌های انتقال حرارت و افت فشار درون میلی کانال دچار تغییر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از فروسیال‌ها با خواص مغناطیسی متفاوت و محل قرارگیری دوقطبی تأثیر مستقیمی بر میزان نرخ انتقال حرارت و افت فشار هم‌چون عدد ناسلت متوسط و حداقل عدد ناسلت می‌گذارد. با افزایش کسر حجمی نانوذرات مغناطیسی در سیال پایه (آب) نرخ انتقال حرارت بهبود پیدا می‌کند. مطابق با نتایج به‌دست آمده، با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت حاصل از دوقطبی مغناطیسی، فروسیال ای‌ام‌جی ۷۰۰ بیش‌ترین عدد ناسلت متوسط و فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸ کم‌ترین عدد ناسلت متوسط به‌ترتیب ۱۰/۴۷ و ۹/۹ نتیجه می‌دهند. هم‌چنین بیش‌ترین افت فشار و کم‌ترین افت فشار تحمیل شده در جریان داخلی نیز به‌ترتیب متعلق به ای‌ام‌جی ۷۰۰ (۱۶،۹ پاسکال) و ای‌ام‌جی ۳۰۸ (۴،۶۱ پاسکال) است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** taleshbahrami@qut.ac.ir

کلمات کلیدی: فروسیال، عدد ناسلت، دوقطبی‌های مغناطیسی، کانال دوبعدی، انتقال حرارت

نحوه استناد به این مقاله مهزیار قائدی، حمیدرضا بهرامی. بررسی عددی اثر استفاده فروسیال‌های متفاوت تحت اثر دوقطبی‌های مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت بر انتقال حرارت و افت فشار در یک کانال دو بعدی. **مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۴; ۱۲ (۱) : ۶۵-۴۳.**

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های مهم در سامانه‌های حرارتی، بهبود انتقال حرارت در جریان‌های داخلی کانال‌ها است. برای افزایش راندمان حرارتی، از دو رویکرد کلی استفاده می‌شود: روش‌های فعال و غیرفعال. در روش‌های فعال، از نیروهای خارجی مانند میدان‌های الکتریکی، مغناطیسی یا مکانیکی برای کنترل و بهبود انتقال حرارت بهره‌برداری می‌شود. به‌عنوان مثال، استفاده از فروسیالات که دارای خاصیت مغناطیسی هستند، امکان کنترل دقیق جریان سیال و بهبود نرخ انتقال حرارت با اعمال میدان مغناطیسی را فراهم می‌کند [۱-۲]. این روش‌ها با ایجاد تغییرات پویا در سیال یا سطح کانال، عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشند. به‌علاوه، برای اعمال نیروی حجمی ناشی از میدان مغناطیسی بر سیال جاری در کانال، از نانوذرات دارای خاصیت مغناطیسی در سیال پایه استفاده می‌شود. نانوذرات مغناطیسی به کمک تکنیک‌هایی مانند اختلاط و فراصوت، همراه با استفاده از سورفکتانت‌ها یا تثبیت‌کننده‌ها برای جلوگیری از تجمع و اطمینان از پراکندگی یکنواخت، در یک سیال پایه مخلوط می‌شوند [۳-۴]. در مقابل، روش‌های غیرفعال، بدون نیاز به انرژی خارجی و با تغییرات ساختاری در کانال‌ها، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. این روش‌ها شامل بهینه‌سازی هندسه کانال، استفاده از فین‌ها، فوم‌های متخلخل و هم‌چنین افزودن نانوذرات به سیال پایه هستند. نانوسیالات، به‌ویژه نانوسیالات هیبریدی، به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر غیرفعال شناخته می‌شوند. با افزودن نانوذرات به سیال پایه مانند آب، به‌دلیل افزایش رسانایی حرارتی، نرخ انتقال حرارت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد [۵-۷].

کنترل جریان فروسیالات، به‌عنوان یکی از زیرمجموعه‌های نانوسیالات، با استفاده از میدان‌های مغناطیسی کاربردهای گسترده‌ای در سامانه‌های سیالاتی دارد. این کاربردها شامل تحلیل و کنترل جریان سیال در ابعاد میکرو و نانو [۸-۹]، کنترل جریان و بهبود نرخ انتقال حرارت در جریان‌های درون حفره و محفظه [۱۰-۱۱] و افزایش نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی/ اجباری در جریان‌های داخلی از جمله کاربردهای میدان مغناطیسی هستند [۱۲-۱۳]. هم‌چنین، با تغییر رفتار جریان سیال، بهبود نرخ خنک‌کاری به کمک میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی نیز از دیگر روش‌های فعال به شمار می‌آید [۱۴-۱۵]. مطالعات گسترده‌ای چه به‌صورت عددی و چه به‌صورت آزمایشگاهی با استفاده از فروسیالات برای بهبود انتقال حرارت انجام شده است. به‌عنوان مثال، ملایی و رحمتی [۱۶] اثر میدان مغناطیسی یکنواخت را در یک چاه حرارتی با روش مدل‌سازی عددی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی و افزایش شدت آن (عدد هارتمن) می‌تواند عدد ناسلت را تا حدود ۹ درصد بهبود بخشد. هم‌چنین، نتایج تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی در میکروکانال‌ها و افزایش شدت میدان، مانند افزایش عدد هارتمن، می‌تواند نرخ انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری را تا حدود ۴۰ درصد بهبود دهد [۱۷]. پترینی و همکاران [۱۸]، به اثر استفاده از میدان‌های مغناطیسی و محل قرارگیری آهنرباهای دائمی بر انتقال حرارت فروسیال جاری در یک میکروکانال پرداخته‌اند و نشان داده‌اند که محل قرارگیری میدان‌ها مغناطیسی نسبت به یکدیگر تأثیر بسیار زیادی بر نرخ انتقال حرارت دارد. شاه و خندکار [۱۹]، با روش عددی به تأثیر استفاده از میدان مغناطیسی غیریکنواخت تولید شده توسط دوقطبی‌های مغناطیسی بر انتقال حرارت در یک میلی‌کانال پرداخته‌اند و نتیجه گرفته‌اند که عدد رینولدز و تعداد دوقطبی مغناطیسی تأثیر بسیار زیادی بر نرخ انتقال حرارت و اثر دوقطبی مغناطیسی بر فروسیال جاری در میلی‌کانال دارد.

گوهرخواه و علیزاده [۲۰] با قراردادن میدان مغناطیسی بر روی یک محفظه دارای فروسیال با شرایط میکروجاذبه انتقال حرارت در محفظه را بهبود داده‌اند و نمایش داده‌اند که اعمال دو منبع تولیدکننده میدان مغناطیسی موجب افزایش ۱۹/۷ برابری انتقال حرارت نسبت به حالت تک منبع می‌شود. از دوقطبی‌های مغناطیسی برای افزایش راندمان و بهبود عملکرد در کلکتورهای خورشیدی نیز استفاده شده است [۲۱]. لی و همکاران [۲۲]، اثر استفاده از میدان مغناطیسی غیریکنواخت تولید شده توسط سیم‌های حامل جریان مغناطیسی را بر مبدل حرارتی خورشیدی مدل‌سازی کردند. یافته‌های محققین نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی غیریکنواخت با قدرت مشخص باعث بهبود نرخ انتقال حرارت متوسط مبدل خورشیدی به میزان ۲۱ درصد می‌شود. استفاده از دوقطبی مغناطیسی و نانوذرات دارای خاصیت مغناطیسی در سامانه‌های سیالاتی خاص هم‌چون خون، سیالات مشابه خون و روغن موتور نیز استفاده شده است و نتایج نشان دهنده بهبود رفتار سیال درون سامانه‌های سیالاتی بیان شده است [۲۳-۲۵]. در شرایط خاص، می‌توان روش‌های فعال و غیرفعال را برای بهبود نرخ انتقال حرارت با یکدیگر ترکیب کرد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

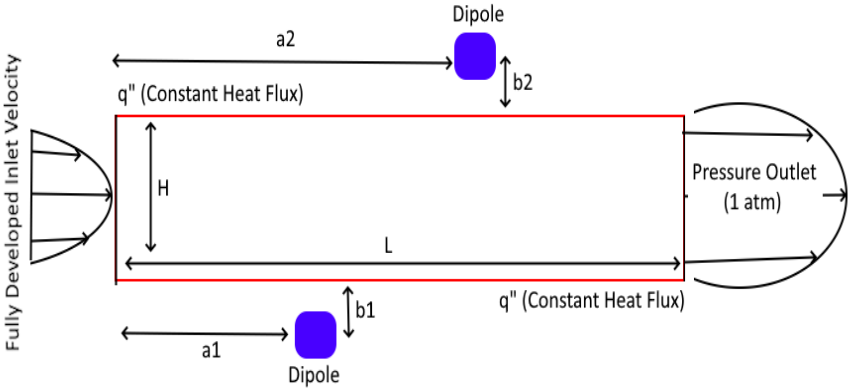
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

بزاعت‌پور و گوهرخواه [۲۶] در یک مطالعه عددی، تأثیر ترکیبی میدان مغناطیسی و فین‌های متخلخل را بر انتقال حرارت و افت فشار در یک هیت‌سینک با نانوسیال مگنتیت بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، تخلخل فین‌ها و قدرت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت بهبود می‌یابد. هم‌چنین، استفاده از فین‌های متخلخل موجب کاهش افت فشار می‌شود.

مروری بر منابع فوق نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، استفاده از میدان‌های مغناطیسی غیریکنواخت تولیدشده توسط دوقطبی‌های مغناطیسی، آهنرباها و سیم‌های حامل جریان، در جریان‌های داخلی مانند کانال‌ها به‌طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی در این زمینه انجام شده است. با این‌حال، تأثیر فروسیال‌های واقعی تولیدشده توسط برندهای تجاری و هم‌چنین اثر قرارگیری دوقطبی‌های مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت بر روی کانال، تاکنون به‌طور جامع بررسی نشده است. در این مطالعه، تأثیر فروسیال‌های واقعی تولیدشده توسط کمپانی فروتک [۴] بر انتقال حرارت و افت فشار درون میلی‌کانال تحت شرایط حرارتی مشخص و با قرارگیری یک یا دو دوقطبی با قدرت‌های متفاوت به صورت عددی بررسی می‌شود. این تحقیق به‌منظور پر کردن خلأ موجود در ادبیات علمی و ارائه دیدگاه‌های جدید در زمینه بهینه‌سازی انتقال حرارت با استفاده از فروسیالات انجام شده است.

۲- شرایط حاکم بر مسئله

متناسب با شرایط هندسی نمایش داده شده در شکل (۱)، فروسیال با یک رژیم آرام، پایا، تراکم‌ناپذیر و تمام توسعه‌یافته و با یک دمای ورودی کم‌تر از دیوارهای مجاور به درون کانال جاری می‌شود. دیوارهای بالا و پایین که فروسیال جاری در کانال را محصور کرده‌اند، دارای شار حرارتی ثابت می‌باشند و جریان داغ شده خروجی به محیط تخلیه می‌شود. شرایط مرزی حاکم بر هندسه مورد بررسی، در جدول (۱) قابل مشاهده است. مطابق با شکل (۱)، دو دوقطبی با قدرت‌های متفاوت، بر دیوارهای بالا و پایین کانال قرارگرفته شده‌اند. فاصله دوقطبی‌ها نسبت به ورودی کانال و همچنین ناحیه محاسباتی و ابعاد محاسباتی کانال در جدول (۲) قابل مشاهده است.



