

مطالعه تأثیرات اعمال میدان مغناطیسی بر میزان و نحوه انتقال گرما در سیستم‌ها

سعید زینالی هریس*، فاطمه محمدپور

مشهد، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیام نگار: zeinali@ferdowsi.um.ac.ir

چکیده

اعمال میدان مغناطیسی به‌عنوان یکی از روش‌های نوین بهبود انتقال گرما مطرح است. در این مطالعه فعالیت‌های انجام شده در خصوص تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال گرما در شرایط مختلف جمع‌آوری شده و نتایج آنها مورد بررسی، تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. نتایج مطالعات نشان‌دهنده اثرات متفاوت میدان مغناطیسی در شرایط مختلف بر انتقال گرما می‌باشد، به‌طوری که با بررسی نتایج موجود در منابع می‌توان دریافت که اعمال میدان مغناطیسی با توجه به نوع سیال استفاده شده، شرایط انتقال گرما (جابجایی آزاد، اجباری و ترموسیفون)، نوع میدان، جهت‌گیری آن و نوع دستگاه باعث افزایش، کاهش یا حتی توقف انتقال گرما می‌شود یا بر آن بی‌اثر است.

کلمات کلیدی: میدان مغناطیسی، بهبود انتقال گرما، جابجایی آزاد، ترموسیفون، جابجایی اجباری

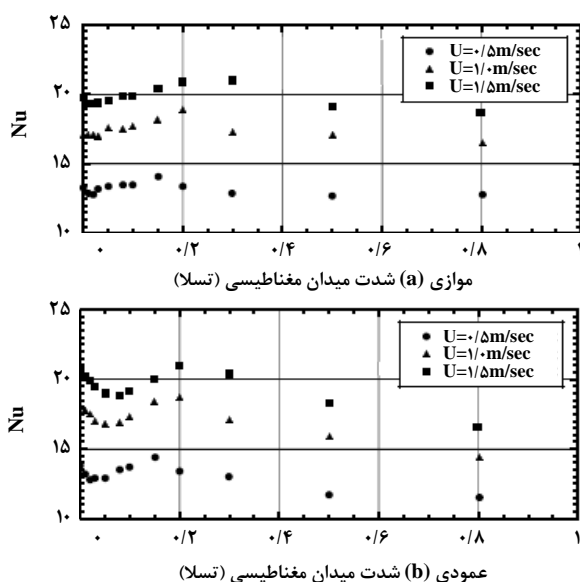
۱- مقدمه

اختلاف دما وجود دارد و به دلیل اهمیت فوق‌العاده انتقال گرما، تلاش برای بهبود آن به شدت مورد توجه و مطالعه می‌باشد. به‌منظور دستیابی به انتقال گرمای بیشتر، روش‌های مختلفی اعم از روش‌های فعال (اعمال یک عامل خارجی مثل میدان مغناطیسی یا الکتریکی) و روش کنش‌پذیر (تغییر درونی سیستم مثل افزایش سطح گسترش یافته، اضافه کردن ماده به سیال و روش‌های دیگر) وجود دارد [۱].

از جمله راه‌های اعمال میدان مغناطیسی به منظور بهبود انتقال گرما، استفاده از روش الکترومغناطیسی (استفاده از جریان مستقیم یا متناوب برای ایجاد میدان)، آهنربای ابررسانا و آهنرباهای دائمی است که بهترین آنها روش آهنرباهای دائمی با توجه به عمر زیاد، هزینه پایین، مصرف انرژی اندک و فضای کمتر می‌باشد. دانشمندان

بسیاری از پدیده‌هایی که در صنایع مختلف و فرایندها رخ می‌دهند متأثر از درجه دما هستند، به‌عنوان مثال سرعت واکنش با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند یا این که ضریب نفوذ متأثر از درجه دما است، در نتیجه درجه دما تأثیرگذار بر نرخ تولید است. انتقال گرما به‌دلیل کاربرد گسترده‌ای که در صنایع مختلف دارد، توسط دانشمندان و محققان از قرن شانزدهم (همزمان با انقلاب صنعتی) به تدریج شناخته شده و بر مبنای پدیده‌های فیزیکی بسیار مهمی استوار گردیده است. دانش پایه و پدیده‌های اصلی علم انتقال گرما در فاصله سال‌های (۱۸۸۰-۱۹۳۰) مدون شده و کاربردهای عمده آن از سال ۱۹۳۰ تاکنون گسترش یافته است و هر ساله نیز به مراتب بیشتر می‌شود. با توجه به اینکه در بیشتر از ۹۰٪ فرایندها،

میدان مغناطیسی رابطه معکوس عدد هاتا و عدد پرانتل را در یک مقطع ثابت به نمایش گذاشت. این کار توسط نیکاهارا و همکاران در یک لوله با گرمای یکنواخت انجام شده است [۳]. نتایج، اثر گذاری بیشتر نفوذ گرما (اثر نفوذ گردابه ای بیشتر از نفوذ مولکولی) را نسبت به آشفتگی جریان، در اعداد پرانتل بالا را در پی داشت. به علت باریکتر بودن بیش از حد لایه مرزی گرمایی نسبت به لایه مرزی تکانه و توقف آشفتگی جریان با اعمال میدان مغناطیسی و کاهش محسوس انتقال گرما نسبت به عدد پرانتل کم، نیمرخ جریان در نزدیک دیواره بسیار با اهمیت است.



شکل ۱- تغییرات عدد ناسلت نسبت به میدان مغناطیسی در سرعت‌های متفاوت جریان در دو حالت میدان موازی و میدان عمودی [۲]

در تعریف اعداد بدون بعد هاتا و پرانتل داریم:

$$Ha = (\sigma/\mu)^{0.5} BL \quad (2)$$

$$Pr = \nu/\alpha \quad (3)$$

که در این رابطه σ ضریب هدایت الکتریکی سیال، B شدت میدان مغناطیسی، L بعد مشخصه سیستم، μ گرانروی دینامیکی سیال، ν گرانروی سینماتیکی و α ضریب نفوذ گرما می‌باشند [۳].

تأثیر این عامل را با شرایط و امکانات مختلف مورد مطالعه قرار دادند که مجموعه‌ای از بررسی‌های انجام شده در این مطالعه ارائه می‌گردد.

۲- انتقال گرمای جابجایی اجباری

انتقال گرمای جابجایی اجباری یکی از مباحثی است که در بررسی افزایش انتقال گرما تحت میدان مغناطیسی مورد توجه قرار گرفته است. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش، کاهش و یکنواختی عدد ناسلت یا انتقال گرما با توجه به محدوده‌های متفاوت میدان می‌باشد.

یکی از این نمونه‌ها، پژوهش انجام گرفته توسط یودا و میزاکاکی بود که برای میدان مغناطیسی کمتر از ۰/۰۵ تسلا، کاهش عدد ناسلت و برای (۰/۰۵-۰/۲) تسلا افزایش و با افزایش بیشتر شدت میدان مجدداً کاهش انتقال گرما تا رسیدن به عدد ناسلت یکنواخت را نتیجه داده است که شکل (۱) نشان‌دهنده این حالات می‌باشد [۱].

