



Analysis of Entropy and Heat Transfer of Non-Newtonian Ferrofluid Under the Effect of Various External and Internal Factors

Mohammad Nemati¹, Mohammad Sefid^{2*}, Arash Karimipour³

¹ Ph.D. Student, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

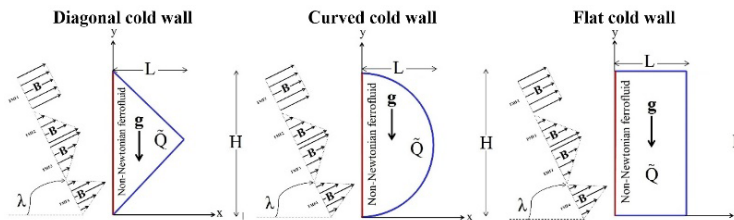
² Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

³ Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Iran

HIGHLIGHTS

- Achieving the highest value of the thermal performance index with a cold flat wall design
- Increasing the effectiveness of thermal radiation by increasing the fluid power-law index
- Less influence of the magnetic field on the thermal characteristics of the system by applying vertically and non-uniformly

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 June 2023

Received in revised form: 24 July 2023

Accepted: 16 August 2023

Available online: 19 September 2023

*Correspondence: mhsefid@yazd.ac.ir

How to cite this article:

M. Nemati, M. Sefid, A. Karimipour. Analysis of entropy and heat transfer of non-Newtonian ferrofluid under the effect of various external and internal factors. Journal of Aerospace Mechanics. 2024; 20(1):1-25.

Keywords:

Natural convection
Non-Newtonian nanofluid
Volumetric radiation
Entropy production
Uniform heat absorption/production
Non-uniform magnetic field

ABSTRACT

The target of this research is to investigate the amount of entropy production during natural convection inside a 2D chamber containing a non-Newtonian nanofluid using the lattice Boltzmann method. The chamber is exposed to uniform heat absorption/production and uniform and non-uniform magnetic field at different angles. The feature of the present work is to evaluate the effect of thermal radiation and the shape of the cavity cold wall in three shapes: smooth, curved and diagonal on the flow characteristics. Application in the design of electronic coolers and solar collectors is one of the practical cases of this numerical research. Acceptable agreement of the obtained results with previous related studies confirmed the validity of the presented results. Based on the results, the presence of radiation parameter leads to the improvement of heat transfer, which is more evident due to the increase of fluid power-law index. In addition to reducing the Nusselt value for enhancing the fluid power-law index, the effectiveness of the presence of the magnetic field in reducing the entropy and heat transfer rate enhances as the fluid power-law index decreases. It is feasible to attain the flow strength and the Nusselt value up to 40% and 61% more, respectively, by applying a vertical and non-uniform magnetic field. Although for heat production mode, there will be the lowest value of thermal performance index and the Nusselt value, the greatest influence of the magnetic field is observed in the heat production mode. By designing the wall in a smooth shape, in addition to increase the thermal performance coefficient, it is possible to decline the Bejan value.

This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.





تحلیل میزان اثرگذاری عوامل داخلی و خارجی بر تولید آنتروپی و انتقال حرارت نانوسیال غیرنیوتنی از طریق روش شبکه بولتزمن

محمد نعمتی^۱، محمد سفید^{۱*}، آرش کریمی پور^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجفآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجفآباد، ایران

برجسته‌ها

- دستیابی به بالاترین مقدار شاخص عملکرد با طراحی دیواره به شکل صاف
- افزایش میزان اثرگذاری وجود تشعشع حرارتی با افزایش شاخص توانی سیال
- اثرگذاری کمتر میدان مغناطیسی بر مشخصات حرارتی سیستم با اعمال به صورت عمودی و غیریکنواخت

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۰۸

بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۵

ارائه برخط: ۱۴۰۲/۰۶/۲۸

*نویسنده مسئول:

mhsefid@yazd.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

جابجایی طبیعی

نانوسیال غیرنیوتنی

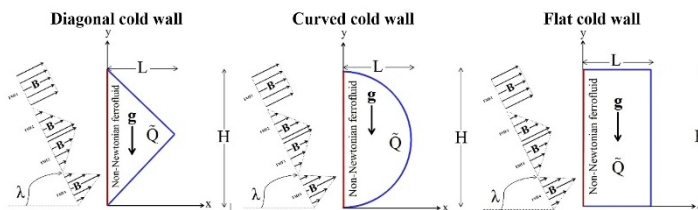
تشعشع حجمی

تولید آنتروپی

جذب/تولید حرارت یکنواخت

میدان مغناطیسی غیریکنواخت

چکیده گرافیکی



چکیده

ارزیابی مقدار تولید آنتروپی طی انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه‌ای دوبعدی حاوی نانوسیال غیرنیوتنی، هدف از انجام این پژوهش با استفاده از روش شبکه بولتزمن است. محفظه در معرض جذب/تولید حرارت یکنواخت و میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت در زوایای مختلف قرار دارد. ویژگی کار حاضر، بررسی اثر تشعشع حجمی و شکل دیواره سرد محفظه در سه شکل صاف، منحنی و مورب بر مشخصات جریان است. کاربرد در طراحی خنک‌کننده‌های الکترونیکی و کلکتورهای خورشیدی از جمله موارد عملی این تحقیق است. تطابق قابل قبول نتایج حاصل شده با مطالعات مرتبط قبلی، صحت نتایج ارائه شده را تأیید کرد. بر اساس نتایج، وجود پارامتر تشعشع منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود که این اثر به ازای افزایش شاخص توانی سیال مشهودتر است. علاوه بر کاهش عدد ناسلت به ازای افزایش شاخص توانی سیال، اثربخشی وجود میدان مغناطیسی در کاهش مقدار آنتروپی و نرخ انتقال حرارت به ازای کاهش شاخص توانی سیال افزایش می‌یابد. دستیابی به قدرت جریان و عدد ناسلت بالاتر به ترتیب تا حدود ۴۰٪ و ۶۱٪، به ازای اعمال میدان مغناطیسی عمودی و غیریکنواخت امکان‌پذیر است. اگرچه به ازای تولید حرارت، پایین‌ترین مقدار شاخص عملکرد حرارتی و عدد ناسلت وجود خواهد داشت، اما بیشترین اثرگذاری میدان مغناطیسی در حالت تولید حرارت مشاهده می‌شود. با طراحی دیواره به شکل صاف علاوه بر افزایش شاخص عملکرد حرارتی، کاهش عدد بجان نیز مقدور است.



۱- مقدمه

پدیده جابجایی طبیعی به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یکی از فرآیندهای مهم انتقال حرارت، در بسیاری از تجهیزات مهندسی، صنعتی و روزمره کاربرد دارد. در کنار کم‌صدا بودن، صرفه اقتصادی، سادگی در وقوع این پدیده فیزیکی، یکی از ویژگی‌های خاص این پدیده است، زیرا نیازی به انرژی برای ایجاد چنین جریانی وجود ندارد. اجاق‌ها، کوره‌ها و حتی هوای گرم شده در خانه‌ها با منبع گرما نمونه‌های ساده‌ای از انتقال حرارت جابجایی طبیعی هستند. عامل اصلی به وجود آمدن جریان جابجایی طبیعی درون محفظه‌ها، وجود اختلاف دما است [۴-۱]. در این راستا، محققان با طراحی محفظه‌هایی با شکل‌های مختلف، پدیده جابجایی طبیعی را مدیریت می‌کنند. از آنجایی که در بسیاری از کاربردها، شکل محفظه لزوماً مستطیلی نیست، طراحی محفظه‌های شکل‌دار و بررسی آن‌ها بسیار مهم است. استفاده از نانوسیال به‌جای سیال معمولی، اعمال میدان مغناطیسی، اثر دادن تشعشع و جذب/تولید حرارت بر میدان جریان از دیگر تکنیک‌های حائز اهمیت برای در کنترل قرار دادن مشخصات پدیده جابجایی طبیعی به شمار می‌رود [۵]. با توجه به تعدد مقالات ارائه‌شده پیرامون مزایای بسیار نانوسیال‌ها بر بهبود مشخصات انتقال حرارت، کاربرد نانوسیالات به‌جای سیالات معمولی در تحقیقات علمی به‌شدت رو به افزایش است. دارا بودن رسانایی حرارتی بالاتر نانوسیالات نسبت به سیالات معمولی مانند آب و روغن، یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این‌گونه مواد هستند [۶]. داس و همکاران [۷]، پوترا و همکاران [۸] و چون و همکاران [۹] نشان دادند تنها با افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به میزان ۴ درصد به آب، رسانایی حرارتی به ترتیب در حدود ۹/۴ درصد، ۲۴ درصد و ۹ درصد افزایش می‌یابد.

در یک دهه اخیر، مشخصات جریان و عملکرد حرارتی درون محفظه‌های حاوی سیالات رسانای الکتریکی تحت اثر اعمال میدان‌های خارجی از جمله میدان مغناطیسی توسط بسیاری از محققان مورد بررسی قرار گرفته است. میدان‌های مغناطیسی اعمالی گاهی به‌اجبار و گاهی خودخواسته اعمال می‌شوند. پدیده جابجایی تحت اثر میدان مغناطیسی کاربردهای فراوانی از جمله کنترل انتقال حرارت در خنک‌سازی

دستگاه‌های الکترونیکی، کاربرد در صنایع همچون متالورژی، پلیمر و ذوب فلزات دارد [۱۰ و ۱۱]. از دیگر موارد بسیار حائز اهمیت، شکل و زاویه اعمال میدان مغناطیسی است. با کاربرد این میدان‌های خارجی در زوایا و شکل‌های مختلف، می‌توان به جریان‌های متفاوتی دست یافت [۱۲]. نعمتی و همکاران [۱۳] با بررسی اثر میدان مغناطیسی به‌صورت یکنواخت و پربودیک بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی با استفاده از روش شبکه بولتزن گزارش کردند که با افزایش عدد هارتمن علاوه بر کاهش سرعت حرکت سیال درون محفظه، عدد ناسلت نیز به شکل بارزی کاهش می‌یابد. همچنین آن‌ها نشان دادند با اعمال میدان مغناطیسی غیریکنواخت، اثر نیروی لورنتز محدود می‌شود و به ازای اعداد هارتمن بالا، تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی مشهودتر می‌شود. بررسی اثر تشعشع در محفظه‌ها به‌عنوان مکانیسم انتقال حرارت، از دیگر موارد مهم مورد بررسی مشخصات جریان‌های جابجایی به شمار می‌رود. تشعشع به‌طور گسترده در صنایع انرژی خورشیدی استفاده می‌شود و نمی‌توان از آن در تجهیزاتی که در دماهای بالا کار می‌کنند غافل شد [۱۴]. شیخ‌الاسلامی و همکاران [۱۵] با در نظر گرفتن اثر تشعشع بر فرآیند جابجایی طبیعی نانوسیال با کسر حجمی ۵ درصد اکسید آهن-گلیکول نشان دادند با تغییر مقدار پارامتر تشعشع، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای نرخ انتقال حرارت تغییر می‌کند. طبق قانون دوم ترمودینامیک، بازده یک سیستم را می‌توان از طریق محاسبه تولید برگشت‌ناپذیری محاسبه کرد [۱۶]. در این رابطه پژوهش‌های زیادی برای ارزیابی بهبود بازده حرارتی تجهیزات انتقال حرارت از طریق محاسبه تولید آنتروپی انجام‌شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعه حاجت‌زاده و همکاران [۱۷] اشاره داشت. آن‌ها نشان دادند که افزایش عدد رایلی و عدد هارتمن به ترتیب اثر افزایشی و کاهش‌ی بر نرخ انتقال حرارت و برگشت‌ناپذیری دارد. علاوه بر این، افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم به سیال پایه، عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد.