شکل ۱ :شماتیک هندسه مورد مطالعه

جدول ۱: شرایط مرزی کانال مورد بررسی

بخش	شرایط مرزی	روابط
ورودی	سرعت ورودی تمام توسعه‌یافته (بر پایه عدد رینولدز)	$u = 6U_{mean}\left[\frac{y}{h} - (\frac{y}{h})^2\right]$
دیوار بالا	شار حرارتی ثابت ($q'' =$ ۱۰۴ وات بر مترمربع)	$u = 0, v = 0, k\left(\frac{dT}{dy}\right) = q"$
دیوار پایین	شار حرارتی ثابت ($q'' =$ ۱۰۴ وات بر مترمربع)	$u = 0, v = 0, k\left(\frac{dT}{dy}\right) = q"$
خروجی	فشار خروجی به محیط (۱ اتمسفر)	$\frac{du}{dx} = 0, \frac{dT}{dx} = 0, p = p_0$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

جدول ۲: ابعاد کانال و محل قرارگیری دوقطبی‌های مغناطیسی

پارامتر	اندازه (میلی‌متر)
H	۲
L	۵۰
a_1	۲۰
a_2	۳۰
b_1	-۱
b_2	+۳

۳- خواص ترموفیزیکی فروسیالات

هدف اصلی مطالعه بررسی فروسیال‌های مختلف ساخته شده توسط کمپانی معتبر فروتک [۴] و بررسی رفتار هیدروترمال آن‌ها زمانی‌که تحت اثر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند است. فروسیال‌ها با استفاده از فرمول‌های شیمیایی و سورفکتانت خاص ساخته شده‌اند و قابلیت استفاده در صنعت را دارند. متناسب با میزان کسرحجمی نانوذرات حل شده در سیال پایه که در این مطالعه آب است، خواص مغناطیسی فروسیال تغییر می‌کند. نانوذرات آهن (Fe_3O_4) با خواص ترموفیزیکی ثابت در سیال پایه آب یون‌زدایی شده با فرمول‌های خاص حل می‌شود و فروسیال بر پایه آب با برند تجاری ای‌ام‌جی[1] تولید می‌شود. در جدول (۳) و (۴)، خواص ترموفیزیکی نانوذرات و سیال پایه و در ادامه فروسیال تولید شده توسط این برند تجاری مشاهده می‌شود.

جدول ۳: خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره [۳]

ماده	چگالی (ρ) kg/m^3	رسانایی حرارتی (K) $W/m.K$	گرمای ویژه (C_p) $J/kg-K$
آب یون‌زدایی شده	۹۹۵	۰/۶	۴۱۸۰
Fe_3O_4	۵۱۸۰	۸۰	۶۷۰

جدول ۴: خواص ترموفیزیکی فروسیال استفاده شده در مطالعه [۴]

خاصیت و نماد	واحد	ای‌ام‌جی ۳۰۴	ای‌ام‌جی ۳۰۸	ای‌ام‌جی ۵۰۷	ای‌ام‌جی ۵۰۸	ای‌ام‌جی ۷۰۰	ای‌ام‌جی ۸۰۵
چگالی (ρ)	kg/m^3	۱۲۴۰	۱۰۶۰	۱۱۲۰	۱۰۷۰	۱۲۹۰	۱۱۹۰
گرمای ویژه (Cp)	$J/kg-K$	۳۳۲۹،۱	۳۹۱۵،۹	۳۷۰۱،۱	۳۸۷۹،۲	۳۱۹۳،۱	۳۴۷۵،۲
رسانش حرارتی (k)	$W/m-K$	۰،۶۸	۰،۶۲	۰،۶۳	۰،۶۲	۰،۷	۰،۶۷
ویسکوزیته دینامیکی (μ)	$Pa{\cdot}s$	۰،۰۰۳۵	۰،۰۰۲	۰،۰۰۲۴	۰،۰۰۲	۰،۰۰۴	۰،۰۰۳
کسر حجمی نانوذرات (ϕ)	%	۴،۵	۱،۲	۲	۱،۲	۵،۸	۳،۶
مغناطش اشباع(M_s)	mT	۲۷،۵	۶،۶	۱۱	۶،۶	۳۵،۵	۲۲
حساسیت مغناطیسی (x_{ff})	-	۵،۰۳	۰،۵	۱،۶۳	۰،۸۸	۱۲،۵۷	۲،۸۹

خواص ترموفیزیکی و خواص مغناطیسی فروسیال‌های ارائه شده در جدول (۴)، توسط برند فروتک [۴] در کاتالوگ‌های مخصوص به هر فروسیال ارائه شده است. دو خاصیت ترموفیزیکی، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانایی حرارتی فروسیال با استفاده از خواص جدول (۳) و (۴)، با کمک روابط (۱) و (۲) زیر به دست می‌آیند [۳, ۲۷]:

[1] EMG

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

$$C_{ff} = \frac{(\rho_s C_s \varphi + \rho_{bf} C_{bf}(1-\varphi))}{\rho_{ff}} \quad (۱)$$

$$k_{ff} = \frac{k_s + 2k_{bf} - 2(k_{bf} - k_s)(\varphi)}{k_s + 2k_{bf} + (k_{bf} - k_s)(\varphi)} \quad (۲)$$

۴- معادلات ریاضی حاکم

متناسب با فرضیات و شرایط مرزی حاکم بر هندسه و جریان، مطالعه به صورت دوبعدی، پایا و تراکم‌ناپذیر و شار حرارتی ثابت انجام می‌شود و معادلات پیوستگی، ناویر و استوکس در دو جهت x و y و همچنین معادله انرژی به ترتیب توسط روابط (۳) تا (۶) بیان می‌شوند [۲۸-۳۰]:

$$\nabla.\vec{V} = 0 \quad (۳)$$

$$\rho\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}}\right) = -\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{x}} + \mu\left(\frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{u}}{\partial \mathrm{y}^2}\right) + \mathrm{S_x} \quad (۴)$$

$$\rho\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}}\right) = -\frac{\partial \mathrm{P}}{\partial \mathrm{y}} + \mu\left(\frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial \mathrm{y}^2}\right) + \mathrm{S}_y \quad (۵)$$

$$\rho \mathrm{C_p}\left(\mathrm{u}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}}\right) = \mathrm{k}\left(\frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{T}}{\partial \mathrm{y}^2}\right) \quad (۶)$$

ترم‌های S_x و S_y نمایش داده شده در معادلات ناویر و استوکس در دو بعد، نشان‌دهنده‌ی اثر میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی‌های مغناطیسی است که به‌صورت دو نیروی حجمی در معادلات مومنتوم لحاظ می‌شوند. برای رسیدن به دو منبع نیروی مغناطیسی ظاهر شده در معادلات مومنتوم باید از ترکیب قوانین حاکم بر میدان مغناطیسی استفاده کرد. با استفاده از دو قانون آمپر و گاوس شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی توسط روابط (۷) و (۸) به ترتیب نوشته می‌شوند [۳۱]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = 0 \quad (۷)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (۸)$$

در ادامه برای ارتباط بین شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی با یکدیگر از قانون گاوس و پارامتر مغناطش استفاده می‌شود (۹). با استفاده از دیگر روابط (۱۰) و هم‌چنین استناد به پارامتر پتانسیل اسکالر مغناطیسی (۱۱) و استفاده از روابط تبدیل مختصات قطبی به کارتزین (۱۲ و ۱۳) و برعکس، یک ریاضی برای شدت میدان مغناطیسی در مختصات قطبی تعریف می‌شود (۱۴)؛ که به ترتیب عبارت‌اند از [۳۲-۳۳]:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{M} + \vec{H}) \quad (۹)$$

$$\vec{H} = -\vec{\nabla} \cdot V_m \quad (۱۰)$$

$$V_m(x,y) = \frac{m sin\theta}{r} \quad (۱۱)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{y-b}{x-a}\right) \quad (۱۲)$$

$$r = \sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2} \quad (۱۳)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

$$\vec{H}(r,\theta) = \frac{m}{r^2}(\sin(\theta)\,\hat{e}_{\mathrm{r}} - \cos(\theta)\;\hat{\mathrm{e}}_{\theta}) \quad (۱۴)$$

مغناطش فروسیال به کمک تابعی به نام لانژوین توسط رابطه (۱۵) تعریف می‌شود و پارامتر لانژوین به صورت یک معادله بین صفر و یک توسط رابطه (۱۶) تعریف می‌شود. مؤلفه α در معادلات لانژوین، رابطه بین انرژی مغناطیسی و انرژی حرارتی را بیان می‌کند که توسط رابطه (۱۷) تعریف می‌شود. دامنه مغناطیسی فروسیال توسط نسبت مغناطش اشباع که حداکثر حالت مغناطیسی فروسیال است نسبت به کسر حجمی نانوذره مغناطیسی (۱۸) تعریف می‌شود. در نهایت با استفاده تمامی روابط بیان شده در بالا و ادغام و ترکیب روابط، میدان مغناطیسی به‌صورت یک منبع نیرویی حجمی در معادلات مومنتوم در دو جهت اعمال می‌شود که با استفاده از رابطه (۱۹) تعریف می‌شود [۳۴-۳۶].

$$\vec{M} = M_s L(\alpha)\frac{\vec{H}}{|\vec{H}|} \quad (۱۵)$$

$$L(\alpha) = \frac{1}{tanh(\alpha)} - \frac{1}{\alpha} \quad (۱۶)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{6}\frac{\mu_0 M_d |\vec{H}| d^3}{k_B T} \quad (۱۷)$$

$$M_d = \frac{M_s}{\phi} \quad (۱۸)$$

$$\vec{\mathrm{S}} = M_s L(\alpha)\vec{\nabla}\left((\vec{H}\cdot\vec{H})^{0.5}\right) \quad (۱۹)$$

روابط (۷) تا (۱۹) که رفتار میدان مغناطیسی غیریکنواخت را توصیف می‌کنند، به زبان برنامه‌نویسی C کدنویسی شده‌اند و از طریق تابع تعریف‌شده توسط کاربر (یو دی اف) در نرم‌افزار انسیس فلوئنت[2] به‌کار گرفته شده‌اند. این توابع به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که مؤلفه‌های مختلف میدان مغناطیسی را مطابق با شرایط فیزیکی مسأله مدل‌سازی کنند. سپس این توابع در قالب منبع نیرویی (سورس ترم) به معادلات مومنتوم اعمال شده و از این طریق، تأثیر میدان مغناطیسی در روند حل شبیه‌سازی لحاظ شده است. به این ترتیب، رفتار دینامیکی جریان تحت تأثیر میدان مغناطیسی به‌صورت دقیق و قابل کنترل شبیه‌سازی می‌شود.

برای ارزیابی نتایج و تحلیل شرایط هیدرودینامیکی و حرارتی حاکم بر جریان از اعداد بی‌بعد رینولدز (بر پایه قطر هیدرولیک)، ناسلت، میزان تغییرات عدد ناسلت متوسط و افت فشار در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی و ارزیابی نسبت انتقال حرارت به افت فشار (PEC) استفاده می‌شود. به‌ترتیب، معادلات ذکر شده (۲۰ تا ۲۵) به‌صورت زیر نوشته می‌شوند [۳۶-۳۷]:

$$Re = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \quad (۲۰)$$

$$D_h = 2H_1 \quad (۲۱)$$

$$Nu = h \times \frac{D_h}{k} \quad (۲۲)$$

$$Nu_{avg} = \frac{Nu_{lower} + Nu_{upper}}{2} \quad (۲۳)$$

[2] Ansys fluent 2021

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

$$Difference = \frac{(Nu\ or\ \Delta P)_{without\ magnetic} - (Nu\ or\ \Delta P)_{with\ magnetic}}{(Nu\ or\ \Delta P)_{without\ magnetic}} * 100 \quad (۲۴)$$

$$PEC = \frac{\frac{Nu_{avg}}{Nu_0}}{\left(\frac{\Delta p}{\Delta p_0}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (۲۵)$$

۵- اعتبارسنجی و بررسی شبکه

بررسی مورد نظر به‌صورت عددی انجام شده است. برای به‌دست آوردن نتایج و انجام مطالعه، از نرم‌افزار مدل‌سازی عددی بر پایه حجم محدود استفاده شده است. نرم‌افزار انسیس فلوئنت ۲۰۲۱ برای انجام شبیه‌سازی موردنظر استفاده شده است. در این بررسی، نوع حل‌گر کوپل برای حل میدان سرعت و فشار استفاده شده است؛ و برای معادلات فشار، مومنتوم و انرژی از حل‌گر بالاتر از مرتبه دو استفاده شده است؛ زیرا که با اعمال میدان مغناطیسی گرادیان‌های شدیدی تشکیل می‌شود و ناحیه جدایش و چرخشی در جریان پدید می‌آید [۳۸].