دلیل این افزایش، ایجاد آشفتگی در جریان آرام با حضور میدان بوده است که به وسیله عدد ناسلت اصلاح شده (نسبت ناسلت در حضور میدان مغناطیسی به ناسلت در غیاب میدان) نسبت به عدد استنتون نشان داده شده است که شکل (۲) بیانگر همین مورد می‌باشد. عدد استنتون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$St = (\sigma_f B^2 L) / (\rho U) \quad (1)$$

در این رابطه σ_f ضریب هدایت الکتریکی سیال، B شدت میدان مغناطیسی، L بعد مشخصه سیستم، ρ چگالی سیال و U سرعت متوسط جریان می‌باشد.

مقدار حداکثر ناسلت اصلاح شده در نزدیکی عدد استنتون ۱۳ مشاهده شد که در بخش عمودی نسبت به غیاب میدان ۱۰٪ و در بخش افقی آن در حدود ۵٪ افزایش در عدد ناسلت مشاهده شده است که علت این مقدار کاهش در بخش افقی، جهت گیری عمودی سیال جدا شونده از سطح گرمکن نسبت به میدان مغناطیسی و کاهش حرکت آن می‌باشد [۲].

۳- اغتشاش انتقال گرمای یک سیال با عدد پرانتل بالا

بررسی آشفتگی انتقال گرمای یک سیال با عدد پرانتل بالا تحت

می‌باشد که ممکن است در اثر افزایش غلظت و گرانیروی سیال مغناطیسی، در معرض یک میدان مغناطیسی یکنواخت باشد. همچنین به دلیل امتداد زنجیره‌های عمود ذرات مغناطیسی و مسدود شدن کانال جریان سیال مغناطیسی در میدان یکنواخت عمودی، گرانیروی سیال مغناطیسی بیشتر افزایش می‌یابد. در عین حال با افزایش عدد رینولدز، افزایش عدد ناسلت در هر دو میدان مشاهده می‌شود.

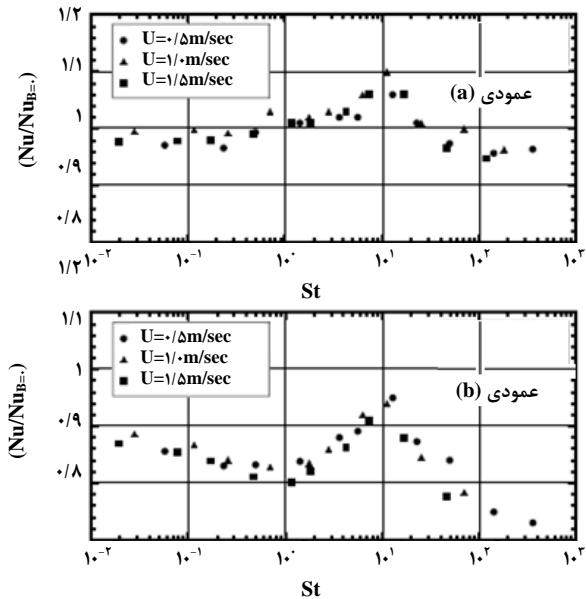
اثر گرادیان میدان مغناطیسی، با توجه به اثر نیروی کلوبین بر سیال مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی، در امتداد و یا مخالف با جهت اصلی جریان سیال مغناطیسی و در نقاط مختلف سطح (نزدیک یا دور از آهنربا) نتایج مختلفی به همراه دارد [۷].

در جهت‌گیری موازی و هم جهت گرادیان میدان مغناطیسی با جهت جریان، اختلاف فشار حاصل از این نیرو موجب شتاب سیال شده و انتقال گرما افزایش یافته است، در حالیکه با جهت‌گیری معکوس میدان نسبت به سیال، این اختلاف فشار مانع حرکت سیال شده و انتقال گرما متوقف می‌گردد. همچنین هرچه شدت میدان بیشتر شود اثر آن نیز در همان راستا افزایش یافته و مانند موارد قبل، در هر دو جهت، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت نیز افزایش یافت. اما در جهت‌گیری عمودگرادیان میدان مغناطیسی بر مسیر جریان، نتایج متفاوتی در نقاط مختلف سطح مقطع حاصل شد که به علت اثر نیروی کلوبین بر روی ذرات مغناطیسی و تمایل آنها به جذب شدن به آهنربا می‌باشد. با اعمال گرادیان میدان حضور ذرات مغناطیسی در نزدیکی آهنربا انتقال گرما در نزدیکی آهنربا زیاد شده و در نقاط دور از آن کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت افزایش می‌یابد [۷].

۵- افزایش جابجایی طبیعی و سرکوب همرفت

(رایلی - بنارد)

در انتقال گرمای جابجایی طبیعی جهت قرار گرفتن آهنربا و دستگاه نسبت به گرانش، عامل تعیین‌کننده‌ای در افزایش و یا کاهش انتقال گرما می‌باشد. در اثر نیروی گرانش، سیال گرم به سمت بالا و سیال سرد رو به پایین رفته و در حضور آهنربا، مایع سردتر همیشه جذب آهنربا و مایع گرمتر از آهنربا دفع می‌گردد. نیروی شناوری مغناطیسی عملگر روی سیال پارامغناطیس از قانون کوری پیروی می‌کند.



شکل ۲- تغییرات عدد ناسلت اصلاح شده نسبت به عدد استنتون در دو حالت میدان موازی و عمودی [۲]

۴- انتقال گرمای سیال مغناطیسی

در مورد سیال مغناطیسی نتایج بدست آمده با توجه به شرایط مختلف مثل حضور و عدم حضور میدان و نوع میدان اعمالی و جهت آن، کاملاً متمایز می‌باشد. یک نمونه بررسی حضور سیال مغناطیسی در اطراف سیم نازک مسی عمود بر جریان با اعمال میدان توسط آهنربای دائمی می‌باشد [۴].

در غیاب میدان مغناطیسی و در عدد رینولدز یکسان، به دلیل اینکه سیال مغناطیسی موجب افزایش ضریب هدایت گرمای سیال و حرکت بی‌نظم ذرات خیلی ریز می‌شود، مبادله انرژی بین سیال مغناطیسی و سیم گرم، تسریع شده، اعداد ناسلت سیال مغناطیسی بیشتر از آب دیونیزه می‌باشد.

با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت در هر دو سیال آب و سیال مغناطیسی افزایش می‌یابد. در صورت عدم وجود یک میدان مغناطیسی خارجی، سیال مغناطیسی دارای برخی ویژگی‌های مشابه با نانوسیال (سوسپانسیون پایدار نانوذرات پراکنده در مایع) است [۵۶].

با وجود یک میدان یکنواخت موازی و عمود بر مسیر جریان و در یک عدد رینولدز مشخص، اعداد ناسلت سیال مغناطیسی کوچکتر از اعداد ناسلت سیال مغناطیسی در غیاب میدان مغناطیسی خارجی

نمونه‌ای از تحقیق انجام شده در این زمینه، انتقال گرمای جریان لیتیم تک فاز در یک کانال مستطیل شکل تحت میدان مغناطیسی عرضی است [۱۵ و ۱۶].

دستگاه شامل یک حلقه گردش هلیوم با حداکثر شدت جریان 50 (kg/h) و یک حلقه گردش لیتیم با حداکثر شدت جریان 25 (Lit/min) می‌باشد. در این تحقیق از یک کانال مستطیل شکل استفاده شده است. ارتفاع کانال 10 mm است. کانال به صورت افقی در ظرف پر از آرگون و بین دو قطب آهنربا قرار می‌گیرد.