با توجه به اینکه سیالات معمول استفاده‌شده در صنایع مختلف، رفتاری غیرنیوتنی از خود بروز می‌دهند، بررسی این

از هدف انجام این پژوهش، مهم‌ترین سؤالاتی که پس از مطالعه این مقاله پاسخ داده خواهند شد در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول (۱): سؤالات نیازمند به پاسخگویی.

(۱)	کدام شکل طراحی دیواره سرد منجر به افزایش مقدار انتقال حرارت می‌شود؟ آیا شکل طراحی دیواره بر میزان اثرگذاری متغیرهای دیگر مؤثر است؟
(۲)	تغییر شکل و زاویه اعمال میدان مغناطیسی چه تأثیری بر مشخصاتی حرارتی سیستم دارد؟
(۳)	آیا میزان اثرگذاری وجود تشعشع حرارتی به ازای تغییر نوع سیال یکسان است؟
(۴)	بیشترین میزان اثرگذاری میدان مغناطیسی به ازای چه مقداری از ضریب جذب/تولید حرارت وجود دارد؟
(۵)	با چه راهکارهایی می‌توان آنتروپی تولیدشده را کنترل کرد و به بالاترین میزان شاخص عملکرد دست یافت؟

۲- توصیف مسئله و معادلات حاکم

نمایی از محفظه دوبعدی با نسبت ارتفاع به طول ثابت برابر ۲، حاوی نانوذرات معلق در سیال غیرنیوتنی در حضور جذب/تولید حرارت یکنواخت در شکل ۱ نشان داده شده است. دما در طی دیواره عمودی محفظه به صورت سینوسی $T(y) = T_c + (T_c + T_h) \sin(\pi y/H)$ تغییر می‌کند. دو دلیل برای در نظر گرفتن توزیع دما به صورت سینوسی مدنظر بوده است: (الف) عدم امکان دستیابی به دمای یکنواخت در سراسر دیوار و (ب) وجود چنین توزیع دماهای متغیر در سراسر دیوار در کاربردهای واقعی [۱] و [۲]. دیواره سرد محفظه در سه شکل (مورب، منحنی و صاف) طراحی شده است تا میزان اثرگذاری این متغیر بر مشخصات حرارتی سیستم بررسی شود. محفظه، در معرض میدان مغناطیسی در چهار شکل مختلف تحت زاویه λ قرار دارد. به دلیل اینکه میدان‌های خارجی اثرکننده بر جریان سیال از جمله میدان مغناطیسی همیشه به صورت یکنواخت اعمال نمی‌شوند و یا گاهی نیاز است برای رسیدن به هدفی خاص، این میدان‌ها به صورت غیریکنواخت اعمال شوند. در کار حاضر چهار شکل مختلف برای اعمال در نظر گرفته شده است [۳ و ۴]. فرضیات لحاظ شده در طی شبیه‌سازی حاضر

دسته از سیالات در پژوهش‌ها ضروری است. ویژگی منحصر به فرد این‌گونه سیالات در مقایسه با سیالات نیوتنی، نداشتن رابطه خطی بین تانسور تنش و تانسور نرخ برش است [۱۸]. از جمله نتایج حاصل از شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه مستطیلی توسط ردوان و همکاران [۱۹]، کاهش عدد ناسلت متوسط به ازای افزایش شاخص توانی و عدد هارتمن بود. همچنین آن‌ها نشان دادند که تأثیرپذیری جریان نانوسیال از میدان مغناطیسی با کاهش شاخص توانی سیال به صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

گاهی وجود جذب یا تولید حرارت درون محفظه‌هایی که در آن‌ها پدیده جابجایی رخ می‌دهد به سیستم تحمیل می‌شوند. نمونه عملی این موضوع در صنایع هسته‌ای است که موضوعی بسیار فراگیر است. بررسی اثراتی که این عامل درونی در حضور متغیرهای دیگر ایجاد می‌کند، بسیار حائز اهمیت است. بای و همکاران [۱۶] از طریق شبیه‌سازی جابجایی طبیعی سیال با مدل توانی نشان دادند که اگرچه بیشترین مقدار ناسلت متوسط به ازای جذب حرارت وجود دارد اما اثربخشی میدان مغناطیسی به ازای تولید حرارت بیشترین است. در مطالعه‌ای دیگر، الجالود [۲۰] با مدل‌سازی پدیده جابجایی ترکیبی نشان داد که به ازای تولید حرارت، اثربخشی وجود نانوذرات کاهش می‌یابد و در حالاتی که اثرات جابجایی کم است، افزودن نانوذرات به سیال پایه در بهبود انتقال حرارت بسیار چشم‌گیرتر است.

با توجه به اهمیت بالای بررسی پدیده جابجایی طبیعی تحت اثر عوامل داخلی و خارجی درون محفظه‌های شکل‌دار به دلیل کاربرد فراوان، هدف از این پژوهش، بررسی اثراتی است که میدان مغناطیسی در شکل و زوایای مختلف، جذب/تولید حرارت و تشعشع بر مشخصات حرارتی جریان جابجایی طبیعی نانوسیال غیرنیوتنی درون محفظه دوبعدی با سه شکل مختلف دیواره سرد دارد. تازگی کار حاضر در بررسی هم‌زمان عوامل مختلف اثرگذار بر مشخصات حرارتی با استفاده از روش شبکه بولتزمن است که تاکنون مورد ارزیابی قرار نگرفته است. خنک‌سازی دیواره‌ای از یک قطعه الکترونیکی محصور در فضای ناخواسته، نمونه کاربردی استفاده از این پژوهش به شمار می‌رود. به‌منظور درک بهتر

جدول (۳): مشخصات ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات.

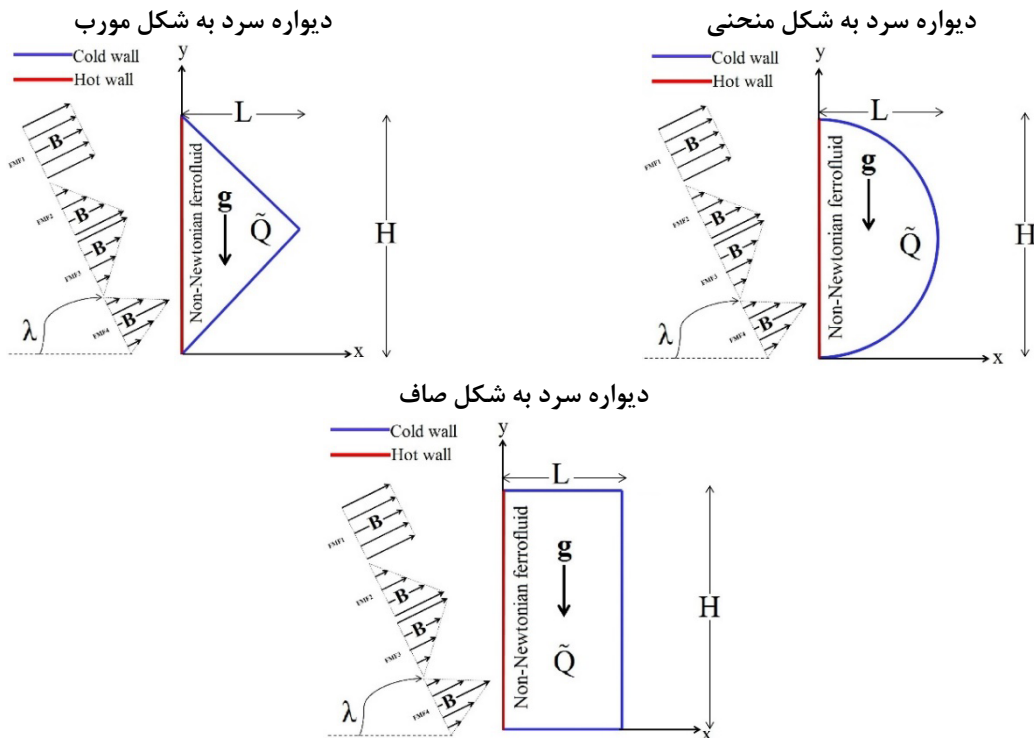
Fe ₃ O ₄	آب	نماد (واحد)	خاصیت
۶۷۰	۴۱۷۹	(J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) C _p	ظرفیت حرارت ویژه
۶	۰/۶۱۳	(W.m ⁻¹ .K ⁻¹) k	ضریب هدایت حرارتی
۲۵۰۰۰	۰/۰۵	(Ω.m) σ	رسانایی الکتریکی
۱۳×۱۰ ^{-۶}	۲۱×۱۰ ^{-۵}	(K ⁻¹) β	ضریب انبساط حجمی
۵۲۰۰	۹۹۷/۱	(kg.m ⁻³) ρ	چگالی

محاسبه تابع جریان طبق معادله (۱۴) بوده و روابط مربوط به ارزیابی آنتروپی در معادله (۱۵) ارائه شده است. در مدل سازی سیال غیرنیوتنی، نرخ برش در هر گره متفاوت است و لزجت مقدار ثابتی ندارد. با توجه به اینکه سیال غیرنیوتنی در کار حاضر با مدل توانی تقریب زده شده است، محاسبه لزجت سینماتیکی برحسب نرخ برش در گره ها طبق معادله (۱۶) است [۲۳ و ۲۴]. متغیرهای بدون بعد استفاده شده در تحلیل و ارائه نتایج مطابق با معادله (۱۷) است. لازم به ذکر است مقدار آنتروپی تولید شده کل و عدد بجان (نسبت مقدار آنتروپی تولید شده ناشی از انتقال حرارت به مقدار آنتروپی کل) به صورت متوسط گیری شده طبق معادلات (۱۸) و (۱۹) بیان می شوند [۱۰-۱۲].

در جدول ۲ ارائه شده است. معادلات حاکم بر حل مسئله از جمله پیوستگی، مومنتوم و انرژی در روابط (۱) تا (۶) و روابط مربوط به مدل سازی نانوسیال در معادلات (۷) تا (۱۳) ارائه شده است. همچنین در جدول ۳ خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات ارائه شده است [۲۰-۲۲].

جدول (۲): فرضیات شبیه سازی.

(۱)	سیال غیرنیوتنی با مدل توانی و تراکم ناپذیر است.
(۲)	جریان دویعدی، آرام و پایا در نظر گرفته می شود.
(۳)	به جز چگالی که از فرضیه بوزینسک پیروی می کند، بقیه خواص ثابت هستند.
(۴)	لغزش و نفوذ سیال روی سطوح وجود ندارد.
(۵)	نیروی گرانش در کنار نیروی مغناطیسی به عنوان نیروهای خارجی اعمال می شود.
(۶)	نانوسیال به صورت جریان تک فاز فرض شده است و نانوذرات از نظر اندازه و شکل یکسان هستند.
(۷)	سیال پایه و نانوذرات در تعادل حرارتی هستند.
(۸)	از اتلاف ویسکوز صرف نظر شده است و اثرات تشعشع به عنوان نیروی حجمی در معادله انرژی در نظر گرفته می شود.