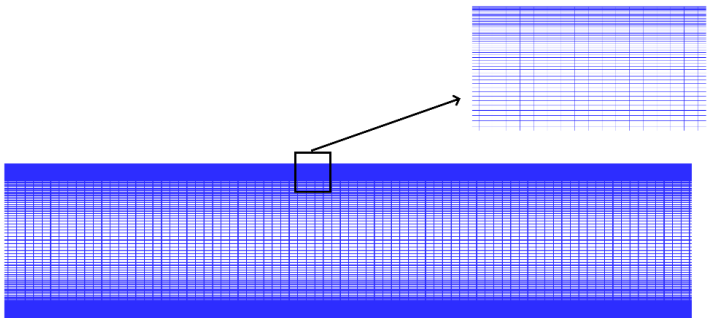
قبل از ورود به حل اصلی و نتیجه‌گیری، ضروری است که استقلال حل و نتایج از شبکه و ناحیه محاسباتی حاکم بر جریان مورد ارزیابی قرار گیرد. به بیان دقیق‌تر، باید اطمینان حاصل شود که حل به‌صورت مستقل از شبکه‌بندی انجام می‌شود و نتایج با تغییرات شبکه تغییر نمی‌کنند. در این تحقیق، پنج شبکه با روش‌های شبکه‌زنی یکنواخت و غیریکنواخت مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج استقلال حل عددی از شبکه در جدول (۵) به‌وسیله عدد ناسلت متوسط و حداقل عدد ناسلت محلی ارزیابی شده است. شبکه بهینه انتخاب‌شده در شکل (۲) نمایش داده شده است. در مطالعه شبکه، عدد رینولدز جریان برابر با ۳۰ فرض شده است. هم‌چنین، شار حرارتی ثابت معادل $۱۰^۴$ وات بر مترمربع بر دیوارهای بالا و پایین اعمال شده است. دو دوقطبی مغناطیسی غیریکنواخت نیز به‌گونه‌ای قرار گرفته‌اند که یکی بر دیوار بالا با قدرت ۱ آمپر بر متر و دیگری بر دیوار پایین با قدرت ۰٫۵ آمپر بر متر مستقر شده است. نتایج مطالعه شبکه نشان‌دهنده این است که ریز شدگی و افزایش تعداد المان‌های شبکه به بهبود و ثبات نتایج منجر می‌شود. بر اساس اطلاعات موجود در جدول (۵)، شبکه با تعداد المان ۵۶۲۵۰ برای انجام شبیه‌سازی‌ها انتخاب گردید.

جدول ۵- مطالعه شبکه، عدد ناسلت متوسط و حداقل عدد ناسلت محلی بر دیوار پایین (رینولدز = ۳۰، شار حرارتی = $۱۰^۴$، محل دوقطبی‌های مغناطیسی = $a_1 = 25\ mm, a_2 = 30\ mm, b_{1,2} = 1\ mm$)

حداقل ناسلت محلی	ناسلت متوسط	ریز شوندگی	تعداد المان
۴٫۵۸	۱۱٫۱۶	ندارد	المان ۲۰۰۰۰
۴٫۳۵	۱۰٫۲۲	ندارد	المان ۳۳۸۰۰
۴٫۳	۱۰٫۲۵	دارد	المان ۳۶۰۰۰
۴٫۲۸	۱۰٫۲۶	دارد	المان ۵۶۲۵۰
۴٫۳	۱۰٫۲۶	دارد	المان ۶۴۸۰۰

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

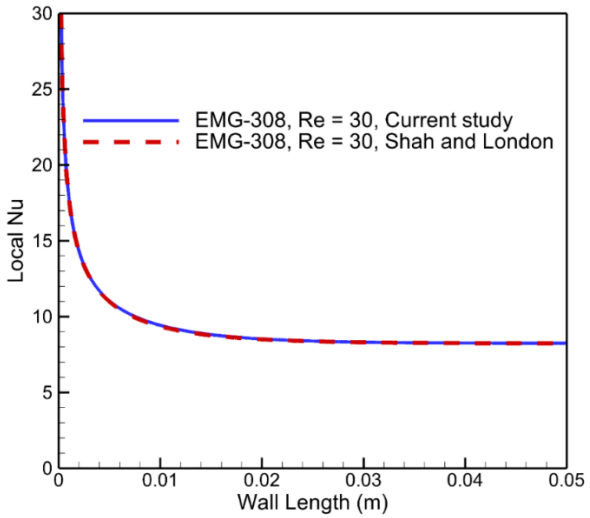


شکل ۲: شماتیک شبکه‌بندی بهینه (۵۶۲۵۰ المان)

پس از بررسی شبکه و رسیدن به استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، اعتبارسنجی کار حاضر با مطالعات و نتایج گذشتگان اهمیت دارد. در این بررسی، دو اعتبارسنجی انجام شده است. در ابتدا برای صحت کار و درستی روش برای مطالعه هیدروترمال کانال مورد نظر، نتایج عدد ناسلت محلی و عدد ناسلت متوسط را با نتایج محققان گذشته اعتبارسنجی می‌شود. برای اعتبارسنجی عدد ناسلت محلی از روابط تحلیلی شاه و لندن [۳۹] استفاده شده است که روابط تحلیلی در معادله (۲۶) تعریف شده است و نتیجه آن در شکل (۳) قابل مشاهده است. هم‌چنین عدد ناسلت خروجی در جریان داخلی کانال دوبعدی دارای شار حرارتی ثابت به یک مقدار معین ۸/۲۴ می‌رسد و نتایج در جدول (۶) قابل مشاهده است.

شاه و لندن [۳۹]

$$\text{Local Nu} = \begin{cases} (1.490)(x^*)^{-\frac{1}{3}} & x^* < 0.0002 \\ (1.490)(x^*)^{-\frac{1}{3}} - 0.4 & 0.0002 \le x^* < 0.001 \\ 8.235 + (8.68)(10^3 x^*)^{-0.508}\left(e^{-164x^*}\right) & x^* \ge 0.001 \end{cases} \quad (۲۶)$$



شکل ۳ :اعتبارسنجی عدد ناسلت محلی با روابط تحلیلی شاه و لندن [۳۹]

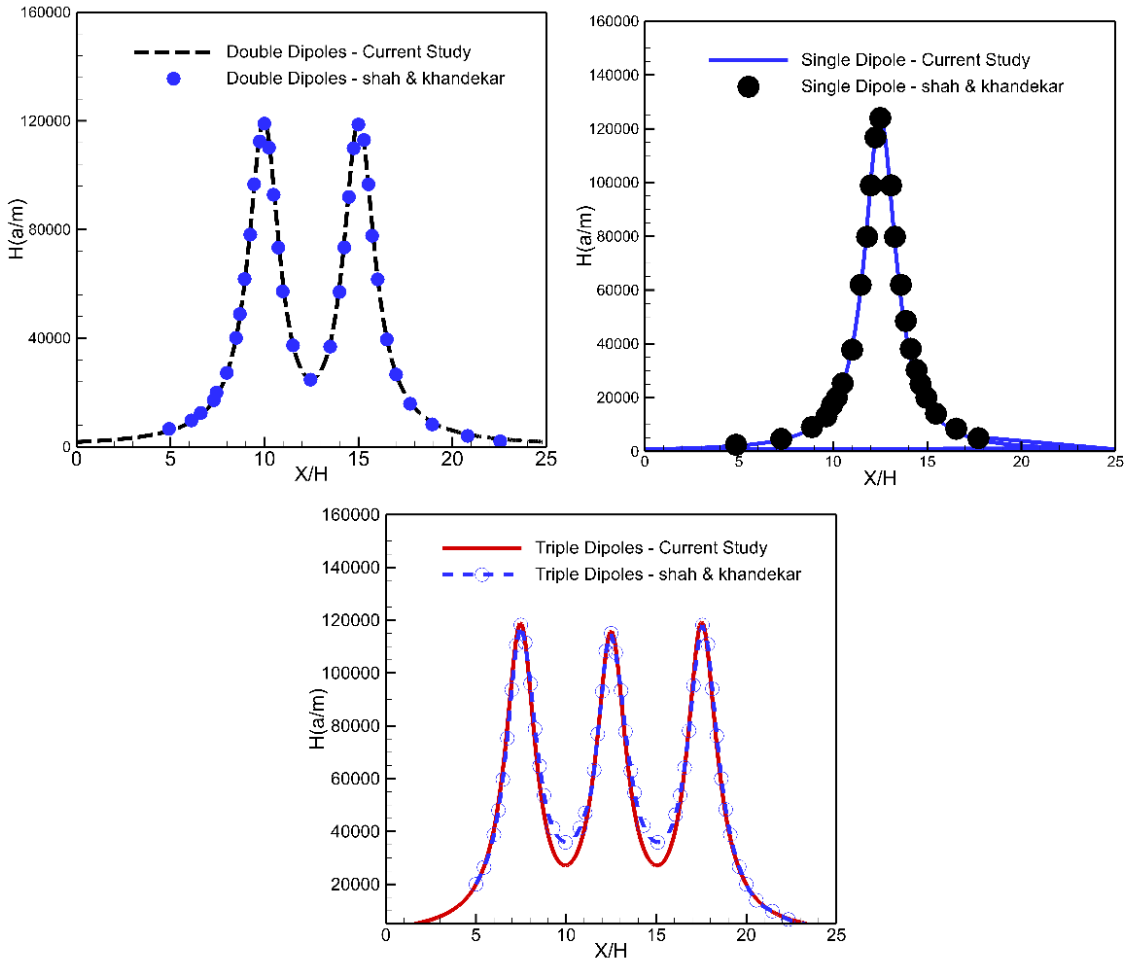
جدول ۶: اعتبارسنجی عدد ناسلت در خروجی کانال با نتایج گذشته [۴۰] (رینولدز = ۳۰، شار حرارتی = 10^4، فروسیال جاری = ای‌ام‌جی ۳۰۸)

درصد اختلاف	ناسلت متوسط در خروجی [۴۰]	ناسلت متوسط در خروجی (مطالعه حاضر)
٪۰،۱۲	۸،۲۳	۸،۲۴

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

در اعتبارسنجی دوم، شدت میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی‌ها با نتایجی که محققی در گذشته به‌دست آورده‌اند اعتبارسنجی شده است. در این بخش با استفاده از فروسیال ای‌ام‌جی ۸۰۵، عدد رینولدز ۲۵ و قرار دادن تک، دو و سه دوقطبی بر کانال تأثیر و تغییر شدت میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی‌ها با نتایج به دست آمده توسط شاه و خندکار [۱۹] اعتبارسنجی شده است. در شکل (۴) نتیجه اعتبارسنجی مطالعه اخیر با مطالعه شاه و خندکار [۱۹] مشاهده می‌شود.