شکل (۳) تغییرات عدد ناسلت را تحت میدان مغناطیسی و اعداد رینولدز مختلف در نسبت‌های مختلف (x/De) ارائه می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است به‌غیر از نتایج حاصل برای دو عدد رینولدز کوچکتر، کاهش محسوس انتقال گرما در محدوده پایین عدد هارتمن دیده می‌شود. همچنین در محدوده بالاتر عدد هارتمن، با افزایش عدد هارتمن، افزایش قابل توجهی در انتقال گرما مشاهده می‌گردد. افزایش انتقال گرمای مشاهده شده در اینجا ممکن است به وسیله برخی از مکانیسم‌های MHD از قبیل گرادیان سرعت شدید نزدیک به دیوار گرم و قابلیت انتقال گرمای بالا در لایه‌های جانبی ایجاد شده باشد، نوسانات بزرگ توسط نیمرخ ناپایدار M شکل و یا اغتشاش دو بعدی MHD تولید شده است.

۷- تأثیر میدان مغناطیسی در جریان سیال پارامغناطیس

در استفاده از سیال پارامغناطیسی نیروی گرانش و نیروی رانش مغناطیسی روی سیال مؤثر بوده و با توجه به پایدار و ناپایدار بودن سیستم و اثرات این نیروها روی هم، نتایج متفاوتی قابل مشاهده است.

یک نمونه آزمایشگاهی که جهات متفاوت آن را بررسی کرده به شرح زیر می‌باشد [۱۷]:

مطالعات انتقال گرما در تبدلی شبیه ترموسیفون در محفظه ای با دیواره‌های جانبی مسی در ۲ حالت پایدار (قسمت پایین آن سرد و قسمت بالای آن گرم شود) و حالت ناپایدار (برعکس حالت پایدار) انجام گرفته است. دو قسمت بالا و پایین توسط صفحه استوانه‌ای نازک پلاکسی گلس با ضخامت $4 \text{ m} / 0.01$ از هم جدا شده و محفظه با 50% حجمی محلول آبی گلیسرین پر می‌گردد. حباب‌های هوای باقیمانده در محفظه نیز خارج می‌شود. دمای دیواره‌های جانبی ثابت

در حالت اعمال میدان افقی، به دلیل ایجاد آشفتگی در اثر جهت گیری خاص نیروی رانش مغناطیسی و گرانشی نسبت به هم، نرخ انتقال گرما به شکل بدیهی با افزایش شدت القای مغناطیسی افزایش می‌یابد. اما در حالت عمودی و قرار گرفتن آهنربا در بالای محفظه، حضور میدان مغناطیسی باعث کاهش عدد ناسلت می‌گردد که به علت جهت گیری دو نیرو نسبت به هم و رقابت آنها در نهایت، به یک لایه پایدار می‌رسند.

در این زمینه، آزمایشی در یک مکعب تحت تأثیر میدان مغناطیسی ایجاد شده با آهنربای ابرسانای ۵ تسلا و با روش توسعه ازو و چرچیل انجام شده است [۸]، به طوری که دو صفحه مسی در بالا و پایین آن به ترتیب سرد و گرم شده‌اند. شرح مختصری از این روش در مراجع [۹-۱۳] یافت می‌شود.

۶- انتقال حرارت تحت میدان مغناطیسی عرضی

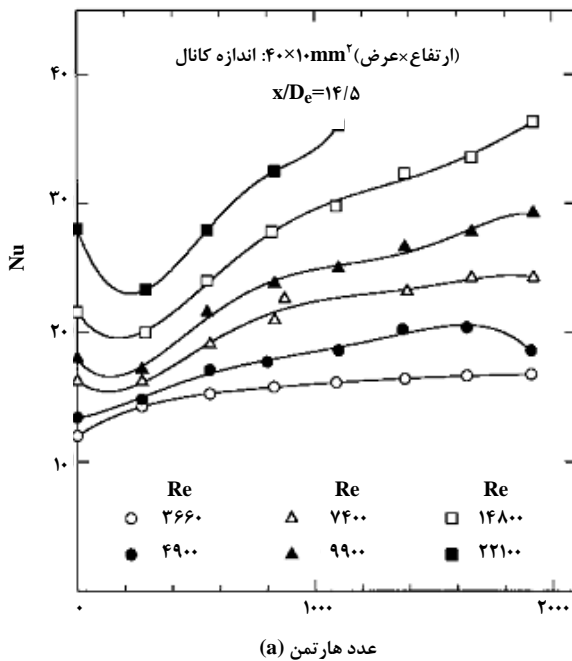
در غیاب میدان مغناطیسی در یک کانال، انتقال گرمای سیال به وسیله تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد پکلت بیان می‌گردد که روابط تجربی و نظری مختلفی برای انتقال گرمای یک جریان آشفته فلز مایع در یک لوله توسط دانشمندان ارائه شده است. به‌عنوان مثال برای یک جریان آشفته فلزی مایع در بین دو صفحه موازی که یکی از آنها با شار گرمایی یکنواخت گرم می‌شود و دیگری آدیاباتیک می‌باشد، معادله (۴) که در حقیقت معادله اصلاح شده ایروین و هانت می‌باشد برای نسبت $x / D_e \geq 82.0$ به شکل زیر ارائه گردید [۱۴]:

$$Nu = \frac{2}{3} Nu_s + 0.014 Pe^{0.8}, \quad Nu_s = 4.8 \quad (4)$$

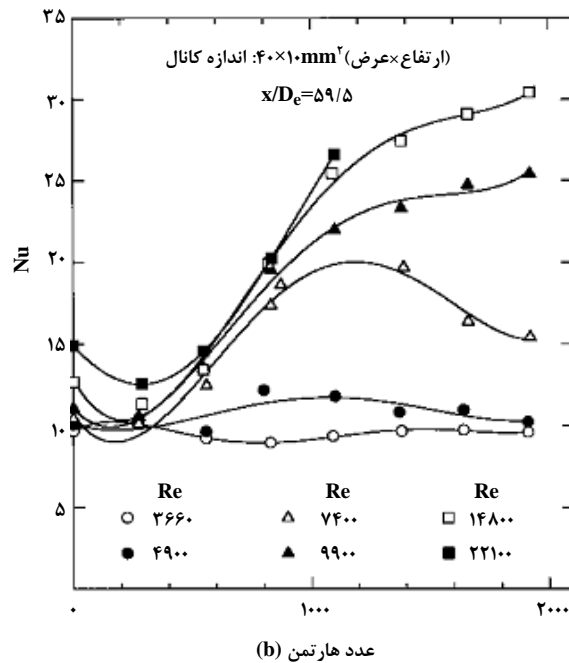
برای بررسی انتقال گرما تحت میدان مغناطیسی، تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد هارتمن بیان می‌شود که عدد هارتمن به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$M \equiv BD_e \sqrt{\sigma / \mu} \quad (5)$$

که در آن D_e قطر هیدرولیک، σ رسانایی الکتریکی، μ گرانشی و B چگالی شار مغناطیسی می‌باشند.