شکل (۱): هندسه و جزئیات مسئله مورد بررسی.

$$v(\mathbf{x},t)=v_0|\gamma|^{(n-1)}, \quad (16)$$

$$|\gamma|=\sqrt{2 \times 0.5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \times 0.5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}$$

$$Ra=\frac{(\rho\beta)_{NF}g\theta H^3}{\alpha_{BF}v_{BF}}, Pr=\frac{v_{BF}}{\alpha_{BF}}, RP=\frac{4T_C^3\sigma_R}{\beta_Rk_{BF}},$$

$$X=\frac{x}{L}, Y=\frac{y}{H}, U=\frac{uL}{\alpha_{BF}}, V=\frac{vH}{\alpha_{BF}}, TPI=\frac{Nu}{S}$$

$$Nu=\frac{1}{H} \int_0^1 -\frac{k_{NF}}{k_{BF}}\left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_{X=0} dY, Be=\frac{S_{HT}}{S}, \quad (17)$$

$$\Delta=\frac{H^2\tilde{Q}}{(\rho C_p)_{NF}\alpha_{BF}}, Ha=BH^n \sqrt{\frac{\sigma_{NF}\alpha^{1-n}}{\mu_{BF}}}, \theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c}$$

$$S=\int_0^1 \int_0^1 S dx dy = \int_0^1 \int_0^1 [S_{FF} + S_{HT} + S_{MF}] dx dy \quad (18)$$

$$Be=\int_0^1 \int_0^1 \frac{S_{HT}}{[S_{FF} + S_{HT} + S_{MF}]} dXdY \quad (19)$$

در روابط فوق، زیرنویس‌های HT، FF و MF به ترتیب نشان‌دهنده انتقال حرارت، اصطکاک سیال و میدان مغناطیسی است. همچنین شرایط مرزی مسئله برحسب کمیات ماکروسکوپی، طبق معادله (۲۰) است.

$$\text{Vertical left wall: } \begin{cases} U=V=\Psi=0 \\ \theta=\sin(\pi Y) \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{Other walls: } U=V=\Psi=\theta=0$$

۳- روش شبکه بولتزمن

روش شبکه بولتزمن، یکی از روش‌های تحلیل در دینامیک سیالات محاسباتی است که موفقیت قابل توجهی در حل مسائل مختلف در جریان سیال و انتقال حرارت به دست آورده است. ایده اساسی این روش بر اساس نظریه انرژی جنبشی ذرات برای مطالعه حرکت و برخورد ذرات است. معادله شبکه بولتزمن یک معادله تکاملی ساده برای تابع توزیع ذره است که نشان‌دهنده احتمال یافتن یک ذره در محدوده معینی از مکان و سرعت شبکه در یک زمان خاص است. معادله اصلی روش بولتزمن، برای محاسبه میدان‌های چگالی و سرعت با عبارت نیروی خارجی (F)، به صورت معادله (۲۱) بیان می‌شود. همچنین معادله بولتزمن برای میدان دما به صورت رابطه (۲۲) ارائه می‌شود [۲۷-۲۵]. برای مدل‌سازی تشعشع حرارتی، نیروی حجمی به‌عنوان

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{-\frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y}\right)}{\rho_{NF}} \quad (2)$$

$$+ \frac{\sigma_{NF}B^2}{\rho_{NF}}(v\sin\lambda\cos\lambda - u\cos^2\lambda)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{-\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}\right)}{\rho_{NF}} \quad (3)$$

$$\frac{g(\rho\beta)_{NF}(T-T_c) + B^2\sigma_{NF}(u\sin\lambda\cos\lambda - v\sin^2\lambda)}{\rho_{NF}}$$

$$\tau_{ij}=\mu_{NF}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (4)$$

$$\mu=\mu_0 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \right\}^{\frac{(n-1)}{2}} \quad (5)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{NF} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\tilde{Q}}{(\rho C_p)_{NF}} \right] + \frac{1}{(\rho C_p)_{NF}} \frac{\partial q_R}{\partial y} \quad (6)$$

$$\mu_{NF}=\mu_{PF}(1-\phi_{NP})^{-2.5} \quad (7)$$

$$\rho_{NF}=[\rho\phi]_{NP} + \rho_{PF}(1-\phi_{NP}) \quad (8)$$

$$(\rho C_p)_{NF}=[(\rho C_p)\phi]_{NP} + (\rho C_p)_{PF}(1-\phi_{NP}) \quad (9)$$

$$(\rho\beta)_{NF}=[(\rho\beta)\phi]_{NP} + (\rho\beta)_{PF}(1-\phi_{NP}) \quad (10)$$

$$\alpha_{NF}=\frac{k_{NF}}{(\rho C_p)_{NF}} \quad (11)$$

$$\sigma_{NF}=(\sigma\phi)_{NP} + \sigma_{PF}(1-\phi_{NP}) \quad (12)$$

$$\frac{k_{NF}}{k_{PF}}=\left[\frac{(k_{NP} + 2k_{PF}) - 2\phi_{NP}(k_{PF} - 2k_{NP})}{(k_{NP} + 2k_{PF}) + \phi_{NP}(k_{PF} - k_{NP})} \right] \quad (13)$$

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial y} \text{ and } v = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (14)$$

$$S = S_{FF} + S_{HT} + S_{MF}$$

$$S_{FF} = \frac{\mu_{NF}}{T_h + T_c} \left[2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \right) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \right]$$

$$S_{HT} = \frac{k_{NF}}{(T_h + T_c)^2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 \right] \quad (15)$$

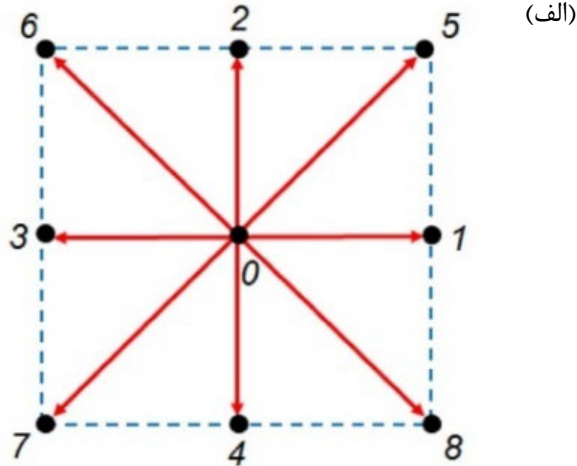
$$S_{MF}^{\lambda=90^\circ} = \frac{B^2\sigma_{NF}}{T_h + T_c} v^2 \text{ and } S_{MF}^{\lambda=0} = \frac{B^2\sigma_{NF}}{T_h + T_c} u^2$$

$$\text{Density : } \rho = \sum_{i=0}^8 f_i, \text{ Velocities : } \mathbf{u} = \frac{\sum_{i=0}^8 \mathbf{c}_i f_i}{\rho}, \quad (25)$$

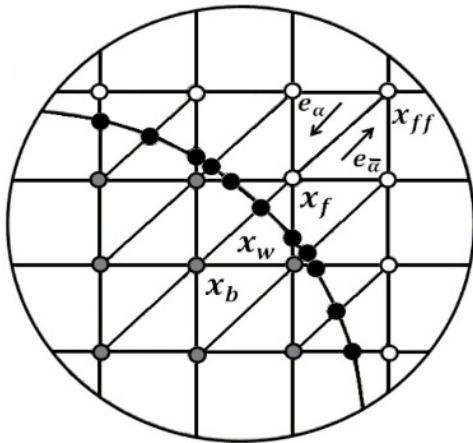
$$\text{Temperature : } T = \sum_{i=0}^8 h_i$$

$$\text{Discrete velocities : } \mathbf{c}_i = \begin{pmatrix} c_{ix} \\ c_{iy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$\text{Weighting factor : } \omega_0 = \frac{4}{9}, \omega_{1,4} = \frac{1}{9}, \omega_{3,8} = \frac{1}{36}$$



(الف)



(ب)

شکل (۲): (الف) آرایش شبکه D_2Q_9 ; (ب) نمای مرز منحنی. برای اعمال شرایط مرزی روی دیواره‌های صاف از روش کمانه کردن استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن شکل ۲ الف، شرایط مرزی روی دیواره عمودی و گرم محفظه مطابق با معادله (۲۷) است [۲۵-۲۷]. در این روش، توابع توزیع ناشناخته وارد شده به دامنه محاسباتی برحسب توابع توزیع شناخته شده خارج از حوزه محاسباتی تعیین می‌شوند.

جمله چشمه و برای نشان دادن اثر جذب/تولید حرارت، عبارتی حاوی قدرت این پدیده به معادله میدان دما اضافه می‌شود. روابط مربوط به مدل‌سازی تشعشع با استفاده از روش شبکه بولتزمن در معادله (۲۳) ارائه شده است [۱۴]. در روابط ارائه شده، بالانویس (eq) بیانگر متغیر تعادلی است. برای تعیین لزجت سینماتیکی بر اساس محاسبه نرخ برش در گره‌ها بر مبنای روش شبکه بولتزمن مطابق با معادله (۱۶)، از معادله (۲۴) استفاده می‌شود [۱۸].

کمیات ماکروسکوپی حاصل شده از توابع توزیع مربوط به میدان‌های جریان و دما نیز طبق معادله (۲۵) محاسبه می‌شوند. از آنجایی که برای مدل‌سازی میدان جریان و میدان دما از آرایش شبکه D_2Q_9 استفاده شده است (به شکل ۲ توجه شود)، ضرایب وزنی و سرعت‌های گسسته شبکه طبق رابطه (۲۶) محاسبه می‌شود. اطلاعات بیشتر راجع به جزئیات این نوع آرایش شبکه، در مراجعی چون [۵، ۶ و ۲۶] ذکر شده است.

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = f_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[f_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - f_i(\mathbf{x}, t)]}{(3\nu(\mathbf{x}, t) + 0.5)} + F_i, \quad (21)$$

$$F_i = F_x + F_y,$$

$$F_x = -3\omega_i \rho_{BF} Ha^2 \left(\frac{\mu_{NF}}{H^2}\right) [V \sin \lambda \cos \lambda - U \sin^2 \lambda],$$

$$F_y = 3\omega_i g(\rho\beta)_{NF} \theta - 3\omega_i \rho_{BF} Ha^2 \left(\frac{\mu_{NF}}{H^2}\right) [U \sin \lambda \cos \lambda - V \cos^2 \lambda],$$

$$f_i^{eq} = \omega_i [1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}) - \frac{9}{2}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{3}{2}(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2]$$

$$h_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = h_i(\mathbf{x}, t) + \frac{[h_i^{eq}(\mathbf{x}, t) - h_i(\mathbf{x}, t)]}{(3\alpha(\mathbf{x}, t) + 0.5)} + \frac{\tilde{Q}}{(\rho C_p)_{NF}} (T - T_c) - \frac{\omega_i}{(\rho C_p)_{NF}} \nabla \cdot \vec{q}_R, \quad (22)$$

$$h_i^{eq} = \omega_i T [1 + 3(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})],$$

$$\vec{q}_R = -\frac{4}{3} \frac{\sigma}{\beta_R} \frac{\partial T^4}{\partial Y}, \quad T^4 = 4T_c^3 T - 3T_c^4$$

$$I_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i, t + 1) = I_i(\mathbf{x}, t) - \frac{[I_i(\mathbf{x}, t) - I_i^{eq}(\mathbf{x}, t)]}{\tau_r} \quad (23)$$

$$\tau_r = \frac{1}{\beta_R c_i}, \quad I_i^{eq} = \sum_{i=1}^8 I_i$$

$$\gamma_{ij} = -\frac{3}{2\rho c^2 (3\nu(\mathbf{x}, t) + 0.5)} \sum_{i=0}^8 c_{ix} c_{iy} (f_i - f_i^{eq}) \quad (24)$$

$$\begin{cases} \text{if } \Delta_{\text{curved}} > 0.75 \rightarrow T_b^* = T_{b1} \\ \text{if } \Delta_{\text{curved}} \leq 0.75 \rightarrow T_b^* = T_{b1} + (1 - \Delta_{\text{curved}})T_{b2} \end{cases} \quad (36)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_{b1} = \frac{1}{\Delta_{\text{curved}}} [\bar{\mathbf{u}}_w + (\Delta_{\text{curved}} - 1)\bar{\mathbf{u}}_f] \quad (37)$$

$$\bar{\mathbf{u}}_{b2} = \frac{1}{(1 + \Delta_{\text{curved}})} [2\bar{\mathbf{u}}_w + (\Delta_{\text{curved}} - 1)\bar{\mathbf{u}}_{ff}] \quad (38)$$

$$T_{b1} = \frac{1}{\Delta_{\text{curved}}} [T_w (\Delta_{\text{curved}} - 1)T_f] \quad (39)$$

$$T_{b2} = \frac{1}{(1 + \Delta_{\text{curved}})} [2T_w (\Delta_{\text{curved}} - 1)T_{ff}] \quad (40)$$

در روابط فوق، زیرنویس c و h به ترتیب بیانگر دمای سرد و گرم سیستم است و q_R نشان دهنده ترم تشعشع است. محاسبات صورت گرفته مراحل را طی می‌کند که عبارت‌اند از: ۱- اختصاص مقادیر ثابت مثل چگالی، ۲- محاسبه زمان‌های آسایش، ۳- محاسبه توابع توزیع مربوط به میدان جریان و میدان دما، ۴- محاسبه ترم تشعشع در توابع توزیع بر اساس ارضای شرایط مرزی، بازگشت به مرحله تعیین مقدار توابع توزیع تعادلی و تکرار مراحل تا زمان همگرایی نتایج.