شکل ۴: اعتبارسنجی شدت میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی‌های مغناطیسی با نتایج شاه و خندکار [۱۹]

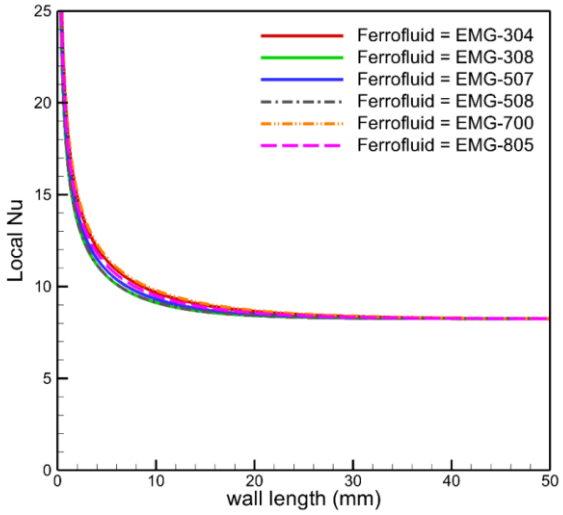
۶- نتایج و بحث

۶-۱- تغییر مشخصه‌های جریان با استفاده از فروسیال‌های مختلف

در این بخش اثر استفاده از فروسیال‌های مختلف نشان داده شده در جدول (۴)، مورد بحث قرارگرفته است. فروسیال‌های مختلف با خواص ترموفیزیکی مختلف با رژیم جریان آرام و عدد رینولدز ۲۵ به‌صورت تمام توسعه یافته وارد کانال می‌شوند و در این بخش تنها اثر استفاده از فروسیال‌های متفاوت بدون استفاده از میدان مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطابق جدول (۷) و شکل (۵)، طبق مطالعات محققین در گذشته و مطالعه اخیر، مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی نانوذرات، مقدار انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا می‌کند. طبق نتایج به‌دست آمده در بخش موردنظر، فروسیال ای‌ام‌جی ۷۰۰، به دلیل داشتن کسر حجمی نانوذره بیش‌تر نسبت دیگر فروسیالات استفاده شده، بیش‌ترین میزان افزایش عدد ناسلت و بیش‌ترین میزان افزایش افت فشار را دارد. مطابق با نتایج بخش حاضر، افزایش کسر حجمی نانوذرات به معنای افزایش تعداد ذرات در سیال است. همان‌گونه که در جدول (۳) نشان داده شده، نانوذرات اکسید آهن دارای چگالی بسیار بالاتری نسبت به سیال پایه

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

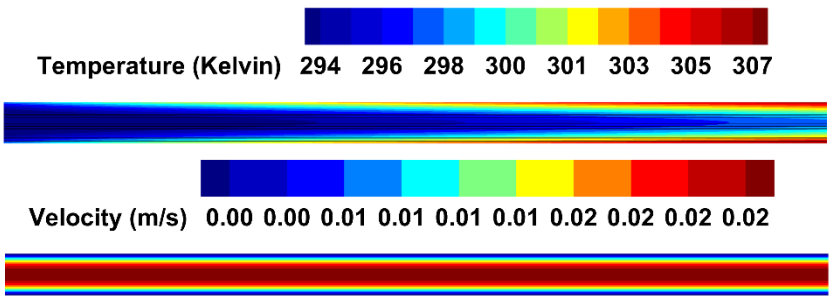
هستند. این افزایش چگالی منجر به افزایش چگالی کلی فروسیال و در نتیجه افزایش افت فشار در کانال مورد بررسی می‌شود. با این حال، افزایش کسر حجمی نانوذرات، از آن‌جاکه این ذرات دارای رسانایی حرارتی بیش‌تری نسبت به سیال پایه هستند، باعث بهبود ضریب هدایت حرارتی مؤثر فروسیال شده و در نهایت منجر به تقویت نرخ انتقال حرارت در سامانه می‌شود. طبق جدول (۷)، عدد ناسلت متوسط نسبت به کم‌ترین میزان عدد ناسلت متوسط که در فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸ مشاهده می‌شود، حدود ۴/۲۶٪ افزایش یافته است اما میزان افت فشار نسبت به حالت موردنظر حدود ۲۲۹٪ افزایش یافته است. شکل (۶)، کانتورهای تغییرات دما و سرعت بخش موردنظر را نشان می‌دهد که بدون اعمال میدان مغناطیسی ناشی دوقطبی مغناطیسی، لایه مرزی هیدرودینامیکی و حرارتی به حالت توسعه یافتگی رسیده‌اند.



شکل ۵: تغییرات عدد ناسلت محلی برای فروسیال‌های مختلف جاری در کانال (بدون میدان مغناطیسی)

جدول ۷: تغییرات عدد ناسلت متوسط، حداقل عدد ناسلت محلی و فشار ورودی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال-های مختلف (بدون میدان مغناطیسی)

فشار ورودی (Pa)	حداقل ناسلت محلی	ناسلت متوسط	فروسیال
۹،۲۵	۸،۲۵	۹،۵۲	ای‌ام‌جی ۳۰۴، بدون میدان مغناطیسی
۳،۵۳	۸،۲۴	۹،۱۹	ای‌ام‌جی ۳۰۸، بدون میدان مغناطیسی
۴،۸۲	۸،۲۴	۹،۳	ای‌ام‌جی ۵۰۷، بدون میدان مغناطیسی
۳،۵	۸،۲۴	۹،۲	ای‌ام‌جی ۵۰۸، بدون میدان مغناطیسی
۱۱،۶۲	۸،۲۵	۹،۵۹	ای‌ام‌جی ۷۰۰، بدون میدان مغناطیسی
۷،۰۸	۸،۲۴	۹،۴۱	ای‌ام‌جی ۸۰۵، بدون میدان مغناطیسی



شکل ۶:کانتور تغییرات دما و سرعت (بدون اثر میدان مغناطیسی)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

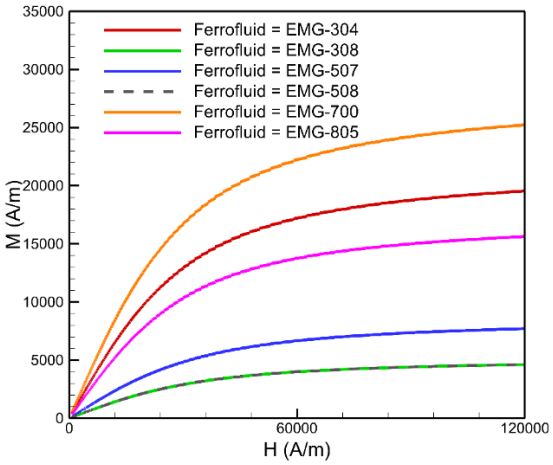
۲-۶- تغییر مشخصه‌های جریان با اعمال یک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین

با قرار دادن یک دوقطبی مغناطیسی با قدرت و محل مشخص بر دیوار پایین، شرایط جریان تماماً دچار تغییر می‌شود و مشخصه‌های جریان هم‌چون شرایط هیدرودینامیکی و حرارتی فروسیال جاری در کانال موردنظر، تماماً تغییر می‌کند. دوقطبی مغناطیسی مورد نظر در ۲۵ میلی‌متری نسبت به ورودی کانال و در فاصله عمودی ۱ میلی‌متری نسبت به دیوار پایین کانال قرارگرفته است. میدان مغناطیسی استفاده شده در این بخش دارای قدرت ۰/۵ آمپر در متر است و فروسیال‌های مختلف با کسر حجمی نانوذره متفاوت با رژیم جریان آرام و عدد رینولدز ۲۵ وارد کانال می‌شوند. فروسیال‌ها متناسب با درصد حجمی نانوذره محلول در سیال پایه، دارای خاصیت مغناطش اشباع متفاوتی می‌باشند. هرچه درصد حجمی نانوذرات درون فروسیال بیش‌تر باشد، مغناطش اشباع درون فروسیال افزایش پیدا می‌کند و فروسیال مورد نظر قابلیت مغناطش بیش‌تری را دارد. در شکل (۷)، مطابق با مطالعات گذشتگان [۱۹]، نشان‌دهنده تغییرات مغناطش فروسیال در دمای ۲۹۳ کلوین نسبت به میدان مغناطیسی است. با افزایش کسر حجمی نانوذره دارای خاصیت مغناطیسی درون سیال پایه، خاصیت مغناطیسی فروسیال افزایش پیدا می‌کند و هنگامی که در معرض میدان مغناطیسی غیریکنواخت قرارمی‌گیرد رفتار مغناطیسی بیش‌تری را نشان می‌دهد. با بررسی شکل (۸) مشاهده می‌شود که با برقرار کردن دوقطبی مغناطیسی، عدد ناسلت محلی تنها در بخشی که دوقطبی قرار داده شده است تغییر می‌کند. مطابق با روابط ریاضی (۱۵) تا (۱۹)، فروسیال نزدیک دیواره به دلیل نزدیک بودن آن به دیوار دارای شار حرارتی، دارای دمای بیش‌تر به نسبت فروسیال جاری در مرکز کانال است، طبق روابط (۱۶) و (۱۷) و واقعیت فیزیکی آهنربا، با افزایش دما، خاصیت مغناطیسی فروسیال کاهش پیدا می‌کند. به دلیل میدان برقرار شده حول کانال، فروسیال مرکز کانال به دلیل این‌که دارای دمای بسیار پایین‌تری است نسبت به فروسیال مجاور دیواره، خاصیت مغناطیسی بیش‌تری دارد و به سمت دیوار پایین و بالا کشیده می‌شود و این اتفاق موجب می‌شود که فروسیال داغ به سمت بالا پرتاب شود و مانند یک مانع در مقابل جریان عمل کند. این پرتاب شدن جریان به سمت بالا و کشیده شدن جریان سرد به سمت دیوار موجب پدید آمدن دو ناحیه مطلوب و غیر مطلوب از دیدگاه حرارتی می‌شود. مطابق شکل (۱۰) و نتایج محققین [۴۱] ,[۳۵] ,[۱۹]، ناحیه غیرمطلوب حرارتی، به‌دلیل جدایش فروسیال داغ از روی دیوار و وجود آمدن شرایط سکون مشاهده می‌شود و ناحیه مطلوب نیز به دلیل کشیده شدن جریان سرد مرکز کانال به سمت دیوار و چسبیده شدن جریان با دمای پایین به دیواره پدید می‌آید. هم‌چنین دلیل افزایش سرعت در مقطع‌هایی که دوقطبی‌ها اعمال شده‌اند، به‌دلیل این است که جریان در نزدیکی دیوار دارای چرخش است و طبق اصل معادله پیوستگی و پایستاری جرم و رابطه (۳)، فروسیال در این نواحی سرعت بیش‌تری به خود می‌گیرد تا معادله پیوستگی ارضا شود. مطابق شکل (۸)، نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار نانوذرات در سیال پایه، عدد ناسلت محلی، بر روی دیوار بالا و دیوار پایین افزایش پیدا می‌کند، بهترین شرایط از نظر انتقال حرارت محلی، برای فروسیال ای‌ام‌جی ۷۰۰، مشاهده می‌شود که دارای بیش‌ترین کسر حجمی نانوذرات است. مطابق با جدول (۸) مشاهده می‌شود فروسیال‌های ای‌ام‌جی ۷۰۰ و ۳۰۴ به دلیل دارا بودن کسرحجمی بیش‌تر نانوذرات اکسیدآهن، به‌ترتیب بیش‌ترین افت فشار و بیش‌تر افزایش عدد ناسلت را دارا هستند. افزایش نانوذرات بیش‌تر درون سیال پایه علاوه بر تقویت خواص مغناطیسی درون فروسیال باعث افزایش چگالی آن نیز می‌شود و علاوه بر این‌که فروسیال در معرض میدان مغناطیسی رفتار هیدرودینامیکی و حرارتی متفاوت‌تری را نمایش می‌دهد، افت فشار بیش‌تری را نیز نتیجه می‌دهد. جدول (۹)، به‌صورت کمی میزان تغییرات عدد ناسلت متوسط و افت فشار را برای فروسیال‌های استفاده شده در مطالعه حاضر در حالت با میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی را نشان داده است. مطابق با جدول (۹) بیش‌ترین تغییرات عدد ناسلت مختص به فروسیال ای‌ام‌جی ۸۰۵ است که حدود ۱۰/۰۹ درصد عدد ناسلت را بهبود داده است و بیش‌ترین افت فشار نیز فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۴ دارا است که میزان ۴۵/۵۱ درصد افت فشار را در مقایسه با حالت بدون میدان مغناطیسی افزایش داده است. شکل (۹)، نمودار ارزیابی حرارتی نسبت به افت فشار تحمیل شده درون کانال در معرض میدان مغناطیسی را نشان داده است. مطابق با شکل (۹)، هنگامی‌که فروسیالات در معرض یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، میزان نرخ انتقال حرارت در آن‌ها افزایش پیدا می‌کند اما میزان افزایش افت فشار به مقداری است که از لحاظ ارزیابی شرایط حرارتی نسبت به هیدرودینامیکی شرایط مساعدی ایجاد نمی‌شود و افزایش انتقال حرارت نسبت به افت