عدد هارتمن (a)



عدد هارتمن (b)

شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت نسبت به عدد هارتمن تحت میدان مغناطیسی برای اعداد رینولدز مختلف در ۲ نسبت متفاوت (x/D_e) [۱۵]

به‌عنوان اختلاف بین گرمای رسانشی اعمال شده در طول آزمایش و گرمای از دست رفته محاسبه می‌شود. فرض شده است که گرمای از دست رفته وابسته به دمای گرمکن است و به روش انتقال گرما در داخل محفظه بستگی ندارد. بررسی‌های تجربی برای ۲ حالت مختلف پایدار و ناپایدار محفظه آزمایش و همچنین برای اعداد ریلی مختلف (Ra) و مقادیر مختلف میدان مغناطیسی اعمال شده به صورت کاملاً مشابه انجام گرفته است.

شکل (۴) ترسیمی از تکدماها را برای شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در حالت ناپایدار برای اعداد ریلی مختلف و تحت میدان‌های مختلف نشان می‌دهد. در شکل (۴):

(a) $Ra_0 = 1/69 \times 10^5$ (b) $Ra_0 = 2/38 \times 10^5$ (c) $Ra_0 = 3/36 \times 10^5$ و (i): برای شدت میدان $0.1 T$ ، (ii): $1 T$ ، (iii): $2 T$ و (iv): $3 T$ می‌باشند. شکل (۵) نیز تعداد پره مشاهده شده در پیکربندی

ناپایدار برای سیستم‌های مختلف با شدت مختلف حداکثر القای مغناطیسی را به صورت عددی نمایش می‌دهد. (نمونه u1 در $Ra_0 = 0/23 \times 10^5$ ، نمونه u2 در $Ra_0 = 0/43 \times 10^5$ ، نمونه u3 در $Ra_0 = 1/69 \times 10^5$ ، نمونه u4 در $Ra_0 = 2/38 \times 10^5$ و نمونه u5 در $Ra_0 = 3/36 \times 10^5$ تهیه شده‌اند.)

نگه داشته شده و هر دو بخش گرم و سرد با کف پلی استایرن، عایق پیچی گرمایی شده است [۱۷]. چون بکار بردن گلیسرین به تنهایی دشوار است، از محلول آبی آن استفاده شد. غلظت گلیسرین تحت تأثیر خصوصیات فیزیکی محلول، به خصوص عدد پرانتل است.

به منظور بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر روی جریان و میدان درجه حرارت، در ارتفاع میانی مقطع عرضی دوغاب‌های مقطع کریستال مایع تعبیه شده است. هنگامی که سیستم فعال می‌شود، کریستال مایع با توجه به دمای سیال، رنگ‌های مختلفی را نمایش می‌دهد. رنگ روشن نشان‌دهنده پایین‌ترین دما و رنگ تیره بالاترین دماست.

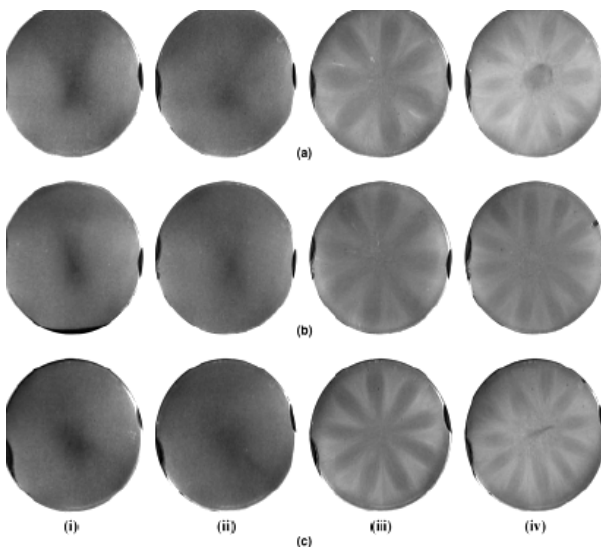
برای بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر نرخ انتقال گرما، عدد ناسلت سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Nu = \frac{Q_{\text{net-conv}}}{Q_{\text{net-cond}}} \quad (۶)$$

مقادیر انتقال گرمای جابجایی خالص $(Q_{\text{net-conv}})$ و هدایت خالص $(Q_{\text{net-cond}})$ به روش ازو و چرچیل [۸] تعیین می‌گردد. $(Q_{\text{net-conv}})$ به صورت اختلاف بین گرمای جابجایی اعمال شده در طول آزمایش و گرمای از دست رفته و $(Q_{\text{net-cond}})$ نیز

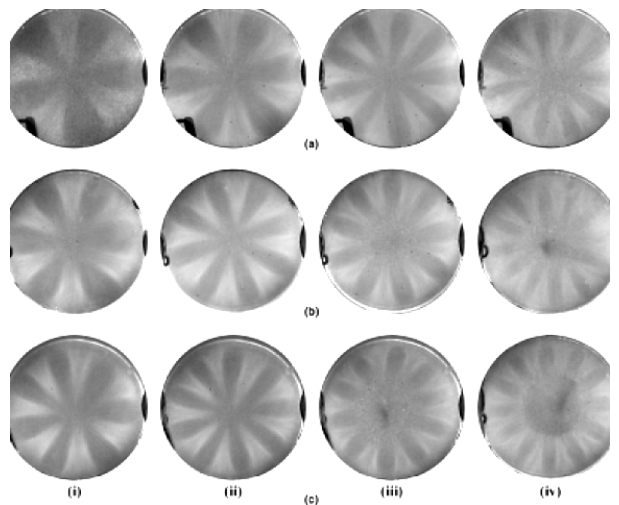
در اینجا هردو نیروهای رانش مغناطیسی و جاذبه در جهت یکسان عمل کرده، مایع سرد در منطقه سرد فوقانی جذب میدان مغناطیسی قوی شده و به طور همزمان، به علت چگالی بالاتر، فرو رفته است. سیال گرم، از میدان مغناطیسی قوی دفع شده و همچنین توسط نیروی رانش گرانشی به سمت بالا رانده شد. این اثر مشترک، یک جریان همرفت قوی فراهم کرده و با افزایش میدان مغناطیسی، منجر به تکثیر پره زاویه ای گشته است. بررسی‌ها نشان داد که افزایش شدت میدان مغناطیسی، مؤثرتر از نیروی رانش گرانشی در بالا بردن جریان است.

شکل (۶) تکدماها را برای شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در حالت پایدار نشان می‌دهد. در شکل (۶): نماد (a) $Ra_0 = 2/79 \times 10^5$ و حالت (i): شدت میدان 0 T ، (ii): 1 T ، (iii): 2 T و (iv): 3 T را نشان می‌دهد.