۴- معبرسازی شبیه‌سازی

به‌منظور نشان دادن مستقل بودن نتایج از شبکه انتخاب‌شده، در شکل ۳ عدد ناسلت متوسط به ازای ابعاد مختلف شبکه برای حالات مختلف ارائه شده است. با توجه به اختلاف ناچیز بین مقادیر مرتبط با شبکه 120×240 و شبکه 140×280 ، شبکه با ابعاد 120×240 برای انجام شبیه‌سازی انتخاب شد. لازم به توضیح است که معیار اتمام محاسبات برای کم کردن هزینه محاسبات و حصول دقت مناسب بر طبق رابطه (۴۱) می‌باشد. شاخص b، بیانگر گام حل می‌باشد.

$$\text{Convergence index} : \frac{Nu^{b+1} - Nu^b}{Nu^b} \leq 10^{-4} \quad (41)$$

کد نوشته‌شده به زبان فرترن با مطالعه الیس و همکاران [۲۸] در شکل ۴ برای صحت‌سنجی آنتروپی، با مطالعه مسعودی و همکاران [۲۹] در شکل ۵ الف برای سنجش دقت مدل‌سازی تشعشع، با مطالعه بای و همکاران [۱۶] در

$$\begin{cases} \text{Velocity: } f_1=f_3, f_5=f_7, f_8=f_6 \\ \text{Temperature: } \begin{cases} h_1 = [\omega(1) + \omega(3)] \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) - h_3 \\ h_5 = [\omega(5) + \omega(7)] \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) - h_7 \\ h_8 = [\omega(6) + \omega(8)] \sin\left(\frac{\pi y}{H}\right) - h_6 \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

به دلیل تعریف شبکه بولتزمن در مختصات دکارتی، برای اعمال دقیق‌تر شرایط مرزی روی مرزهای غیر صاف، شرایط مرزی مختص مرز منحنی اعمال می‌شود [۱۰]. در این روش مطابق با شکل ۲ ب، بر اساس موقعیت قرارگیری گره مرزی w (تقاطع مرز منحنی با شبکه دکارتی) بین دو گره b (گره ناحیه جامد) و f (گره اول در حوزه محاسباتی)، متغیر Δ_{curved} به صورت معادله (۲۸) تعریف می‌شود.

$$\Delta_{\text{curved}} = \left| \frac{X_f - X_w}{X_f - X_b} \right| \quad (28)$$

تابع توزیع مجازی برای گره b در جهت عمود بر سطح منحنی، بر اساس درون‌یابی خطی، با توجه به معادله (۲۹) تا (۳۱) محاسبه می‌شود [۶]:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_a(\vec{\mathbf{x}}_b, t) &= (1 - \chi)\tilde{f}_a(\vec{\mathbf{x}}_f, t) + \chi f_a^*(\vec{\mathbf{x}}_b, t) \\ &- \frac{3}{c^2} 2\rho\omega_a(\vec{\mathbf{x}}_f, t)\vec{\mathbf{c}}_a \cdot \vec{\mathbf{u}}_w \end{aligned} \quad (29)$$

$$f_a^*(\vec{\mathbf{x}}_b, t) = f_a^{\text{eq}}(\vec{\mathbf{x}}_f, t) + \rho\omega_a(\vec{\mathbf{x}}_f, t) \frac{3}{c^2} \vec{\mathbf{c}}_a \cdot (\vec{\mathbf{u}}_{bf} - \vec{\mathbf{u}}_f) \quad (30)$$

$$\begin{cases} \text{if } 0 \leq \Delta_{\text{curved}} < 0.5 \rightarrow \\ \vec{\mathbf{u}}_{bf} = \vec{\mathbf{u}}_{ff} = \vec{\mathbf{u}}(\vec{\mathbf{x}}_{ff}, t), \chi = \frac{2\Delta_{\text{curved}} - 1}{(3\nu + 0.5) - 1} \\ \text{if } 0.5 \leq \Delta_{\text{curved}} \leq 1 \rightarrow \\ \vec{\mathbf{u}}_{bf} = \vec{\mathbf{u}}_f + \frac{3}{2\Delta_{\text{curved}}} (\vec{\mathbf{u}}_w - \vec{\mathbf{u}}_f), \chi = \frac{2\Delta_{\text{curved}} - 1}{(3\nu + 0.5) - 0.5} \end{cases} \quad (31)$$

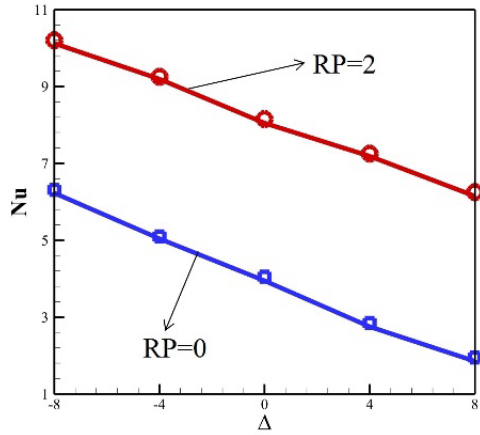
شرایط مرزی مرتبط با میدان دما، مشابه با میدان سرعت، طبق معادلات (۳۲) تا (۴۰) ارائه می‌شود [۶، ۱۰ و ۱۸].

$$\tilde{h}_a(\vec{\mathbf{x}}_b, t) = \tilde{h}_a^{\text{eq}}(\vec{\mathbf{x}}_b, t) + \left(1 - \frac{1}{(3\alpha + 0.5)}\right) h_a^{\text{neq}}(\vec{\mathbf{x}}_b, t) \quad (32)$$

$$h_a^{\text{eq}}(\vec{\mathbf{x}}_b, t) = \omega_a T_b^*(\vec{\mathbf{x}}_b, t) \left[1 + \frac{3}{c^2} (\vec{\mathbf{c}}_a \cdot \vec{\mathbf{u}}_b^*)\right] \quad (33)$$

$$h_a^{\text{neq}}(\vec{\mathbf{x}}_b, t) = \Delta_{\text{curved}} h_a^{\text{neq}}(\vec{\mathbf{x}}_f, t) (1 - \Delta_{\text{curved}}) h_a^{\text{neq}}(\vec{\mathbf{x}}_{ff}, t) \quad (34)$$

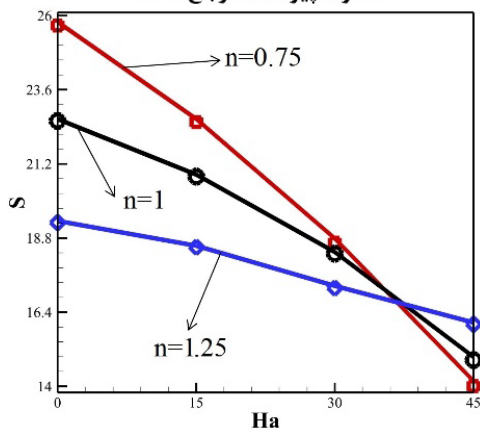
$$\begin{cases} \text{if } \Delta_{\text{curved}} > 0.75 \rightarrow \vec{\mathbf{u}}_b^* = \vec{\mathbf{u}}_{b1} \\ \text{if } \Delta_{\text{curved}} \leq 0.75 \rightarrow \vec{\mathbf{u}}_b^* = \vec{\mathbf{u}}_{b1} + (1 - \Delta_{\text{curved}})\vec{\mathbf{u}}_{b2} \end{cases} \quad (35)$$



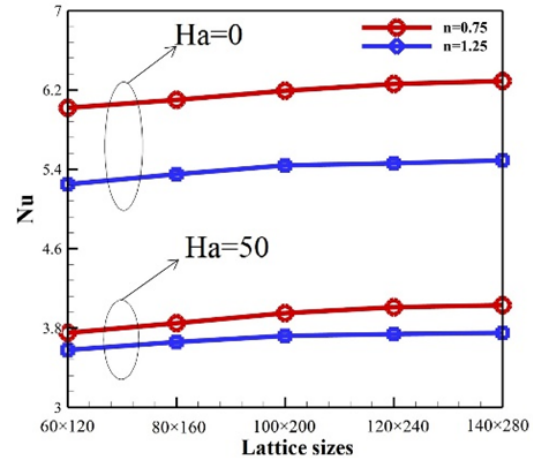
(الف)

شکل ۵ ب برای راستی آزمایی مدل‌سازی دقیق سیال توانی در حضور جذب/تولید حرارت و با مطالعه تیمار و مغلانی [۲۱] در شکل ۵ ج برای اطمینان از صحت شبیه‌سازی میدان مغناطیسی با وجود نانوسیال مقایسه شده است تا اطمینان از دقت حل حاصل شود. با توجه به اختلاف محدود بین نتایج شبیه‌سازی جابجایی طبیعی، می‌توان از صحت شبیه‌سازی انجام‌شده اطمینان حاصل نمود.

نمادها: پژوهش حاضر
خطوط پیوسته: مرجع [۲۹]

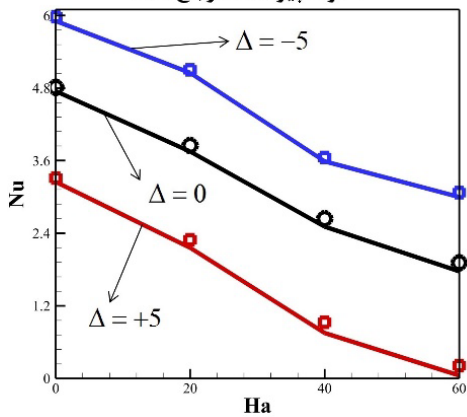


(ب)



شکل (۳): عدد ناسلت به ازای مقادیر مختلف ابعاد شبکه.

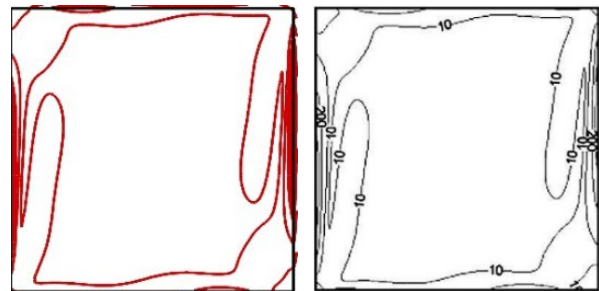
نمادها: پژوهش حاضر
خطوط پیوسته: مرجع [۱۶]



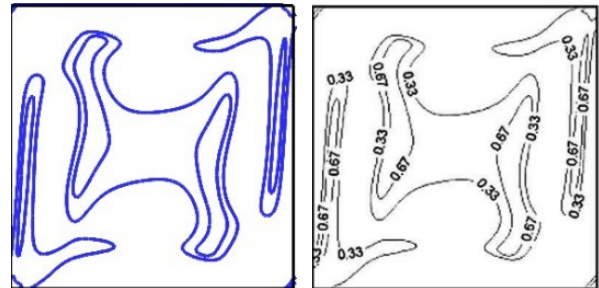
(ج)

مرجع [۲۸] کار حاضر

الگوی آنتروپی



الگوی عدد بجان



نمادها: پژوهش حاضر
خطوط پیوسته: مرجع [۲۱]

شکل (۵): مقایسه مقداری بین کار حاضر و مراجع.