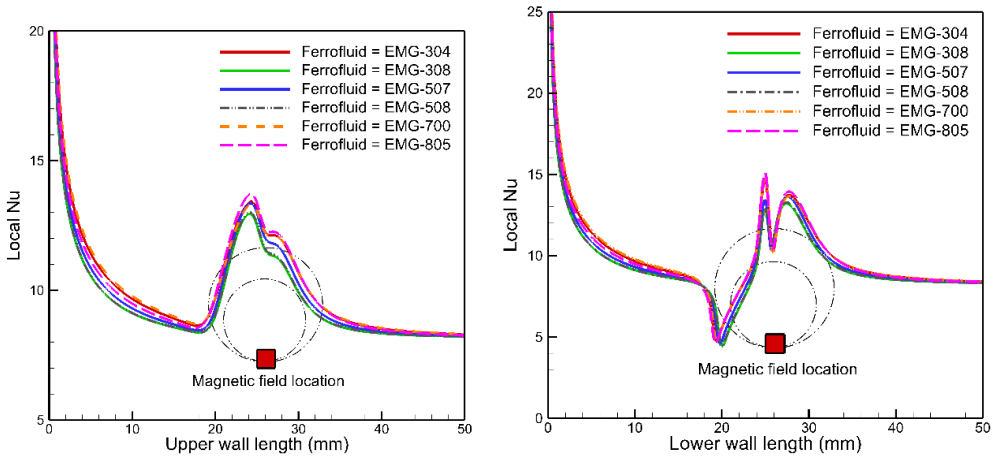
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

فشار تحمیلی درون کانال به صرفه نیست. شکل (۹) بیانگر آن است که فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸ در مقایسه با دیگر فروسیالات عملکرد بهتری را دارا است. شکل (۱۰) نیز کانتور تغییرات سرعت و دمای فروسیال درون کانال حاوی خنک‌کننده مایع را هنگامی که در معرض میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد را نشان داده است.



شکل ۷: نمودار تغییرات مغناطش بر حسب شدت میدان مغناطیسی متناسب با فروسیال‌های متفاوت



شکل ۸:مقایسه تغییر عدد ناسلت محلی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال‌های مختلف (عدد رینولدز = ۲۵)

جدول ۸: تغییرات عدد ناسلت متوسط، حداقل عدد ناسلت محلی و فشار ورودی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال‌های مختلف (اعمال یک میدان مغناطیسی)

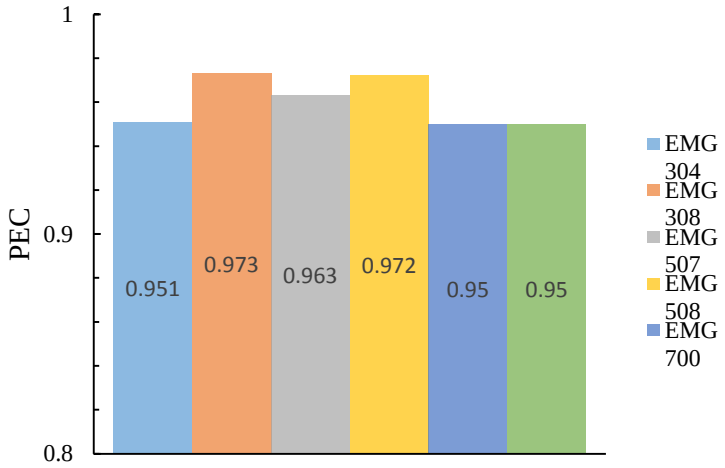
فشار ورودی(*Pa*)	حداقل ناسلت دیوار بالا	حداقل ناسلت دیوار پایین	ناسلت متوسط دیوار بالا	ناسلت متوسط دیوار پایین	فروسیال
۱۳،۴۶	۸،۲۸	۴،۶۹	۱۰،۴۲	۱۰،۱	ای‌ام‌جی ۳۰۴
۴،۶۱۷	۸،۲۲	۴،۴۲	۹،۹	۹،۶۷	ای‌ام‌جی ۳۰۸
۶،۶۸۳	۸،۲۴	۴،۵۴	۱۰،۱۲	۹،۸۶	ای‌ام‌جی ۵۰۷
۴،۶۰۴	۸،۲۲	۴،۴۳	۹،۹۲	۹،۶۸	ای‌ام‌جی ۵۰۸
۱۶،۹	۸،۳	۴،۷۵	۱۰،۴۷	۱۰،۲	ای‌ام‌جی ۷۰۰
۱۰،۴	۸،۲۶	۴،۶۱	۱۰،۳۶	۱۰	ای‌ام‌جی ۸۰۵

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

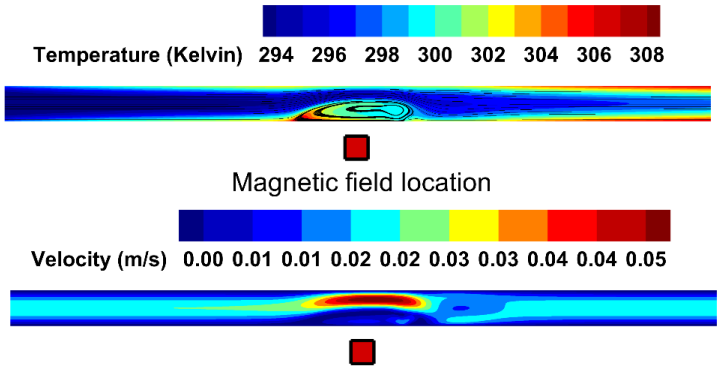
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

جدول ۹: مقایسه میزان تغییرات و اختلاف عدد ناسلت متوسط و افت فشار با حالت‌های پایه (بدون میدان مغناطیسی)

فروسیال	ناسلت متوسط بدون مغناطیس	ناسلت متوسط با مغناطیس	میزان اختلاف ٪	فشار ورودی بدون مغناطیس *(Pa)*	فشار ورودی با مغناطیس *(Pa)*	میزان اختلاف ٪
ای‌ام‌جی ۳۰۴	۹،۵۲	۱۰/۲۶	۷/۷۷	۹،۲۵	۱۳،۴۶	۴۵/۵۱
ای‌ام‌جی ۳۰۸	۹،۱۹	۹/۷۸۵	۶/۴۷	۳،۵۳	۴،۶۱۷	۳۰/۷۹
ای‌ام‌جی ۵۰۷	۹،۳	۹/۹۹	۷/۴۱	۴،۸۲	۶،۶۸۳	۳۸/۶۵
ای‌ام‌جی ۵۰۸	۹،۲	۹/۸	۶/۵۲	۳،۵	۴،۶۰۴	۳۱/۵۴
ای‌ام‌جی ۷۰۰	۹،۵۹	۱۰/۳۳۵	۷/۷۶	۱۱،۶۲	۱۶،۹	۴۵/۴۳
ای‌ام‌جی ۸۰۵	۹،۴۱	۱۰/۱۸	۸/۱۸	۷،۰۸	۱۰،۴	۴۶/۸۹



شکل ۹: ارزیابی عملکرد حرارتی نسبت به هیدرودینامیکی



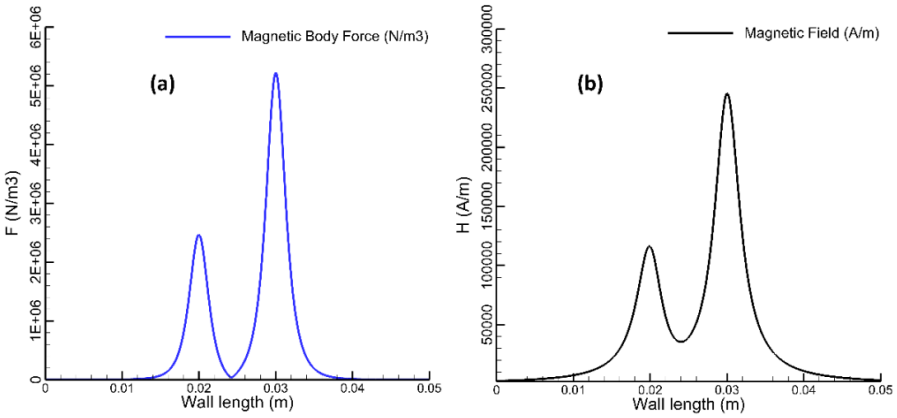
شکل ۱۰: کانتور تغییرات دما و سرعت (یک دوقطبی مغناطیسی)

۳-۶- تغییر مشخصه‌های جریان با استفاده از دو میدان مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت

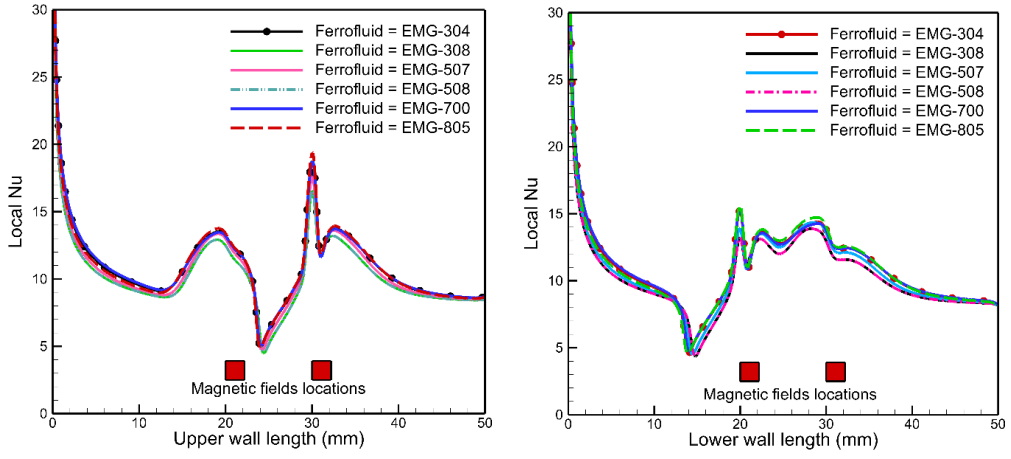
در این بخش اثر استفاده از دو میدان مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت بر مشخصه‌های جریان و انتقال حرارت بررسی شده است. فروسیال‌ها در کانال با رژیم جریان آرام و عدد رینولدز ۲۵ در کانال جریان دارند. میدان مغناطیسی اول با قدرت ۰/۵ آمپر در متر در فاصله طولی ۲۰ میلی‌متری از ورودی کانال و فاصله عمودی ۱ میلی‌متری نسبت به دیوار پایین قرار دارد و دو قطبی دوم با قدرت ۱ آمپر در متر در فاصله طولی ۳۰ میلی‌متری از ورودی کانال و فاصله عمودی ۱ میلی‌متری نسبت به دیوار بالا قرار