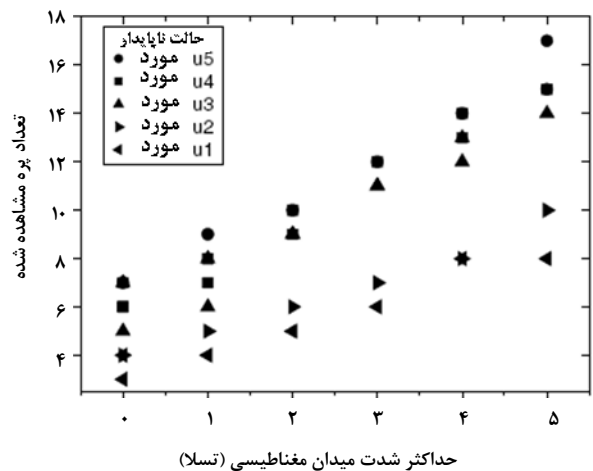


شکل ۶- تکدماها برای شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در حالت پایدار برای اعداد ریلی مختلف [۱۷]

شکل (۷) تعداد پره مشاهده شده را در پیکربندی پایدار برای سیستم‌های مختلف با شدت‌های مختلف حداکثر القای مغناطیسی نشان می‌دهد. (نمونه S1 در $Ra_0 = 0/14 \times 10^5$ ، نمونه S2 در $Ra_0 = 0/36 \times 10^5$ ، نمونه S3 در $Ra_0 = 2/57 \times 10^5$ ، نمونه S4 در $Ra_0 = 2/79 \times 10^5$ ، نمونه S5 در $Ra_0 = 3/8 \times 10^5$ و نمونه S6 در $Ra_0 = 5/22 \times 10^5$ تعیین شده اند.



شکل ۴- تکدماها برای شدت‌های مختلف میدان مغناطیسی در حالت ناپایدار سیستم آزمایشی برای اعداد ریلی متفاوت [۱۷]

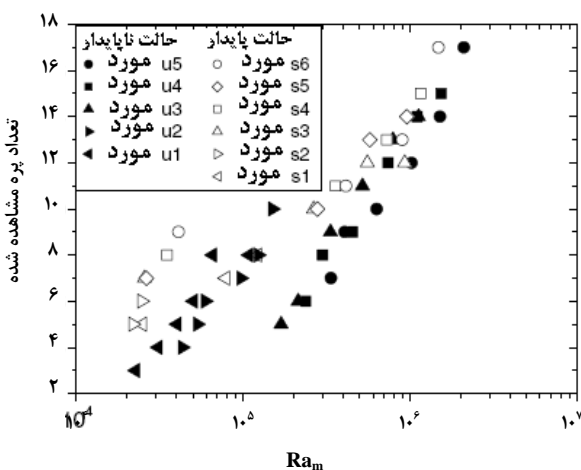


شکل ۵- تعداد پره مشاهده شده در حالت ناپایدار برای سیستم‌های با اعداد ریلی مختلف بر حسب تغییرات میدان مغناطیسی اعمال شده [۱۷]

در شکل (۴) طرح پره آشکار است. منطقه رنگ تیره مربوط به بالاترین دما و منطقه رنگ روشن مربوط به دمای پایین تر است. این عکس‌ها نشان‌دهنده جریان گرم شونده در ناحیه تیره و سرد شونده در ناحیه روشن می‌باشد. این حالت جریان، نوعی از پیکربندی ترموسیفون ناپایدار بوده که بسته به عدد ریلی، تعداد مختلفی پره ظاهر شد. تعداد پره با افزایش عدد ریلی افزایش یافته است.

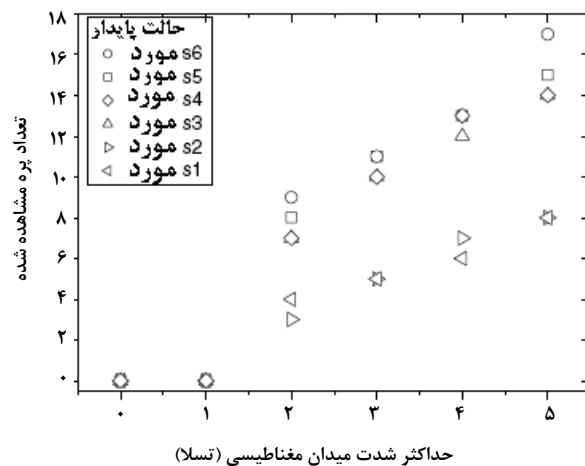
مغناطیسی بزرگتر، به همگرایی با یکدیگر تمایل دارد، که نشان‌دهنده غلبه نیروی رانش مغناطیسی بر نیروی گرانشی سیستم است. برای حالت ناپایدار ترموسیفون، حالت نزدیک به هدایت مشاهده نشده است. نتایج حاصل بیانگر آن است که روند کلی تعداد پره و عدد ناسلت متوسط تقریباً در ارتباط با عدد ریلی مغناطیسی هستند، که عدد ریلی مغناطیسی توسط برایت وایت و همکاران معرفی شد [۱۸].

شکل (۸) تعداد پره مشاهده شده بر حسب عدد ریلی مغناطیسی در حالت ناپایدار سیستم (نمونه u1 در $Ra_0 = 0.23 \times 10^5$ ، نمونه u2 در $Ra_0 = 0.43 \times 10^5$ ، نمونه u3 در $Ra_0 = 1.69 \times 10^5$ ، نمونه u4 در $Ra_0 = 2.85 \times 10^5$ و نمونه u5 در $Ra_0 = 3.36 \times 10^5$) و حالت پایدار سیستم (نمونه S1 در $Ra_0 = 0.14 \times 10^5$ ، نمونه S2 در $Ra_0 = 0.36 \times 10^5$ ، نمونه S3 در $Ra_0 = 2.57 \times 10^5$ ، نمونه S4 در $Ra_0 = 2.79 \times 10^5$ و نمونه S5 در $Ra_0 = 3.18 \times 10^5$ و نمونه S6 در $Ra_0 = 5.22 \times 10^5$) می‌باشد. در شکل (۹) تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد ریلی مغناطیسی در ۲ حالت ناپایدار و پایدار سیستم برای اعداد ریلی مختلف معرفی شده در سطرهای پیش را نشان می‌دهد. افزایش تعداد پره و عدد ناسلت با افزایش عدد ریلی در هر دو شکل مشهود است. دیده می‌شود که در یک عدد ریلی مغناطیسی ثابت، با افزایش Ra_0 ، هم تعداد پره و هم عدد ناسلت کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تعداد پره مشاهده شده بر حسب عدد ریلی مغناطیسی در ۲ حالت ناپایدار و پایدار سیستم در اعداد ریلی مختلف [۱۸]

زمانی که میدان مغناطیسی اعمال نشود پیکربندی سیستم از نظر گرما پایدار است. نیروی رانش گرانشی باعث طبقه بندی شدن دما با جریان همرفت اندک در نزدیکی دیوار کناری عمودی شده، مایع گرم در قسمت بالا و مایع سرد به علت چگالی بالا در قسمت پایین قرار می‌گیرد که این حالت منجر به یک حالت راکد با حالت هدایتی شد. در این حالت، رنگ یکسان تصاویر حضور یک لایه از مایع تکدما را در ارتفاع میانی منطقه نشان می‌دهد. رنگ، نشان‌دهنده میانگین درجه حرارت سیال است. طرح پره در غیاب میدان مغناطیسی مشاهده نمی‌شود. با افزایش قدرت مغناطیسی، نیروی رانش مغناطیسی به تدریج از نیروی رانش گرانشی مهمتر می‌شود و زمانی که شدت میدان به ۲T می‌رسد، ناگهان پره در مقطع عرضی ظاهر می‌گردد. در این حالت نیز با افزایش القای مغناطیسی، تعداد پره افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد در القای مغناطیسی ۱T نیروی رانش گرانشی با نیروی رانش مغناطیسی برابر باشد و در القای مغناطیسی ۲T نیروی رانش مغناطیسی غالب شود.