شکل (۴): مقایسه توصیفی بین کار حاضر و مرجع [۲۸].

۵- ارائه و تحلیل نتایج

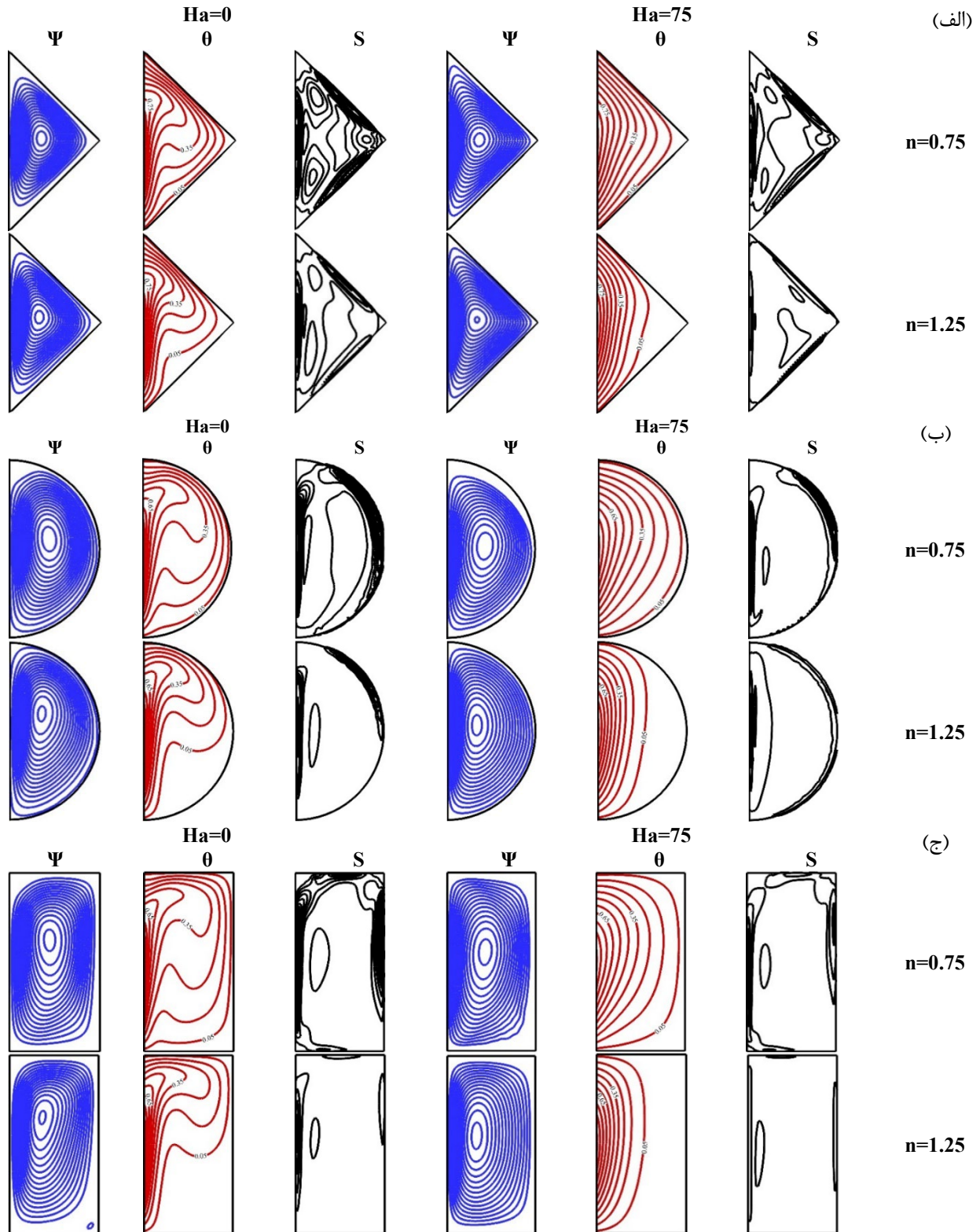
تمام شبیه‌سازی‌ها به ازای عدد رایلی 10^5 ارائه شده است.

۵-۱- اثر شکل دیواره، شاخص توانی و عدد هارتمن

در این بخش، نتایج حاصل شده به ازای $RP=0.25, \lambda=90^\circ, MFM1, \Delta=0$ بر طبق شکل ۶، برای انواع مختلف شکل دیواره و مقادیر شاخص توانی و عدد هارتمن، شکل گیری گردابه‌ای واحد قابل مشاهده است. زیرا سیال از طریق دیواره سمت چپ گرم شده و به دلیل کاهش چگالی به سمت بالا حرکت می‌کند و این عامل منجر به ایجاد گردابه‌ای ساعت گرد می‌شود. افزایش مقدار شاخص توانی سیال، لایه مرزی حرارتی را در قسمت پایینی سمت راست محفظه افزایش می‌دهد که این موضوع برخلاف شکل دیواره صاف و منحنی، برای شکل دیواره مورب، چندان بارز نیست. از طرفی وجود میدان مغناطیسی اگرچه تا حد کمی شکل خطوط جریان را تغییر می‌دهد، اما بیشترین اثر را روی خطوط هم‌دما دارد. به ازای $Ha=75$ ، خطوط هم‌دما به‌طور کامل به موازات دیواره گرم قرار می‌گیرند و این اثر نشان از غلبه هدایت بر جابجایی دارد. همچنین دیده می‌شود که افزایش قدرت میدان مغناطیسی و شاخص توانی در کاهش آنتروپی نقش مؤثری دارند. از آنجایی که افزایش عدد هارتمن، گرادیان دما و سرعت را کاهش می‌دهد، قابل مشاهده است که تراکم خطوط آنتروپی در مجاورت دیواره‌ها به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. با توجه به جدول ۴، با افزایش مقدار عدد هارتمن و شاخص توانی سیال، از قدرت جریان کاسته می‌شود. این اثر برای دیواره مورب کمتر از دو شکل دیگر دیواره است. در حالت دیواره مورب، به دلیل کمبود فضای لازم برای ایجاد چرخشی قوی برای سیال، بدیهی است که قدرت جریان کمتر از دو حالت دیگر باشد. تغییرات سرعت عمودی برحسب شکل دیوار در وسط دیواره گرم به ازای $Ha=0$ و $n=0.75$ در شکل ۷ الف نشان می‌دهد که بالاترین مقدار سرعت در نزدیکی دیواره گرم است، جایی که سیال شروع به گرم شدن می‌کند و با کاهش چگالی به سمت بالای محفظه حرکت می‌کند.

دیده می‌شود که بیشترین سرعت، مربوط به حالتی است که دیواره سرد به‌صورت صاف طراحی شود. زیرا در این حالت، سیال بیشترین فضا را برای گردش و تبادل حرارت دارد. با

افزایش فاصله از دیواره گرم، اختلاف سرعت با تغییر شکل دیوار مشهودتر است. برای دیواره منحنی و $n=1$ ، تغییرات سرعت در شکل ۷ ب نشان می‌دهد که به ازای افزایش عدد هارتمن، میزان سرعت چرخش سیال درون محفظه به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. زیرا بر طبق معادله (۳)، با اعمال نیروی لورنتز، نیرویی خلاف گرانش بر سیال اعمال می‌شود که در برابر حرکت سیال مقاومت می‌کند. نکته مهم این است که به ازای $Ha=75$ پروفیل سرعت به‌صورت افقی است، یعنی در این حالت سرعت سیال بسیار محدود شده و هدایت حرارتی غالب است. با مقایسه قسمت‌های الف و ب از شکل ۷، کاهش سرعت عمودی به ازای افزایش شاخص توانی قابل استنباط است. زیرا با افزایش شاخص توانی، بر اساس معادله (۱۶)، لزجت سیال افزایش می‌یابد که این عامل منجر به کاهش سهولت حرکت سیال می‌شود. این مفهوم را به‌طور واضح می‌توان از شکل ۷ ج که تغییرات سرعت افقی را برحسب شاخص توانی سیال نشان می‌دهد، استنتاج کرد. تسلط هدایت حرارتی بر جابجایی به ازای افزایش عدد هارتمن در شکل ۸ قابل مشاهده است. جایی که پروفیل دما با افزایش قدرت میدان مغناطیسی به سمت خطی شدن متمایل می‌شود. زیرا هر چه تمایل پروفیل دما به سمت خطی شدن بیشتر باشد، کاهش قدرت جابجایی مشهود می‌شود. اختلاف اندک بین توزیع دمای دو مقدار عدد هارتمن ۵۰ و ۷۵، دلیل انتخاب محدوده ۰-۷۵ برای عدد هارتمن بوده است. با توجه به شکل ۹ الف برای دیواره منحنی، بیشترین مقدار عدد ناسلت متعلق به کمترین شاخص توانی است. همچنین افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش نرخ انتقال حرارت شده که این اثر با افزایش شاخص توانی، کاهش می‌یابد. کاهش عدد ناسلت به ازای افزایش عدد هارتمن برای سیال نازک شونده در حدود ۴۹ درصد است درحالی‌که این اثر برای سیال نیوتنی و سیال ضخیم شونده به ترتیب در حدود ۴۰ درصد و ۳۳ درصد است. شکل ۹ ب برای $n=0.75$ نشان می‌دهد که با طراحی دیواره به شکل مورب علاوه بر دستیابی به کمترین مقدار عدد ناسلت، کمترین اثر میدان مغناطیسی وجود دارد. زیرا در این حالت اثرات جابجایی در مقایسه با دو شکل دیگر دیواره، کمترین است.



شکل (۶): خطوط جریان، هم‌دما و آنتروپی به ازای $\phi=0.04$ برای: (الف) دیواره سرد مورب؛ (ب) دیواره سرد منحنی؛ (ج) دیواره سرد صاف.

ازای سیال نازک‌شونده بیشترین است. هر چه شاخص توانی بیشتر شود، اهمیت شکل دیواره در تعیین نرخ انتقال حرارت کمتر می‌شود. زیرا در حالتی که سیال به صورت ضخیم‌شونده است، به دلیل دارا بودن لزجت زیاد، تمایل کمتری برای گردش بیشتر درون محفظه را دارد. عدد بجان (نسبت مقدار آنتروپی ناشی از انتقال حرارت به مقدار آنتروپی کل) معیاری مهم در تعیین عملکرد حرارتی سیستم است که به ازای حالات مختلف در جدول ۵ ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که با افزایش عدد هارتمن و شاخص توانی سیال به دلیل کم شدن اثرات جابجایی (به شکل ۶ توجه شود)، عدد بجان رشد می‌کند. به دلیل محدود بودن فضای حرکتی سیال به ازای دیواره مورب (پایین بودن قدرت نیروهای شناوری)، در این حالت نسبت به دیواره صاف و منحنی، سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی بیشترین است. زیرا در حالتی که اثرات جابجایی کم و محدود است، انتقال حرارت بیشترین سهم را در تولید آنتروپی دارد.