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

دارد. با تغییر قدرت میدان مغناطیسی تولید شده توسط دوقطبی‌ها، شدت میدان مغناطیسی و نیروی میدان مغناطیسی تغییر پیدا می‌کند. شکل (۱۱)، محل میدان مغناطیسی و نحوه توزیع شدت میدان مغناطیسی و نیروی حجمی برقرار شده در جریان را برای فروسیال ای‌امجی ۸۰۵ نمایش می‌دهد. شکل (۱۲) و جدول (۱۰)، به‌ترتیب تغییرات ناسلت محلی، متوسط، حداقل و فشار ورودی را نشان می‌دهند. مطابق با انتظار با افزایش کسر حجمی نانوذرات، شرایط خنک‌کاری بهبود پیدا می‌کند و بهترین فروسیال در بخش حرارتی، فروسیال ای‌امجی ۷۰۰ است که بیش‌ترین میزان خاصیت مغناطیسی را به‌دلیل دارا بودن بیش‌ترین کسرحجمی نانوذرات را دارد و بهترین فروسیال در بخش هیدرودینامیکی نیز، فروسیال ای‌امجی ۳۰۸ است که کم‌ترین میزان کسرحجمی نانوذرات را دارد و افت فشار کم‌تری را به سیستم تحمیل می‌کند. جدول (۱۱)، میزان تغییرات عدد ناسلت و افت فشار را در بین استفاده از ۲ میدان مغناطیسی و بدون میدان مغناطیسی نشان داده است. مطابق با نتایج جدول (۱۱) و شکل (۱۳)، ارزیابی حرارتی نسبت به افت فشار تحمیل شده، نشان می‌دهد که افزایش کسر نانوذرات دارای خاصیت مغناطیسی به دلیل ایجاد گردابه شدیدتر درون میدان جریان فروسیال، موجب افزایش و بهبود خنک‌کاری می‌شود اما میزان افت فشار وارد بر سیستم و هم‌چنین توان پمپ موردنیاز کانال را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و نتایج به‌دست آمده به‌صرفه نیست. برای فروسیال‌های ای‌امجی ۸۰۵، ای‌امجی ۳۰۸ و ای‌امجی ۵۰۸، ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که خنک‌کاری نسبت به افت فشار تحمیل شده به سیستم ارزشمند و قابل‌قبول است. در بین سه فروسیال بیان شده، مطابق با جدول (۱۱)، فروسیال ای‌امجی ۸۰۵، از دیدگاه حرارتی و خنک‌کاری شرایط بهتری نسبت به ۲ فروسیال دیگر به‌وجود می‌آورد و مطابق با این‌که ارزیابی هر سه فروسیال تقریباً یکسان است، می‌توان فروسیال ای‌امجی ۸۰۵ را به‌عنوان فروسیال بهینه برگزید. در شکل (۱۴)، کانتورهای تغییرات دما و سرعت، زمانی که از دو میدان مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت استفاده می‌شود، نمایش داده شده است.



شکل ۱۱: (a) شدت میدان مغناطیسی دوقطبی‌ها، (b) نیروی حجمی تولید شده توسط دوقطبی‌ها (فروسیال جاری ای‌امجی ۸۰۵، رینولدز = ۲۰)



شکل ۱۲: مقایسه تغییر عدد ناسلت محلی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال‌های مختلف (عدد رینولدز = ۲۵)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

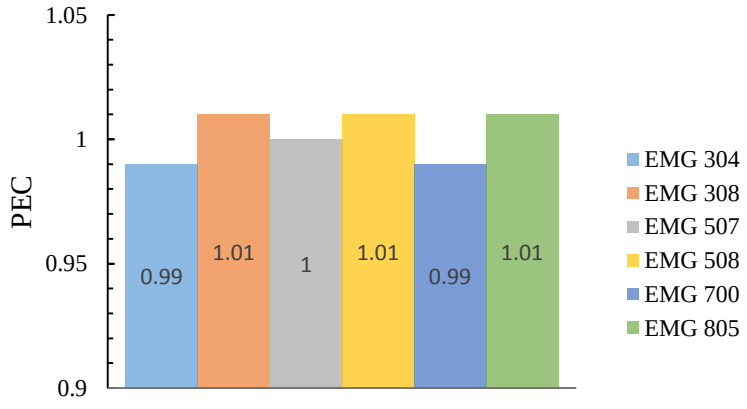
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

جدول ۱۰: تغییرات عدد ناسلت متوسط، حداقل عدد ناسلت محلی و فشار ورودی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال-های مختلف (اعمال دو میدان مغناطیسی)

فروسیال	ناسلت متوسط دیوار پایین	ناسلت متوسط دیوار بالا	حداقل ناسلت دیوار پایین	حداقل ناسلت دیوار بالا	فشار ورودی (*Pa*)
ای‌ام‌جی ۳۰۴	۱۱،۰۷	۱۱،۱	۴،۶۳	۴،۹۲	۱۴،۷۷
ای‌ام‌جی ۳۰۸	۱۰،۴۴	۱۰،۴۱	۴،۳۴	۴،۴۶	۴،۹۸۹
ای‌ام‌جی ۵۰۷	۱۰،۷۴	۱۰،۷۲	۴،۴۶	۴،۶۷	۷،۳۹
ای‌ام‌جی ۵۰۸	۱۰،۵۲	۱۰،۴۶	۴،۴۱	۴،۵۲	۴،۹۶
ای‌ام‌جی ۷۰۰	۱۱،۱۲	۱۱،۱۵	۴،۶۹	۴،۹۸	۱۸،۵۷
ای‌ام‌جی ۸۰۵	۱۱،۰۵	۱۱،۰۷	۴،۵۳	۴،۸۵	۱۱،۳۲

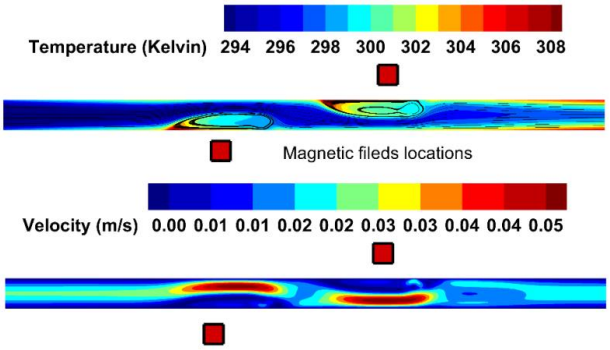
جدول ۱۱: مقایسه میزان تغییرات و اختلاف عدد ناسلت متوسط و افت فشار با حالت‌های پایه (بدون میدان مغناطیسی)

فروسیال	ناسلت متوسط بدون مغناطیس	ناسلت متوسط با مغناطیس	میزان اختلاف ٪	فشار ورودی بدون مغناطیس (*Pa*)	فشار ورودی با مغناطیس (*Pa*)	میزان اختلاف ٪
ای‌ام‌جی ۳۰۴	۹،۵۲	۱۱/۰۸۵	۱۶/۴۳	۹،۲۵	۱۴/۷۷	۵۹/۶۷
ای‌ام‌جی ۳۰۸	۹،۱۹	۱۰/۴۲۵	۱۳/۴۳	۳،۵۳	۴/۹۸۹	۴۱/۳۳
ای‌ام‌جی ۵۰۷	۹،۳	۱۰/۷۳	۱۵/۳۷	۴،۸۲	۷/۳۹	۵۳/۳۱
ای‌ام‌جی ۵۰۸	۹،۲	۱۰/۴۹	۱۴/۰۲	۳،۵	۴/۹۶	۴۱/۷۱
ای‌ام‌جی ۷۰۰	۹،۵۹	۱۱/۱۳۵	۱۶/۱۱	۱۱،۶۲	۱۸/۵۷	۵۹/۸۱
ای‌ام‌جی ۸۰۵	۹،۴۱	۱۱/۰۶	۱۷/۵۳	۷،۰۸	۱۱/۳۲	۵۹/۸۸



شکل ۱۳: ارزیابی عملکرد حرارتی نسبت به هیدرودینامیکی

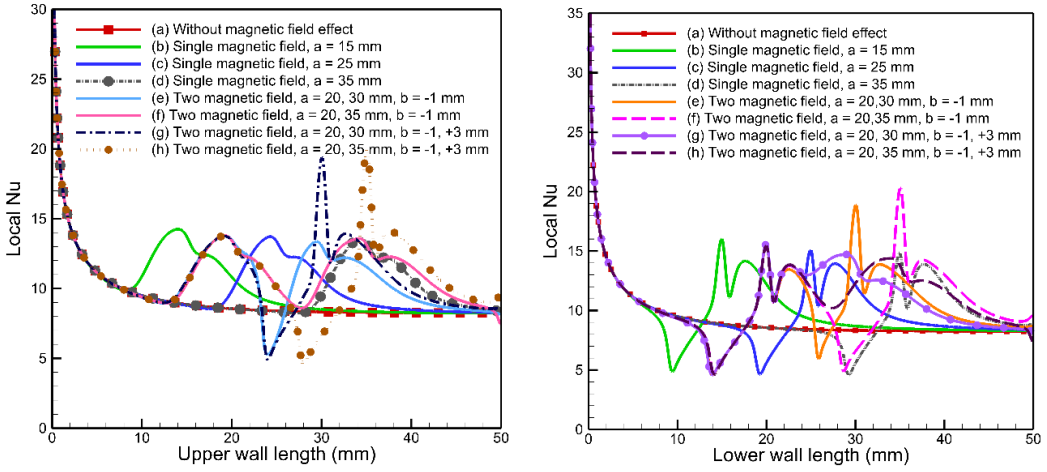
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]



شکل ۱۴:کانتور تغییرات دما و سرعت (دو دوقطبی مغناطیسی غیریکنواخت)

۴-۶- اثر تغییر مکان دوقطبی‌های مغناطیسی بر شرایط حرارتی و هیدرودینامیکی جریان

در این بخش، اثر تغییر مکان تک دوقطبی و هم‌چنین اثر تغییر مکان دو دوقطبی بر دیوارهای بالا و پایین کانال بررسی شده است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده از شکل (۱۵) و جدول (۱۲)، پیشروی تک میدان مغناطیسی در طول کانال و دور شدن از ورودی، منجر به کاهش فشار ورودی سیستم می‌شود. این روند برای حالتی که از دو دوقطبی مغناطیسی استفاده شده و مکان آن‌ها تغییر داده می‌شود نیز مشاهده شده است. هنگامی که میدان مغناطیسی نزدیک‌تر است به ورودی کانال، ناحیه چرخشی ناشی از میدان مغناطیسی در نزدیکی ورودی ایجاد می‌شود و جریان فروسیال باید با شدت بیش‌تری وارد کانال شود و باعث افزایش چشم‌گیر افت فشار می‌شود، هم‌چنین ایجاد فاصله بین دو میدان مغناطیسی باعث کاهش شدت جریان‌های چرخشی ایجاد شده توسط میدان مغناطیسی می‌شود، هنگامی‌که دو میدان مغناطیسی نزدیک به یکدیگر هستند جریان‌های چرخشی ایجاد شده یکدیگر را تقویت می‌کنند و باعث می‌شود تا افت فشار بیش‌تری به سامانه تحمیل گردد. مطابق با نتایج جدول (۱۳) و شکل (۱۶)، بیش‌ترین افزایش خنک‌کاری برای حالت (f) رخ می‌دهد که هر دو دوقطبی بر روی دیوار پایین قرار گرفته‌اند و در این حالت، عدد ناسلت متوسط نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی حدود ۲۰٪ افزایش یافته است. شکل (۱۶) میزان بهبود خنک‌کاری سیستم نسبت به افت فشار را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در حالت استفاده از تک دوقطبی مغناطیسی، حالت (d) بهینه‌ترین حالت است و در حالت استفاده از دو دوقطبی، حالت (f) بهینه‌ترین شرایط را دارد. در این شرایط، خنک‌کاری ایجاد شده نسبت به افت فشار تحمیلی بر سیستم به‌صرفه و منطقی است و نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی، عدد ناسلت متوسط حدود ۲۰٪ افزایش و فشار ورودی کانال حدود ۱٪ افزایش یافته است. شکل (۱۷) نیز کانتورهای تغییرات دما و سرعت برای این محاسبات و بررسی‌ها را به تصویر می‌کشد.