شکل ۹- تعداد پره مشاهده شده در پیکربندی پایدار برای سیستم‌های مختلف با شدت‌های متفاوت حداکثر القای مغناطیسی [۱۷]

پس در هر دو حالت پایدار و ناپایدار، افزایش عدد ریلی مغناطیسی موجب افزایش تعداد پره شده که برای قوی ترین میدان مغناطیسی (۵T)، تعداد پره در هر دو پیکربندی تقریباً برابر است. تعداد پره در هر دو پیکربندی نسبتاً محدوده وسیعی دارد اما برای عدد ریلی

انتخاب یک حالت مناسب می‌توان میدان گرانش را تقویت یا تضعیف نمود [۱۹]. جابجایی آزاد در طی آزمایش با افزایش توان ورودی و اختلاف دما افزایش یافت. همچنین نتایج تجربی بیانگر آن است که با افزایش عدد رایلی عدد ناسلت نیز با یک رابطه ناخطی افزایش می‌یابد.

۹- انتقال گرمای لوله حرارتی تحت میدان مغناطیسی

علاوه بر اینکه ساختار لوله حرارتی به تنهایی بر انتقال گرما مؤثر است، اعمال میدان، نوع سیال و زاویه لوله با سطح افق نیز بر آن تأثیر می‌گذارد. نمونه‌های مختلف آزمایشگاهی مبین این مسئله می‌باشند.

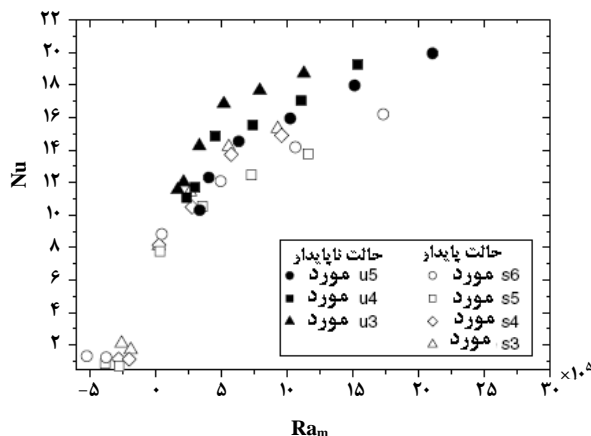
یک مورد، مطالعه روی ضرایب انتقال گرمای لوله حرارتی پتاسیم تحت تأثیر میدان مغناطیسی توسط فوجی و فوکوزاوا انجام شده است [۲۰]. در غیاب میدان مغناطیسی حداکثر انتقال گرمای لوله حرارتی پتاسیم به‌طور خطی با سینوس زاویه لوله حرارتی با افق تغییر نموده و نیز شدت انتقال گرما به‌طور خطی با افزایش دمای بخار، افزایش می‌یابد و اعمال میدان مغناطیسی تأثیرات متفاوتی بسته به شرایط بر روی انتقال گرما دارد.

انتقال حرارت سیال مغناطیسی سیتریک یونی پایدار شده در لوله حرارتی تحت میدان مغناطیسی توسط جیادوان و همکاران بررسی شده است. طی بررسی‌ها نتیجه نشان داد که با اعمال میدان مغناطیسی در لوله حرارتی حاوی این سیال عامل، شدت انتقال گرما در مقایسه با حالتی که میدان اعمال نمی‌شود ۱۳٪ افزایش می‌یابد [۲۱]. شکل (۱۰) مقدار حرارت منتقل شده توسط لوله حرارتی را در دو حالت حضور میدان مغناطیسی و در غیاب آن نشان می‌دهد. نتایج مبین این است که اعمال میدان و افزایش دمای منبع حرارتی، باعث افزایش انتقال گرما می‌شود.

همچنین زینالی هریس و همکاران تأثیر میدان مغناطیسی و نانو سیال را روی بازدهی گرمایی و مقاومت گرمایی ترموسیفون مورد بررسی قرار دادند [۲۲].

بازدهی گرمایی برای ترموسیفون به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\eta = Q_{out}/Q_{in} \quad (7)$$



شکل ۹- مقایسه عدد ناسلت بر حسب عدد رایلی مغناطیسی در حالت ناپایدار و پایدار سیستم [۱۸]

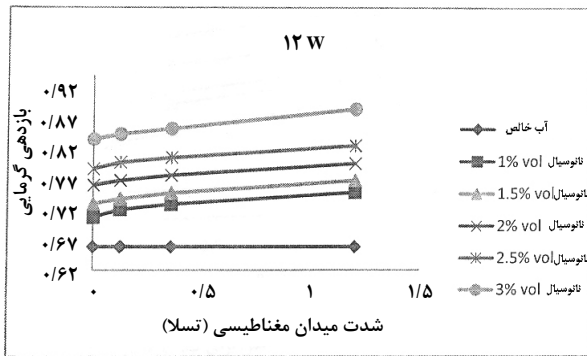
۸- انتقال گرمای جابجایی آزاد یا شبه هدایت

بررسی‌ها نشان‌دهنده آن است که جابجایی آزاد حتی با مقادیر کم حدود چندین وات نیز حاصل می‌گردد. در حالت کلی اثر میدان مغناطیسی روی انتقال گرمای جابجایی آزاد به این صورت است که، در حقیقت عامل حرکت بخار به سمت چگالنده، نیروی شناوری است. با عملکرد نیروی لورنس بر روی آن، حرکت سیال به سمت بالا تسهیل شده، افزایش سرعت بخار افزایش انتقال گرما را به همراه دارد. از طرفی نیروی دراگ نیز به جریان بخار وارد می‌گردد که جهت آن خلاف جهت جریان بوده و در نقش یک نیروی اصطکاک ظاهر می‌گردد. چون نیروی لورنس باعث چرخش سیال به سمت بالا می‌گردد، تا حدود زیادی اثر این نیرو را از بین می‌برد. به‌طور کلی میدان مغناطیسی به صورت زیر، انتقال گرمای جابجایی آزاد را تحت تأثیر قرار می‌دهد:

- تسهیل حرکت جریان بخار به سمت چگالنده

- حذف نیروی دراگ وارد شده به جریان

انتقال گرمای جابجایی آزاد یا شبه هدایت تحت میدان مغناطیسی برای هوای داخل یک محفظه استوانه‌ای شکل عمودی توسط ماک و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. هوا در قسمت تحتانی گرم شده، تحت نیروی شناوری به سمت بالا حرکت می‌کند و در قسمت فوقانی توسط یک چاه حرارتی سرد شد و به حالت اولیه خود برمی‌گردد. در حقیقت هوا شامل ۲۱٪ اکسیژن است، که اکسیژن به علت موازی بودن اسپین‌های الکترون‌ها، قابلیت زیادی برای تبدیل شدن به یک ماده مغناطیسی تحت میدان مغناطیسی دارد. در حقیقت با



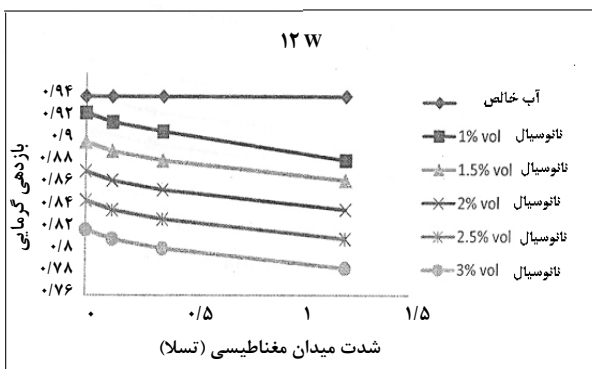
شکل ۱۱- تغییرات بازدهی حرارتی بر حسب میدان [۲۲]

بررسی‌های تجربی نشان می‌دهد اعمال میدان مغناطیسی بر روی آب خالص اثری نداشته ولی با اعمال میدان مغناطیسی و استفاده از نانوسیال، نسبت به آب خالص، افزایش بازدهی گرمایی ترموسیفون قابل مشاهده است.