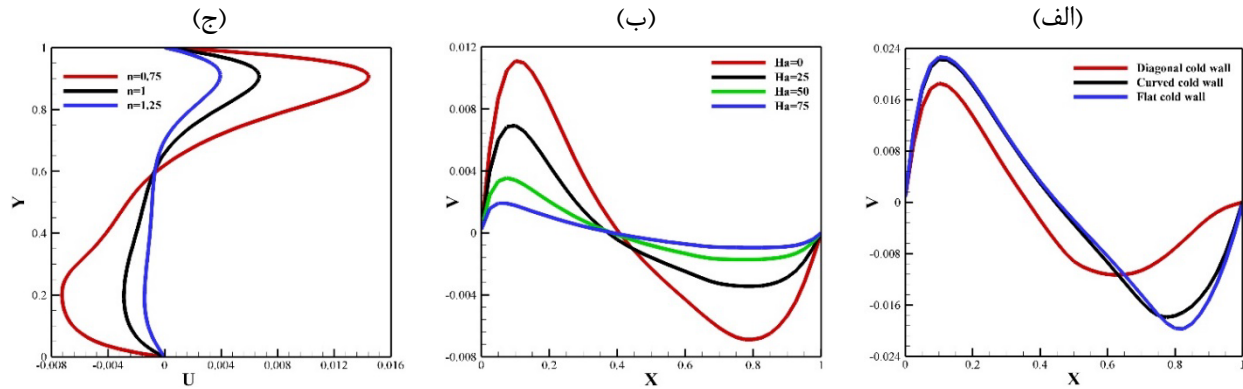
این موضوع از جدول ۴ نیز قابل استنباط است. کاهش قدرت جریان به‌واسطه افزایش عدد هارتمن و شاخص توانی کم شدن قدرت جریان به ازای طراحی دیواره به شکل مورب از دیگر نتایج قابل استنباط از جدول ۴ است. با توجه به قسمت‌های ۵ تا ۹ و از شکل ۹، افزودن نانوذرات به سیال پایه به دلیل بهبود رسانایی حرارتی سیال، مقدار عدد ناسلت را افزایش می‌دهد. بر طبق جدول ۵، از طریق افزایش عدد هارتمن می‌توان شاخص عملکرد سیستم را کاهش داد. زیرا در این حالت گرادین‌های دما و سرعت که بر طبق معادله (۱۵) بر میزان آنتروپی اثرگذار هستند، کاهش می‌یابد. بزرگ بودن این شاخص که بیانگر نسبت عدد ناسلت به مقدار آنتروپی تولیدی کل است، نشان می‌دهد مقدار بازگشت‌ناپذیری‌های ناشی از عوامل ایجاد آنتروپی (انتقال حرارت، میدان مغناطیسی و اصطکاک سیال) کاهش می‌یابد. با طراحی دیواره محفظه به شکل مورب، شاخص عملکرد حرارتی سیستم نسبت به طراحی صاف دیواره سرد تا حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. شکل ۹ ج برای $Ha=25$ نشان می‌دهد اثرگذاری طراحی دیواره بر مقدار عدد ناسلت به

جدول (۴): بیشینه مقدار خطوط جریان ($|\Psi_{MAX}|$) به ازای $\phi=0.04$.

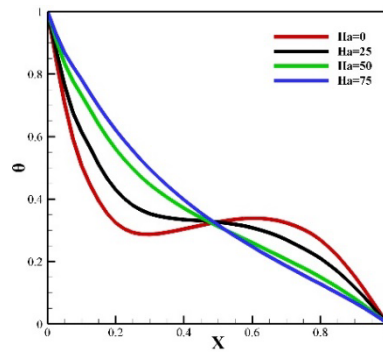
	دیواره سرد مورب			دیواره سرد منحنی			دیواره سرد صاف			
	n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	
	۰/۱۶۴	۰/۰۷۴	۰/۰۴۱	۰/۲۱۷	۰/۱۰۵	۰/۰۵۷	۰/۲۲۵	۰/۱۱۶	۰/۰۶۶	Ha=0
	۰/۱۰۴	۰/۰۴۶	۰/۰۲۷	۰/۱۱۸	۰/۰۵۸	۰/۰۳۶	۰/۱۳۶	۰/۰۶۴	۰/۰۴۱	Ha=25
	۰/۰۵۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۳	۰/۰۶۶	۰/۰۳۱	۰/۰۱۵	۰/۰۷۳	۰/۰۳۲	۰/۰۱۶	Ha=50
	۰/۰۳۸	۰/۰۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۳۹	۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۰/۰۴۱	۰/۰۱۷	۰/۰۰۷	Ha=75

جدول (۵): شاخص عملکرد حرارتی و عدد بجان به ازای $\phi=0.04$.

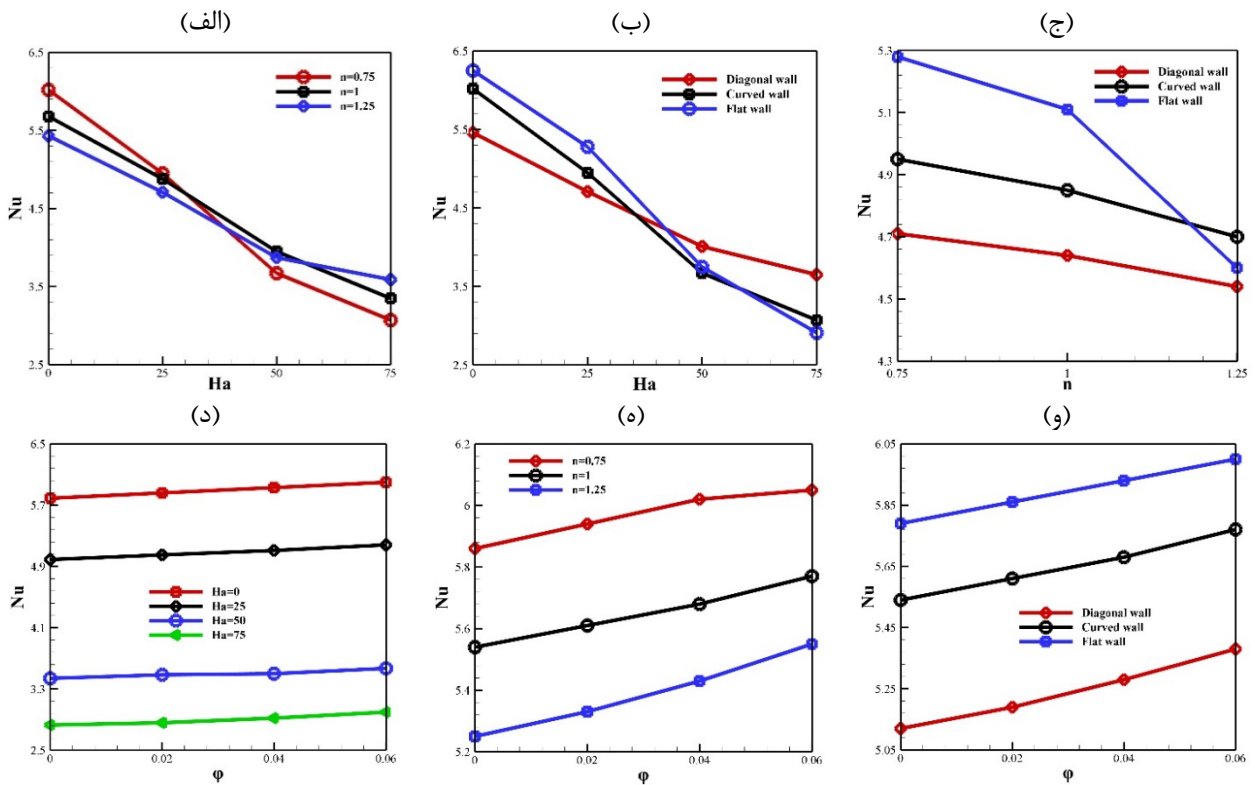
	دیواره سرد مورب			دیواره سرد منحنی			دیواره سرد صاف			
	n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	
	۰/۴۸۵	۰/۴۷۲	۰/۴۶۱	۰/۵۱۸	۰/۵۰۳	۰/۴۹۱	۰/۵۳۷	۰/۵۲۵	۰/۵۰۵	TPI
	۰/۴۱۸	۰/۴۲۵	۰/۴۳۱	۰/۴۳۷	۰/۴۵۱	۰/۴۳۸	۰/۴۷۷	۰/۴۵۲	۰/۴۷۱	Ha=0
	۰/۳۶۲	۰/۳۶۷	۰/۳۹۲	۰/۳۲۸	۰/۳۳۴	۰/۳۶۵	۰/۳۴۷	۰/۳۴۱	۰/۳۴۵	Ha=25
	۰/۳۳۲	۰/۳۴۳	۰/۳۷۵	۰/۲۷۶	۰/۲۹۵	۰/۳۴۱	۰/۲۷۷	۰/۲۸۸	۰/۳۲۱	Ha=50
	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۸۱	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۷۸	۰/۸۴	۰/۹۱	Be
	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۸۱	۰/۸۹	۰/۹۳	Ha=0
	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۸۸	۰/۹۴	۰/۹۵	۰/۸۶	۰/۹۳	۰/۹۵	Ha=25
	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۹۷	Ha=50
										Ha=75



شکل (۷): تغییرات سرعت به ازای $\phi=0.04$.



شکل (۸): توزیع دما به ازای شکل دیواره منحنی و $n=1$ به ازای $\phi=0.04$.

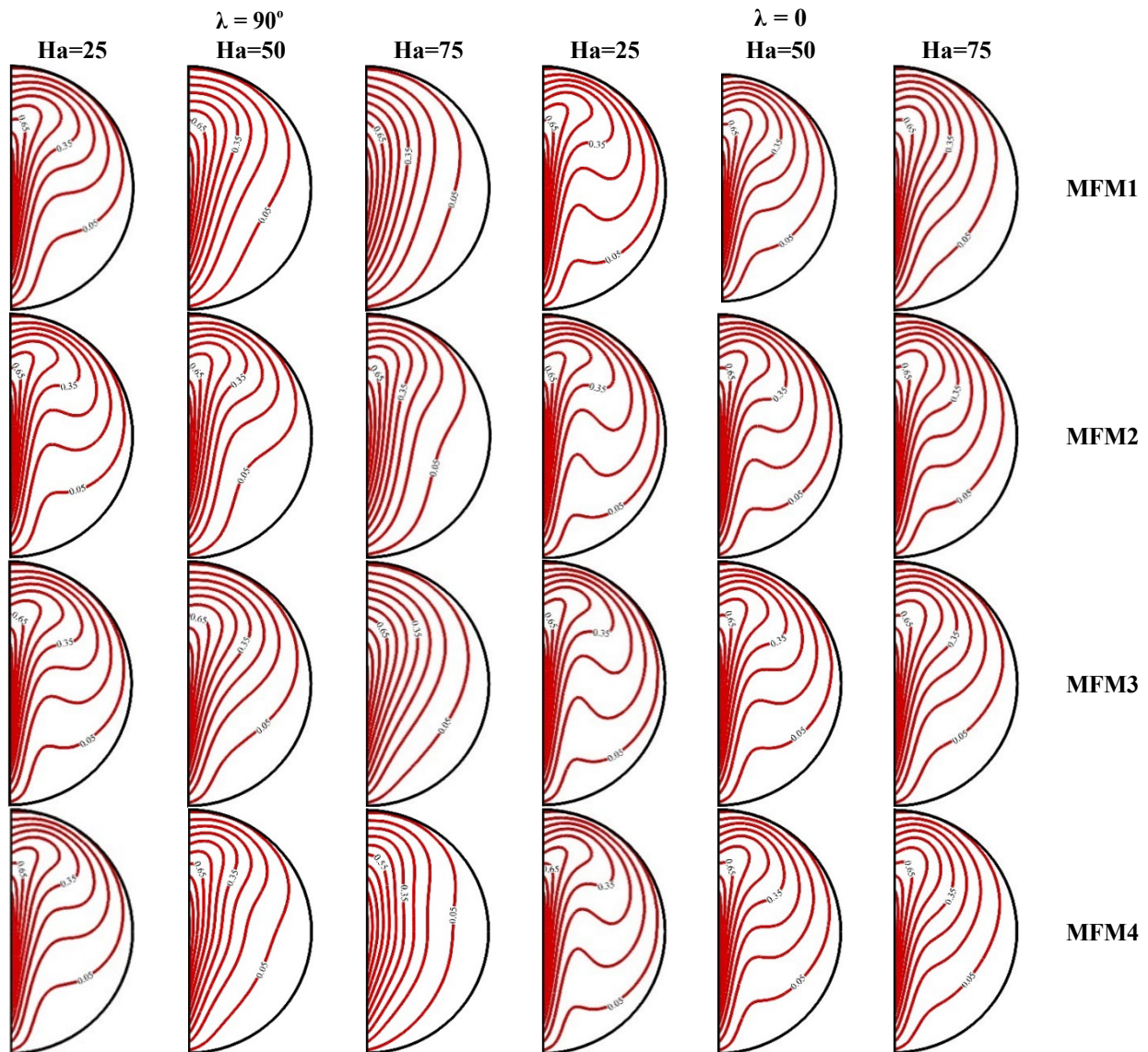


شکل (۹): مقدار ناسلت متوسط به ازای $\phi=0.04$.