شکل ۱۵: مقایسه تغییر عدد ناسلت محلی بر دیوارهای بالا و پایین برای فروسیال‌های مختلف (عدد رینولدز = ۲۵)

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

جدول ۱۲: تغییرات عدد ناسلت متوسط، حداقل عدد ناسلت محلی و فشار ورودی بر دیوارهای بالا و پایین

حالت	مشخصات	ناسلت متوسط دیوار پایین	ناسلت متوسط دیوار بالا	حداقل ناسلت دیوار پایین	حداقل ناسلت دیوار بالا	فشار ورودی (Pa)
(a)	بدون میدان مغناطیسی	۹،۴۱	۹،۴۱	۸،۲۴	۸،۲۴	۷،۰۸۸
(b)	تک میدان مغناطیسی $a = ۱۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰،۰۴	۱۰،۳۴	۴،۸۴	۸،۲۳	۱۱،۳۸
(c)	تک میدان مغناطیسی $a = ۲۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰،۰۹	۱۰،۳۶	۴،۶۱	۸،۲۶	۱۰،۴۱
(d)	تک میدان مغناطیسی $a = ۳۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰،۰۶	۱۰،۳۴	۴،۵۵	۸،۲۳	۹،۲۱
(e)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۰\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰،۷۹	۱۰،۸۹	۴،۵۴	۵،۲۶	۱۰،۲۱
(f)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰،۹۲	۱۱،۳۳	۴،۶	۷،۴۱	۷،۱۴
(g)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۰\,mm$ $b = -۱\,mm,\ ۳mm$	۱۱،۰۵	۱۱،۰۷	۴،۵۳	۴،۸۵	۱۱،۳۲
(h)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۵\,mm$ $b = -۱\,mm,\ ۳mm$	۱۱،۲۲	۱۱،۱۸	۴،۶	۴،۵۱	۷،۵۶۹

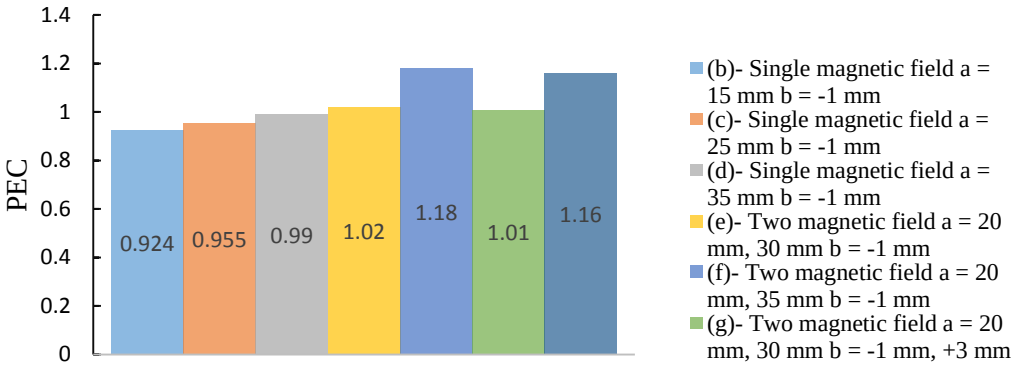
جدول ۱۳:مقایسه میزان تغییرات و اختلاف عدد ناسلت متوسط و افت فشار با حالت‌های پایه (بدون میدان مغناطیسی)

حالت	مشخصات	ناسلت متوسط	میزان اختلاف نسبت به حالت بدون مغناطیس ٪	فشار ورودی بدون مغناطیس (Pa)	میزان اختلاف نسبت به حالت بدون مغناطیس ٪
(a)	بدون میدان مغناطیسی	۹/۴۱	-	۷/۰۸۸	-
(b)	تک میدان مغناطیسی $a = ۱۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰/۱۹	۸/۲۸	۱۱/۳۸	۶۰/۵۵
(c)	تک میدان مغناطیسی $a = ۲۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰/۲۲۵	۸/۶۶	۱۰/۴۱	۴۶/۸۶
(d)	تک میدان مغناطیسی $a = ۳۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰/۲	۸/۳۹	۹/۲۱	۲۹/۹۳
(e)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۰\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۰/۸۴	۱۵/۱۹	۱۰/۲۱	۴۴/۰۴
(f)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۵\,mm$ $b = -۱\,mm$	۱۱/۱۲۵	۱۸/۲۲	۷/۱۴	۰/۷۳
(g)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\,mm,\ ۳۰\,mm$ $b = -۱\,mm,\ ۳mm$	۱۱/۰۶	۱۷/۵۳	۱۱/۳۲	۵۹/۷۰

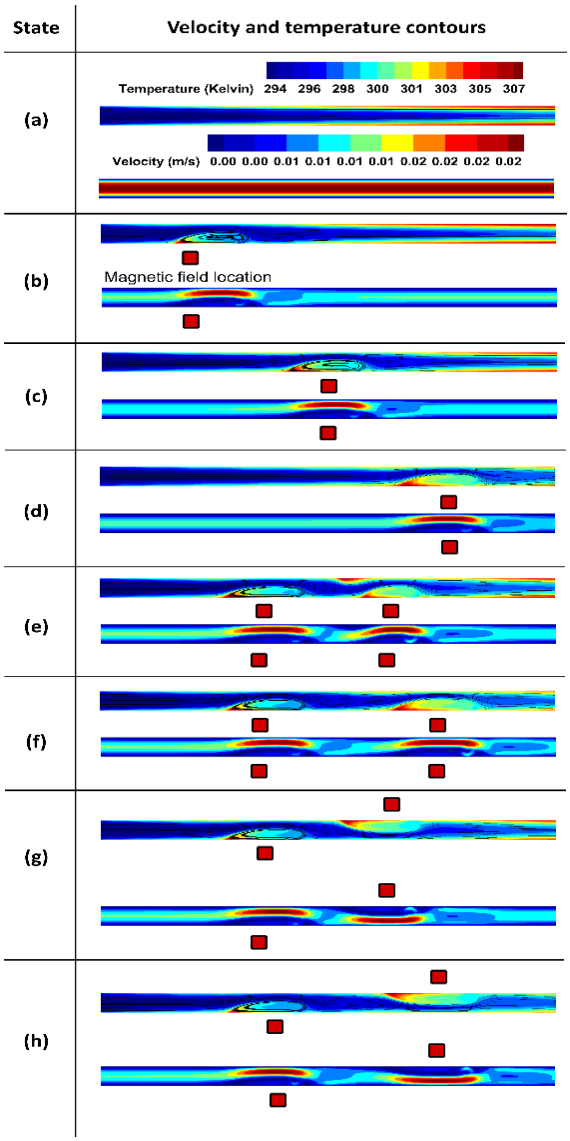
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

(h)	۲ میدان مغناطیسی $a = ۲۰\ mm,\ ۳۵\ mm$ $b = -۱\ mm,\ ۳\ mm$	۱۱/۲	۱۹/۰۲	۷/۵۶۹	۶/۷۸



شکل ۱۶: ارزیابی عملکرد حرارتی نسبت به هیدرودینامیکی



شکل ۱۷:کانتور تغییرات دما و سرعت با تغییر تعداد و محل دوقطبی‌های مغناطیسی

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

۵- جمع‌بندی

۱- بدون اعمال میدان مغناطیسی، فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸، کم‌ترین نرخ انتقال حرارت و کم‌ترین فشار ورودی و فروسیال ای‌ام‌جی ۷۰۰، بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت و بیش‌ترین فشار ورودی را در نتیجه دارد.

۲- با اعمال تک دوقطبی مغناطیسی بر دیوار پایین، فروسیال ای‌ام‌جی ۸۰۵، بیش‌ترین افزایش عدد ناسلت متوسط حدود ۱۰٪ و فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸، کم‌ترین افزایش فشار ورودی حدود ۳۰٪ نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی را نتیجه می‌شوند.

۳- با اعمال دو دوقطبی مغناطیسی با قدرت‌های متفاوت بر دیوار پایین و بالا، فروسیال ای‌ام‌جی ۸۰۵، بیش‌ترین افزایش عدد ناسلت متوسط حدود ۱۸٪ و فروسیال ای‌ام‌جی ۳۰۸، کم‌ترین افزایش فشار ورودی حدود ۴۱٪ نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی را نتیجه می‌شوند.

۴- با جابه‌جایی و تغییر مکان دوقطبی و دوقطبی‌ها برای فروسیال ای‌ام‌جی ۸۰۵، بهترین شرایط در حالتی که دو دوقطبی بر دیوار پایین و در فاصله طولی ۲۰ و ۳۵ میلی‌متر باشند نتیجه می‌شود که عدد ناسلت متوسط و فشار ورودی به‌ترتیب حدود ۲۰٪ و ۱٪ نسبت به حالت بدون میدان مغناطیسی افزایش پیدا می‌کنند.

فهرست علائم

توضیح	علائم انگلیسی	توضیح	علائم انگلیسی
مختصات میدان مغناطیسی غیریکنواخت (m)	a, b	فشار (Pa)	P
شار مغناطیسی (T)	B	عدد ناسلت	Nu
گرمای ویژه $\left(\frac{kJ}{kg\ K}\right)$	C_p	شار حرارتی $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	$q"$
قطر هیدرولیکی کانال دوبعدی (m)	D_h	عدد رینولدز	Re
بردارهای یکه	e_r, e_θ	مختصات قطبی	r, θ
شدت میدان مغناطیسی غیریکنواخت $\left(\frac{A}{m}\right)$	H	معادلات نیرویی $\left(\frac{N}{m^3}\right)$	S_x, S_y
مؤلفه‌های هندسی در شکل یک (m)	H_1, H_2, H_3	بردارهای سرعت $\left(\frac{m}{s}\right)$	u, v
ضریب انتقال حرارت $\left(\frac{W}{m^2\ K}\right)$	h	دما (C, K)	T
هدایت حرارتی $\left(\frac{W}{m\ K}\right)$	k	**توضیح**	**علائم یونانی**
ثابت بولتزمن $\left(\frac{J}{K}\right)$	K_B	چگالی $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	ρ
مؤلفه‌های هندسی در شکل یک (m)	L_1, L_2, L_3	ویسکوزیته دینامیکی $(Pa.s)$	μ
مغناطش میدان مغناطیسی غیریکنواخت $\left(\frac{A}{m}\right)$	M	نفوذپذیری در خلأ $\left(\frac{N}{A^2}\right)$	μ_0
شدت دوقطبی مغناطیسی $(A-m)$	m	مؤلفه لانژوین	α

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

منابع

[1] H. Moghadasi, M. Bayat, E. Aminian, J. H. Hattel, and M. Bodaghi, A Computational Fluid Dynamics Study of Laminar Forced Convection Improvement of a Non-Newtonian Hybrid Nanofluid within an Annular Pipe in Porous Media, Energies, 15(21) (2022), 8207. doi: 10.3390/en15218207.

[2] N. Shahini, M. Karami, M. A. Akhavan- Behabadi, CFD modeling of a triple- walled direct absorption evacuated tube solar collector based on hybrid nanofluid/microencapsulated PCM, Energy Science & Engineering, 12(5) (2024), 2297–2318. doi: 10.1002/ese3.1741.

[3] R. K. Shah, J. K. Drave, S. Khandekar, Thermal Transport in Laminar Convective Flow of Ferrofluids in the Presence of External Magnetic Field, Journal of Heat Transfer, 143(6) (2021), 062101. doi: 10.1115/1.4050411.