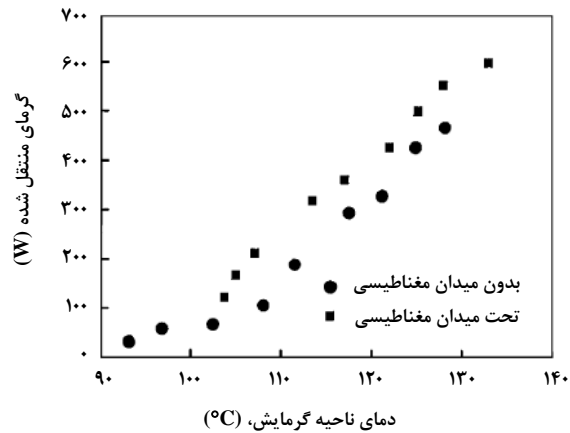
مقاومت حرارتی برای ترموسیفون به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۴]:

$$R = \Delta\theta / Q_{in} \quad (11)$$

در این رابطه $\Delta\theta$ اختلاف دمایی سطح تبخیر کننده و چگالنده می‌باشد. شکل (۱۲) تغییرات مقاومت حرارتی ترموسیفون را بر حسب میدان مغناطیسی در غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان می‌دهد. همانطور که شکل بیان می‌کند، اعمال میدان مغناطیسی و استفاده از نانوسیال، نسبت به آب خالص باعث کاهش مقاومت حرارتی ترموسیفون می‌گردد [۲۲].



شکل ۱۲- تغییرات مقاومت حرارتی بر حسب میدان [۲۲]



شکل ۱۰- مقایسه انتقال گرما در حضور و غیاب میدان

در دمای مشخص کوره [۲۱]

که در این رابطه مقدار Q_{in} مقدار حرارت ورودی به سیستم گرمکن الکتریکی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Q_{in} = VI \quad (8)$$

در این رابطه V ولتاژ اعمال شده و I جریان عبوری از گرمکن الکتریکی می‌باشد.

همچنین مقدار گرمای خروجی از سیستم به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$Q_{out} = mC_p(T_o - T_i) \quad (9)$$

در این رابطه m شدت جریان جرمی آب سرد، T_o دمایی خروجی و T_i دمایی ورودی آب سرد می‌باشد.

بنابراین طبق موازنه انرژی، مقدار حرارت اتلافی برابر است با:

$$Q_{loss} = Q_{out} - Q_{in} \quad (10)$$

در این آزمایش ابتدا اثر میدان روی آب و سپس نانو سیال (آب مقطر - اکسید مس) بررسی شد. شکل (۱۱) تغییرات بازدهی گرمایی ترموسیفون حاوی نانوسیال پارامغناطیس را بر حسب میدان مغناطیسی در غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان می‌دهد.

اغتشاش سیال داخل حوضچه مایع قسمت تبخیر کننده افزایش می‌یابد که در نتیجه انتقال گرما جوشش افزایش می‌یابد.

به علت حضور این نیرو، اختلاف دمای میان سیال و دیواره تحت شار حرارتی افزایش می‌یابد، که خود باعث بهبود و افزایش شار انتقال گرمای بحرانی می‌گردد و این مسئله افزایش انتقال گرما را در بر دارد و حرکت حباب‌های بخار از روی سطح داغ را تسهیل می‌نماید.

حباب‌های بخار را روی سطح جامد انتقال گرما پراکنده می‌سازد. تعداد حباب‌ها را با شکستن و از بین بردن حباب‌های بزرگتر افزایش می‌دهد، در نتیجه باعث کاهش قطر انفصالی حباب‌ها می‌شود و این سبب اغتشاش بیشتر می‌گردد.

علت کاهش مقاومت حرارتی بدین سبب است که مقاومت اصلی لوله حرارتی ناشی از تشکیل حباب در سطح مشترک (مایع-جامد) است. هرچه قطر حباب‌ها بیشتر باشد، مقاومت گرمایی بیشتری ایجاد می‌کند و این خود سبب کاهش شدت انتقال گرما می‌شود. در صورتی که ذرات نانو حالت بمباران ایجاد می‌نمایند در نتیجه قطر حباب‌ها کاهش می‌یابد و این خود افزایش انتقال گرما را به همراه دارد. افزایش انتقال گرما، افزایش بازدهی حرارتی را در بر دارد [۲۶].

حال با این تفاسیر، این پدیده‌ها اعمال میدان مغناطیسی روی نانوسیال در داخل ترموسیفون اثرات زیر را به همراه دارد:

- کاهش مقاومت حرارتی ترموسیفون
- افزایش انتقال حرارت و متعاقب آن، افزایش بازدهی حرارتی ترموسیفون

۱۰- نتیجه‌گیری

در تحقیقات انجام شده نتایج متفاوتی حاصل شده است که قابل ملاحظه می‌باشد. به‌عنوان مثال در دستگاه‌های مختلفی مثل عبور یک سیال مغناطیسی در اطراف یک سیم نازک پلاتینی، نوع میدان اعمالی و جهت آن، بر روی اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت مؤثر است.

همچنین در لوله حرارتی، نوع سیال و دستگاه بر اثر آن تأثیر گذار بوده و نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده افزایش یا کاهش انتقال گرما یا حتی قطع آن با اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد. در مواقعی نیز اعمال میدان، تأثیری بر انتقال گرما نمی‌گذارد. با توجه

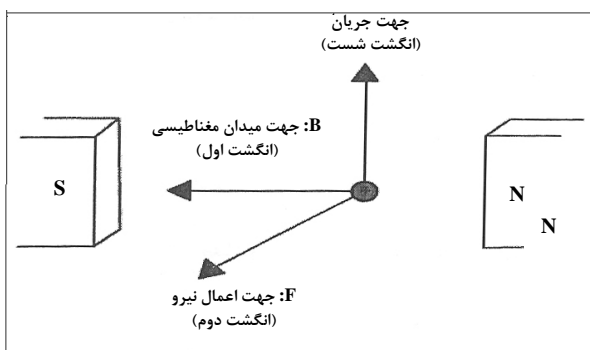
۹-۱ تحلیل کلی اثر میدان مغناطیسی روی نانوسیال در

حالت جوشش

اثر میدان مغناطیسی در قالب نیروی لورنس ظاهر می‌گردد. اگر ذره باردار در حال حرکت با مقدار بار الکتریکی q و با سرعت V تحت میدان مغناطیسی B قرار گیرد، نیروی لورنس F به ذره وارد می‌شود [۲۵]:

$$F = q V \times B \quad (12)$$

علامت \times در بالا ضرب برداری است. بر طبق قانون دست راست اگر جهت جریان به سمت بالا و جهت میدان عمود بر جهت جریان باشد، نیروی وارد به سیال باعث چرخش سیال به سمت بالا می‌گردد. شکل (۱۳) نشان‌دهنده چنین پدیده‌ای می‌باشد.