۵-۲- اثر شکل و زاویه اعمال میدان مغناطیسی

در این بخش، نتایج برای دیواره منحنی و به ازای $RP=0.25$, $\phi=0.04$, $n=1$, $\Delta=0$ حاصل شده است. با توجه به شکل ۱۰ علاوه بر اینکه افزایش عدد هارتمن در تمامی اشکال اعمال میدان مغناطیسی منجر به کاهش انحناي خطوط هم‌دما می‌شود، تمایل قرارگیری خطوط به موازات دیواره گرم به ازای اعمال یکنواخت بیشتر است. زیرا هراندازه شکل اعمال میدان مغناطیسی بیشتر به سمت

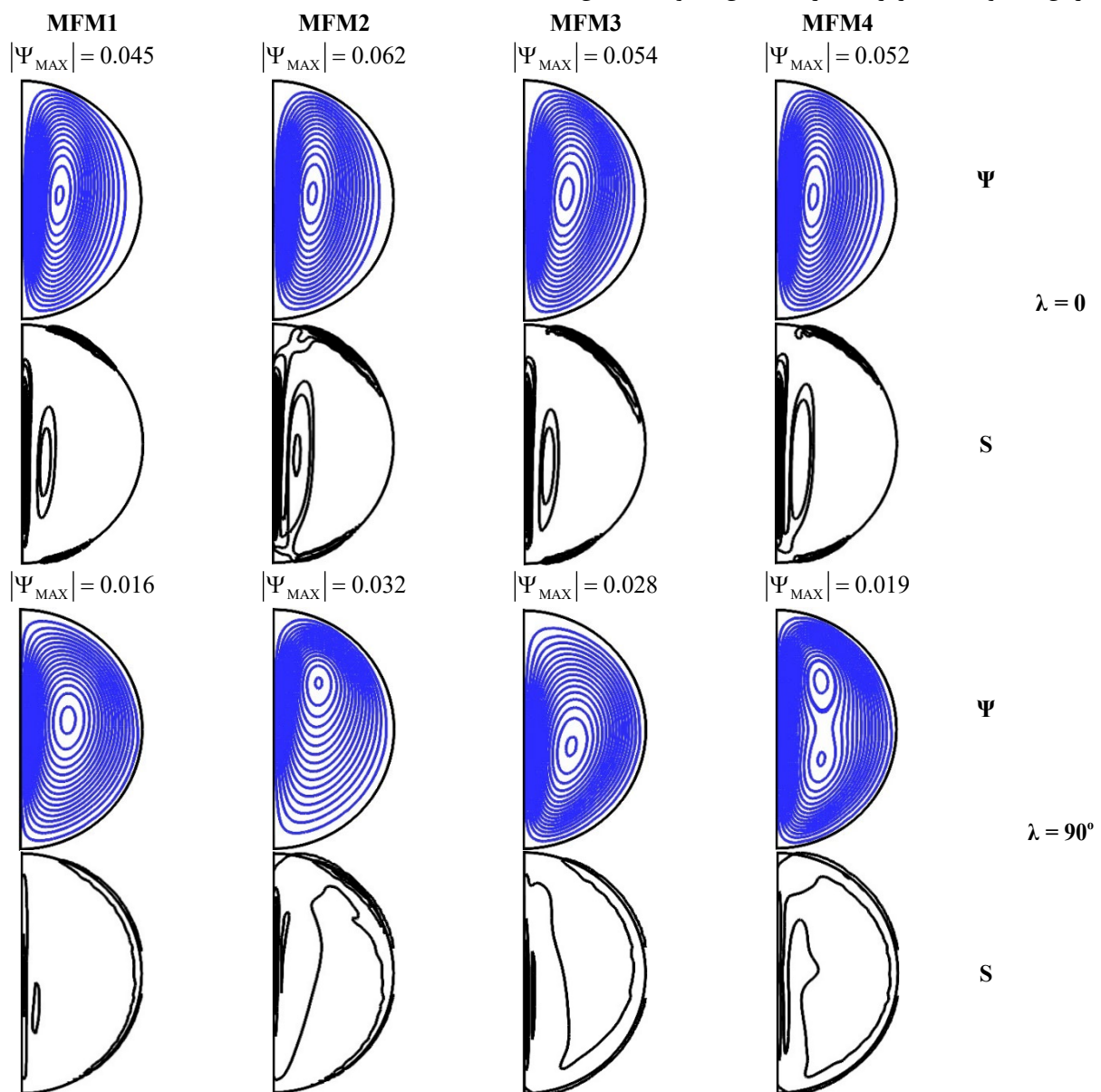
یکنواختی باشد، متوسط نیروی لورنتز (نیروی مقاوم در برابر جریان سیال) افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که می‌توان تأثیرگذاری میدان مغناطیسی را با اعمال به صورت عمودی کاهش داد. به‌علاوه تغییر شکل اعمال میدان مغناطیسی با اعمال افقی، محسوس‌تر می‌شود. نکته حائز اهمیت پیرامون خطوط هم‌دما، افزایش تأثیر شکل اعمال میدان مغناطیسی به ازای افزایش عدد هارتمن است.



شکل (۱۰): خطوط هم‌دما به ازای زاویه و شکل مختلف اعمال میدان مغناطیسی.

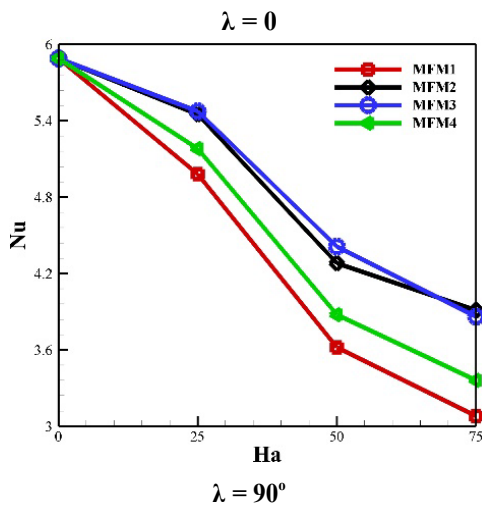
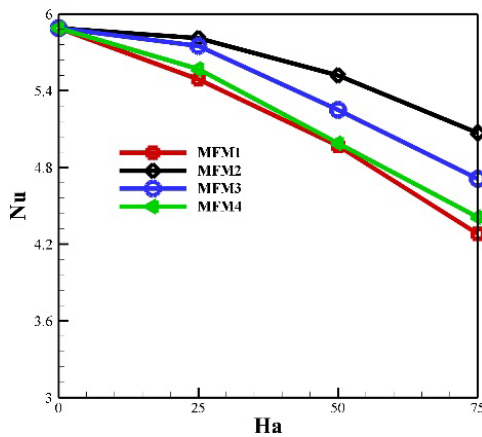
مغناطیسی نسبت به اعمال افقی، نکته شایان ذکر راجع به شکل ۱۲ است. زیرا در حالت عمودی اعمال میدان مغناطیسی، نیروی لورنتز هم جهت با نیروی گرانش عمل نمی‌کند و این عامل کاهنده کمتر سرعت است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با تغییر نوع اعمال میدان مغناطیسی، به شکل محسوسی می‌توان مشخصات جریان را تحت کنترل قرار داد به نحوی که به ازای اعمال به صورت MFM2 و MFM3 سرعت بیشترین است.

با توجه به شکل ۱۱، علاوه بر اینکه شکل خطوط جریان به ازای تغییر نوع و زاویه اعمال میدان مغناطیسی دستخوش تغییرات می‌شود، بر اساس مقدار نیروی لورنتز تحمیل شده به سیال، قدرت جریان شکل گرفته نیز متغیر است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود کمترین قدرت جریان متناسب با اعمال افقی میدان مغناطیسی به ازای MFM1 است. همچنین با توجه به شکل و قدرت خطوط جریان مشاهده می‌شود که تغییر در نوع اعمال میدان مغناطیسی به ازای اعمال افقی مشهودتر است. بیشتر بودن سرعت جریان، حدود ۱/۷ برابر، به ازای اعمال عمودی میدان



شکل (۱۱): خطوط جریان و آنتروپی در $Ha=75$.

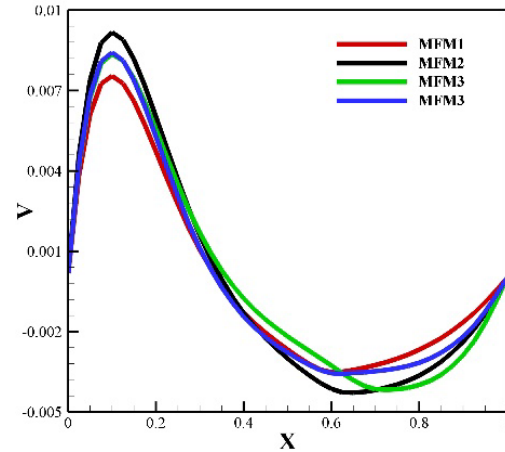
می‌دهد چنانچه میدان مغناطیسی غیریکنواخت و به صورت عمودی اعمال شود، سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی کاهش یافته و شاخص عملکرد حرارتی افزایش می‌یابد. زیرا به ازای $\lambda=0$ ، کاهش سرعت کمتر می‌شود و از این طریق سهم انرژی جنبشی ناشی از حرکت سیال در برابر سهم انتقال حرارت بیشتر شده و عدد بجان کمتری حاصل می‌شود.



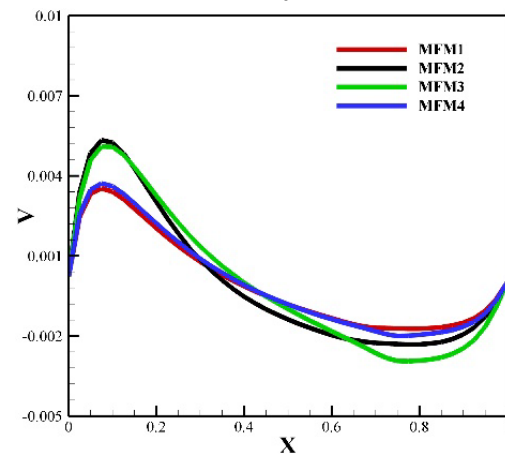
شکل (۱۳): مقدار ناسلت متوسط.

۵-۳- اثر جذب/تولید حرارت و تشعشع

در این بخش، نتایج برای دیواره منحنی و به ازای $\lambda=90^\circ$ MF1 حاصل شده است. با توجه به خطوط جریان به ازای مقادیر مختلف ضریب جذب/تولید حرارت در شکل ۱۴، علاوه بر کاهش قدرت جریان ناشی از افزایش عدد هارتمن، به ازای جذب حرارت در غیاب میدان مغناطیسی بالاترین قدرت جریان وجود دارد.