[4] "EMG Water-based Series - Ferrofluid. Accessed: (2024). [Online]. Available: https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid-emg/water/

[5] H.-R. Bahrami, M. Ghaedi, Enhancement of thermal energy transfer behind a double consecutive expansion utilizing a variable magnetic field, Sci Rep, 14(1) (2024), 10236.
doi: 10.1038/s41598-024-60953-3.

[6] M. Hormozi Moghaddam, M. Karami, Heat transfer and pressure drop through mono and hybrid nanofluid- based photovoltaic- thermal systems, Energy Science & Engineering, 10(3) (2022), 918–931. doi: 10.1002/ese3.1073.

[7] M. Ramezanpour, M. Siavashi, H. Khoshtarash, M. J. Blunt, Transport and deposition of nanoparticles in porous media at the pore scale using an Eulerian-Lagrangian method, Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 161 (2024), 105536. doi: 10.1016/j.jtice.2024.105536.

[8] S. |Mashafi, M. Esmaeili, Effect of Magnetic Field on Motion, Deformation, and Separation Time of Newtonian and Non-Newtonian Droplets in a Flow- Focusing Microchannel, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, 53(11) (2022), 5311–5330.
doi: 10.22060/mej.2021.19257.6989.

[9] P. Salimi, S. S. Jahani, and H. and pourmirzaagha, Two-dimensional Simulation of non-Newtonian Fluid Flow with Thixotropic Model in Hydromagnetic Micro Pump, Journal of Energy Conversion, 11(1) (2024), [Online]. Available: http://jeed.dezful.iau.ir/article-1-478-fa.html

[10] M. Nemati, M. Sefid, A. R. Rahmati, The effect of changing the position of the hot wall and increasing the amplitude and number of oscillations of wavy wall on the flow and heat transfer of nanofluid inside the channel in the presence of magnetic field, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 10(2) (2020), 219–236. doi: 10.22044/jsfm.2020.8917.3022.

[11] I. Jelodari and M. and EsmaeiliSikaroodi, Effect of Omnidirectional Magnetic Field on Thermal Performance of Quarter-Circle Cavity Containing Saline Water–AL_2O_3 Magnetic Nanofluid, Journal of Energy Conversion, 8(3) (2021), [Online]. Available: http://jeed.dezful.iau.ir/article-1-370-fa.html

[۱۲] نعمتی محمد، سفید محمد. تحلیل تأثیر تغییر موقعیت دیواره گرم و افزایش تعداد دیواره سرد و غیرصاف بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال دو بعدی در حضور میدان مغناطیسی. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۳۹۹; ۷ (۲) :۹-۱۵

[۱۳] نعمتی محمد، رحمتی احمدرضا. اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره غیر صاف به روش شبکه بولتزمن. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۳۹۷; ۵ (۲) :۵۴-۴۷

[۱۴] یوری محمد، قلم باز محمد. بررسی تاثیر زاویه نیروی مغناطیسی بر انتقال حرارت درون یک محفظه پرشده از نانوسیال. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۳۹۷; ۵ (۴) :۵۰-۴۱

[15] M. A. Bazrafkan, P. Pournaderi, Study of leaky dielectric droplet behavior under an electric field: effect of viscosity and electric conductivity ratios, Journal of Energy Conversion, 7(2) (2020), [Online]. Available: http://jeed.dezful.iau.ir/article-1-324-fa.html

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

[16] A. Molaei, A. R. Rahmati, Improvemet Mixed convection heat transfer of liquid metal in a single channel heat sink under uniform external magnetic field, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 14(2) (2024), 77–94. doi: 10.22044/jsfm.2024.13969.3820.
[17] A. R. Rahmati, A. Molaei, Numerical simulation of forced heat transfer of liquid metals in a microchannel heat sink under a magnetic field, Journal of Solid and Fluid Mechanics, 13(6) (2024), 121–137. doi: 10.22044/jsfm.2024.13454.3773.
[18] P. A. Petrini, D. R. Lester, G. Rosengarten, Enhanced laminar heat transfer via magnetically driven ferrofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 217 (2023), 124703. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124703.
[19] R. K. Shah, S. Khandekar, Exploring ferrofluids for heat transfer augmentation, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 475 (2019), 389–400. doi: 10.1016/j.jmmm.2018.11.034.
[20] M. Ghoharkhah, B. Alizadeh, Magnetic field effects on heat transfer enhancement in an enclosure in microgravity conditions, Journal of Space Science and Technology, 13(4) (2020), 59–69.
doi: 10.30699/jsst.2021.1235.
[21] M. J. Pour Razzaghi, M. Asadollahzadeh, M. R. Tajbakhsh, R. Mohammadzadeh, M. Zare Malek Abad, E. Nadimi, Investigation of a temperature-sensitive ferrofluid to predict heat transfer and irreversibilities in LS-3 solar collector under line dipole magnetic field and a rotary twisted tape, International Journal of Thermal Sciences, 185 (2023), 108104.
doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2022.108104.
[22] S. Li, L. Mao, A. Alizadeh, X. Zhang, S. V. Mousavi, The application of non-uniform magnetic field for thermal enhancement of the nanofluid flow inside the U-turn pipe at solar collectors, Sci Rep, 13(1) (2023), 8471. doi: 10.1038/s41598-023-35659-7.
[23] M. Bilal, I. Ullah, M. M. Alam, S. I. Shah, S. M. Eldin, Energy transfer in Carreau Yasuda liquid influenced by engine oil with Magnetic dipole using tri-hybrid nanoparticles, Sci Rep, 13(1) (2023), 5432. doi: 10.1038/s41598-023-32052-2.
[24] Md. Oliullah, M. G. Murtaza, J. Alam, Theoretical analysis of blood based ternary hybrid nanofluid under the influence of magnetic dipole with variable fluid properties, Multiscale and Multidiscip. Model. Exp. and Des., 7(4) (2024), 3783–3797. doi: 10.1007/s41939-024-00436-0.
[25] Y. Elmhedy, A. M. Abd-Alla, S. M. Abo-Dahab, F. M. Alharbi, M. A. Abdelhafez, Influence of inclined magnetic field and heat transfer on the peristaltic flow of Rabinowitsch fluid model in an inclined channel, Sci Rep, 14(1) (2024), 4735. doi: 10.1038/s41598-024-54396-z.
[26] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, Effect of magnetic field on the hydrodynamic and heat transfer of magnetite ferrofluid flow in a porous fin heat sink, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 476 (2019), 506–515. doi: 10.1016/j.jmmm.2019.01.028.
[27] M. Ferdows, J. Alam, M. G. Murtaza, E. E. Tzirtzilakis, Biomagnetic flow and radiative heat transfer along an inclined stretched cylinder with magnetic particles and heat source/sink under the influence of magnetic dipole, In Review, preprint, (2023). doi: 10.21203/rs.3.rs-2526283/v1.
[28] H.-R. Bahrami, M. Ghaedi, Using a non-uniform magnetic field to enhance heat transfer before a sudden compression in a 2D milli-channel, J Enh Heat Transf, (2023).
doi: 10.1615/JEnhHeatTransf.2023050891.
[29] S. Ahmad et al., Localized magnetic fields and their effects on heat transfer enhancement and vortices generation in tri-hybrid nanofluids: A novel investigation, Case Studies in Thermal Engineering, 50 (2023), 103408. doi: 10.1016/j.csite.2023.103408.
[30] B. Ayadi et al., Investigation of natural convection heat transfer in various structures of a partitioned triple porous enclosure under permanent magnetic field, Case Studies in Thermal Engineering, 60 (2024), 104579. doi: 10.1016/j.csite.2024.104579.
[31] T. Strek, H. Jopek, Computer simulation of heat transfer through a ferrofluid, phys. stat. sol. (b), 244(3) (2007), 1027–1037. doi: 10.1002/pssb.200572720.
[32] M. Goharkhah, M. Ashjaee, Effect of an alternating nonuniform magnetic field on ferrofluid flow and heat transfer in a channel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 362 (2014), 80–89. doi: 10.1016/j.jmmm.2014.03.025.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

[33] M. Goharkhah, M. Esmaeili, M. Ashjaee, Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field, 11 (2) (2018).
[34] R. E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics, Dover edition. Mineola, New York: Dover Publications, Inc, 2014.
[35] M. Bahiraei, M. Hangi, Investigating the Effect of Line Dipole Magnetic Field on Hydrothermal Characteristics of a Temperature-Sensitive Magnetic Nanofluid Using Two-Phase Simulation, Nanoscale Res Lett, 11(1) (2016), 443. doi: 10.1186/s11671-016-1661-9.
[36] M. Gürdal, H. K. Pazarlıoğlu, M. Tekir, K. Arslan, E. Gedik, Numerical investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics of ferro-nanofluid flowing in dimpled tube under magnetic field effect, Applied Thermal Engineering, 200 (2022), 117655.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117655.
[37] R. Ganguly, S. Sen, I. K. Puri, Heat transfer augmentation using a magnetic fluid under the influence of a line dipole, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 271(1) (2004), 63–73. doi: 10.1016/j.jmmm.2003.09.015.
[38] P. S. T. P. U. and C. Technologies, ANSYS Workbench 2021 R1: A Tutorial Approach, 4th Edition. CADCIM Technologies, (2021).
[39] R. K. Shah, J. P. Hartnett, A. L. London, Laminar Flow Forced Convection in Ducts: A Source Book for Compact Heat Exchanger Analytical Data. Academic Press, (2014).
[40] W. M. Kays, M. E. Crawford, B. Weigand, Convective Heat and Mass Transfer. Boston: Mcgraw-Hill, (2004).
[41] M. Bezaatpour, M. Goharkhah, A magnetic vortex generator for simultaneous heat transfer enhancement and pressure drop reduction in a mini channel, Heat Transfer, 49(3) (2020), 1192–1213. doi: 10.1002/htj.21658.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]

Numerical investigation of the effect of using different ferrofluids under the effect of magnetic dipoles with different strengths on heat transfer and pressure drop in a two-dimensional channel

Mahziyar Ghaedi[1], Hamid-Reza Bahrami[*2]

[1] MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran ghaedi.m@qut.ac.ir
[2] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran P.O.B 37195-1519, Qom, Iran. taleshbahrami@qut.ac.ir

Received: Winter 2025 Accepted: Spring 2025

Abstract

In the present study, using finite volume-based software, the effect of employing two dipoles with different strengths and commercially manufactured ferrofluids was modeled. The ferrofluids, with varying nanoparticle volume fractions and magnetic properties, flow through a channel. By applying a non-uniform magnetic field generated by one or two dipoles of different strengths, heat transfer characteristics and pressure drop within the microchannel are altered. The results indicate that the use of ferrofluids with different magnetic properties and the positioning of the dipoles have a direct impact on the heat transfer rate and pressure drop, as reflected by parameters such as the average and minimum Nusselt numbers. An increase in the volume fraction of magnetic nanoparticles in the base fluid (water) enhances the heat transfer rate. According to the results, when a non-uniform magnetic field generated by the magnetic dipole is applied, the AMG 700 ferrofluid achieves the highest average Nusselt number (10.47), while the AMG 308 ferrofluid shows the lowest average Nusselt number (9.9). Additionally, the highest and lowest imposed pressure drops in the internal flow correspond to AMG 700 (16.9 Pa) and AMG 308 (4.61 Pa), respectively.

Key words: Ferrofluid, Nusselt Number, Magnetic Dipoles, Two Dimensional Channel, Heat Transfer

*corresponding author: taleshbahrami@qut.ac.ir

Cite this article as: Mahziyar Ghaedi1, Hamid-Reza Bahrami, Numerical investigation of the effect of using different ferrofluids under the effect of magnetic dipoles with different strengths on heat transfer and pressure drop in a two-dimensional channel. **Journal of Energy Conversion, 2025, 12(1), 43-65**.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.82377/jeed.2025.1.535]