شکل ۱۳- جهت نیروی لورنس با توجه به جهت جریان و میدان مغناطیسی

برای مثال نانو سیال (آب - اکسید مس) نوعی سیال پارامغناطیس می‌باشد. اما اینطور به نظر می‌رسد که ذرات نانو در سیال، بار الکتریکی سطحی پیدا می‌کنند و تحت میدان مغناطیسی به آنها نیروی لورنس وارد می‌گردد.

اثر میدان مغناطیسی بر انتقال گرمای جوشش در داخل ترموسیفون نیز به این صورت است که، نیروی لورنس باعث چرخش مایع داخل حوضچه ترموسیفون می‌گردد که این پدیده اثرات زیادی را به همراه خواهد داشت:

چرخش نانوسیال، نوسانات دمایی داخل تبخیر کننده را کم می‌کند یا حتی از بین می‌برد و در نتیجه سیستم در زمان کوتاهتری به حالت پایا می‌رسد.

- [11] Bednarz, T., Fornalik, E., Ozoe, H., Szmyd, J.S., Patterson, J.C., Lei, C., "Influence of a horizontal magnetic field on the natural convection of paramagnetic fluid in a cube heated and cooled from two vertical side walls", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, pp. 668-679, (2008).
- [12] Bednarz, T., Lei, C., Patterson, J.C., Ozoe, H., "Suppressing Rayleigh–Benard convection in a cube using strong magnetic field — experimental heat transfer rate measurements and flow visualization", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36 (2), pp. 67-102, (2009).
- [13] Bednarz, T., Patterson, J.C., Lei, C., Ozoe, H., "Enhancing natural convection in a cube using a strong magnetic field-Experimental heat transfer rate measurements and flow visualization", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp.781-786, (2009).
- [14] Hartnett, J.P., Irvine, T.F., "57-NESC-30", Philadelphia, (1957).
- [15] Takahashi, M., Aritomi, M., Inoue, A., Matsuzaki, M., "MHD pressure drop and heat transfer of lithium single-phase flow in a rectangular channel under transverse magnetic field", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 42, pp. 365-372, (1998).
- [16] Inoue, A., Aritomi, M., Takahashi, M., Narita, Y., Yano, T., Matsuzaki, M., "Studies on MHD pressure drop and heat transfer of helium-lithium annular-mist bow in a transverse magnetic field", *JSME International Journal*, Vol. 30, pp. 1768–1775, (1987).
- [17] Fornalik, E., Filar, P., Tagawa, T., Ozoe, H., Szmyd, J.S., "Effect of a magnetic field on the convection of paramagnetic fluid in unstable and stable thermosyphon-like configurations", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2642–2651, (2006).
- [18] Braithwaite, D., Beaugnon, E., Tournier, R., "Magnetically controlled convection in a paramagnetic fluid", *Nature*, Vol. 354, pp. 134-136, (1991).
- [19] Maki, S., Tagawa, T., Ozoe, H., "Enhanced convection or quasi conduction states measured in a superconducting magnet for air in a vertical cylindrical enclosure heated from below and cooled from above in a gravity fluid", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 124, pp. 667-672, (2002).
- [20] Fukuzawa, Y., Fujii, Y., "Influence of transverse magnetic field on heat transport characteristics of potassium heat pipe", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.15, pp. 719-728, (1978).
- [21] Jeyadevan, B., Koganezawa, H., Nakatsuka, K., "Performance evaluation of citric ion stabilized magnetic fluid heat pipe", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 289, pp. 253-256, (2005).
- به اهمیت انتقال گرما در صنعت و تأثیرگذاری اعمال میدان مغناطیسی در انتقال گرما در حالت‌های مختلف، بایستی با در نظر گرفتن شرایط مورد نیاز، نوع، جهت و شدت میدان مغناطیسی را جهت رسیدن به شرایط مطلوب تعیین کرد.

مراجع

- [1] Daungthongsuk, W., Wongwises, S., "A critical review of convective heat transfer of nanofluids", *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1-23, (2005).
- [2] Uda, N., Miyazawa, A., "Forced convection heat transfer and temperature fluctuations of lithium under transverse magnetic fields", *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 38, pp. 936-943, (2001).
- [3] Nakaharai, H., Tekeuchi, J., Yokomine, T., Kunugi, T., "The influence of a magnetic field on turbulent heat transfer of a high Prandtl number fluid", *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 23-28, (2007).
- [4] Li, Q., Xuan, Y., "Experimental investigation on heat transfer characteristics of magnetic fluid flow around a fine wire under the influence of an external magnetic field", *Journal of Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, pp. 591-596, (2009).
- [5] Li, Q., Xuan, Y., Wang, J., "Experimental investigation on transport properties of magnetic fluids", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 109–116, (2005).
- [6] Xuan, Y., Li, Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151-155, (2003).
- [7] Li, Q., Xuan, Y., Li, B., "Simulation and control scheme of microstructure in magnetic fluids", *Science in China (Series E)*, Vol. 50, pp. 1-9, (2007).
- [8] Ozoe, H., Churchill, S.W., "Hydrodynamic stability and natural convection in Newtonian and non-Newtonian fluids heated from below", *AIChE Symposium Series Heat Transfer*, Vol. 69, pp. 126-133, (1993).
- [9] Bednarz, T., Lei, C., Patterson, J.C., Ozoe, H., "Suppressing Rayleigh–Benard convection in a cube using a strong magnetic field — Experimental heat transfer rate measurements and flow visualization", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 97-102, 2009.
- [10] Bednarz, T., Fornalik, E., Tagawa, T., Ozoe, H., Szmyd, J.S., "Convection of paramagnetic fluid in a cube heated and cooled from side walls and placed below a superconducting magnet — comparison between experiment and numerical computations", *Thermal Science and Engineering*, Vol. 14, pp. 107-114, (2006).

- [22] Zeinali Heris, S., Noie, S.H., Salehi, H., "Experimental study of two-Phase closed thermosyphon with nanofluid and magnetic field effect", *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 18 (3), pp. 261-269, (2011).
- [23] Noie, S.H., Zeinali Heris, S., Kahani, M., Nowee, S.M., "Heat transfer enhancement using Al₂O₃/ water nanofluid in a two-phase closed thermosyphon", *Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 700-705, (2009).
- [24] Khandekar, S., Joshi, Y.M., Mehta, B., "Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids", *Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, pp.659-667, (2008).
- [25] Knoepfel, H.E., "Magnetic fluids: A comprehensive theoretical treatise for practical use", John Wiley & Sons, USA, (2008).
- [26] Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance", *Journal of Materials Letters*, Vol. 58, pp. 1461-1465, (2004).