$\lambda = 0$



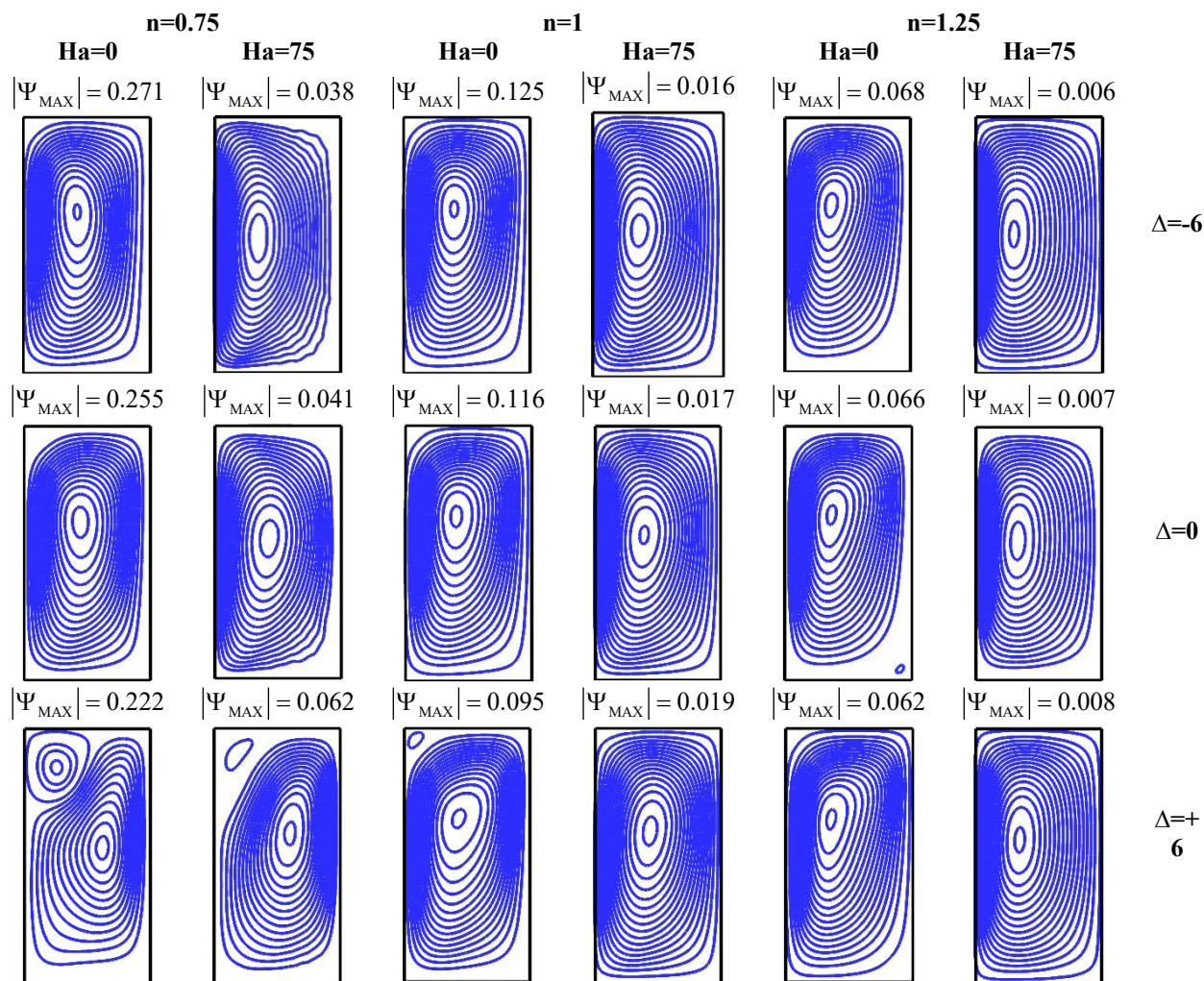
$\lambda = 90^\circ$

شکل (۱۴): تغییرات سرعت در $Ha=50$.

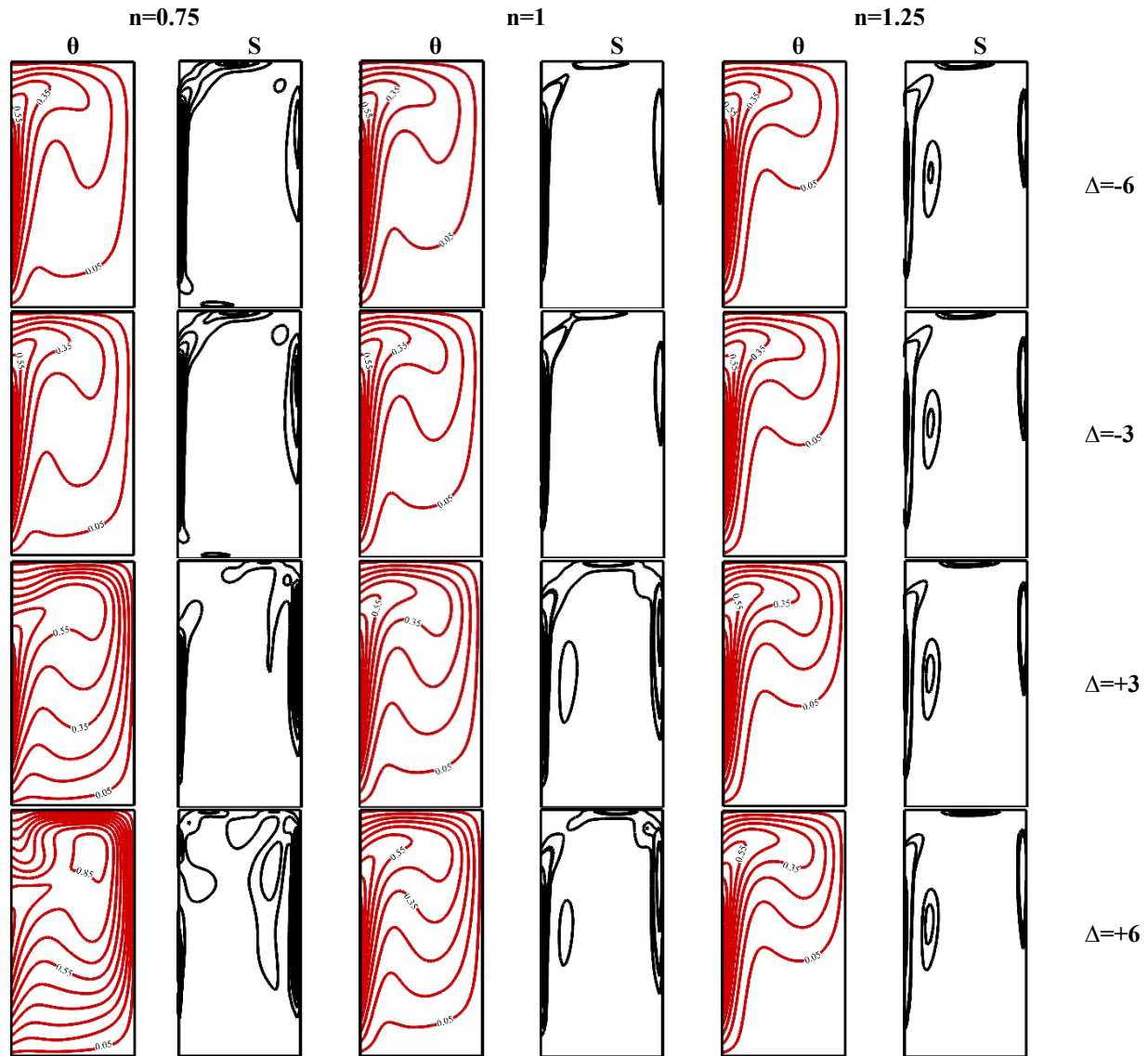
با توجه به شکل ۱۳، چنانچه بتوان میدان مغناطیسی را به صورت افقی اعمال کرد، می‌توان عدد ناسلت کمتری به دست آورد. زیرا در این حالت، نیروی لورنتز دقیقاً خلاف جهت نیروی گرانش عمل می‌کند. به عنوان نمونه برای اعمال یکنواخت، چنانچه میدان مغناطیسی به صورت افقی اعمال شود، کاهش عدد ناسلت در حدود ۴۸ درصد است درحالی‌که این مقدار برای اعمال عمودی در حدود ۲۷ درصد است. همچنین با اعمال میدان مغناطیسی به شکل‌های مختلف، اثر قدرت نیروی لورنتز بر مقدار عدد ناسلت، متفاوت جلوه می‌کند. با اعمال میدان مغناطیسی به صورت MF2 و MF3 بالاترین مقدار نرخ انتقال حرارت کسب می‌شود. تأیید این مطلب طبق مطالب بیان شده راجع به شکل ۱۲ قابل احراز است. جدول ۶ نشان

جدول ۶: شاخص عملکرد حرارتی و عدد بجان.

$\lambda = 0$				$\lambda = 90^\circ$			
MFM1	MFM2	MFM3	MFM4	MFM1	MFM2	MFM3	MFM4
TPI							
۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳	۰/۵۰۳
۰/۴۹۹	۰/۵۱۳	۰/۵۰۷	۰/۵۰۶	۰/۴۴۲	۰/۴۷۷	۰/۴۷۹	۰/۴۵۷
۰/۴۵۱	۰/۴۸۷	۰/۴۷۱	۰/۴۶۸	۰/۳۳۴	۰/۳۸۱	۰/۴۰۲	۰/۳۵۴
۰/۳۹۳	۰/۴۶۲	۰/۴۲۸	۰/۴۵۲	۰/۲۸۸	۰/۳۲۵	۰/۳۳۲	۰/۳۰۳
Be							
۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۷
۰/۸۹	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۹۱	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۹
۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۹۲
۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۹	۰/۹۲	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۵



شکل (۱۴): خطوط جریان به ازای $\phi=0.04, RP=0.25$.



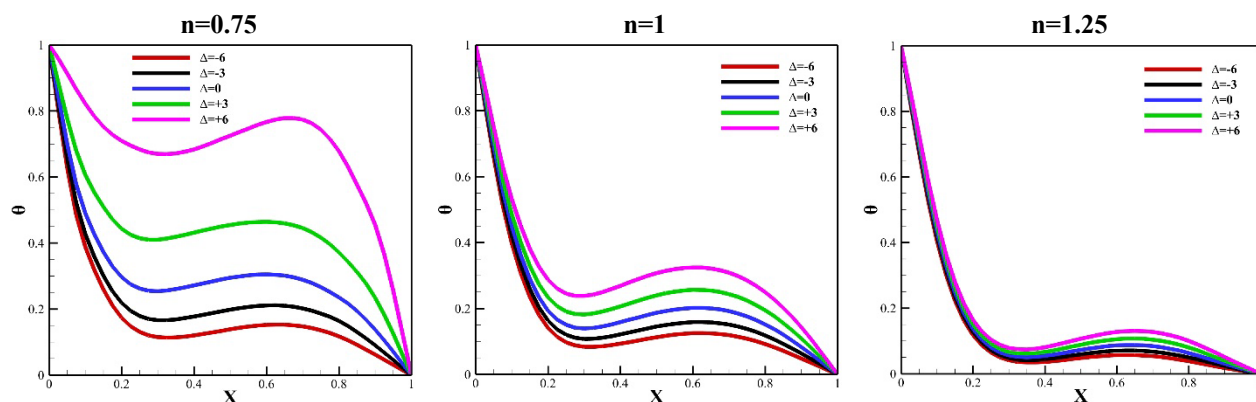
شکل (۱۵): خطوط هم‌دما و آنتروپی به ازای $\phi=0.04, Ha=0, RP=0.25$

گرم به خوبی مشهود است. برای حالت تولید حرارت، گرادیان خطوط هم‌دما روی دیوار گرم محفظه کاهش می‌یابد که بر این مبنای وجود انتقال حرارت کمتر از دیوار گرم به سیال قابل توجیه است. در عین حال می‌توان دید که بر طبق بقای انرژی، در حالت تولید حرارت، چگالی خطوط هم‌دما به صورت محسوسی افزایش می‌یابد. با توجه به خطوط آنتروپی، دیده می‌شود که در حالت تولید حرارت به دلیل ایجاد برگشت‌ناپذیری‌های ایجاد شده، تراکم خطوط در مجاورت دیواره سرد محفظه به شدت افزایش می‌یابد. نکته حائز اهمیت، کاهش اثرپذیری الگوهای جریان به ازای

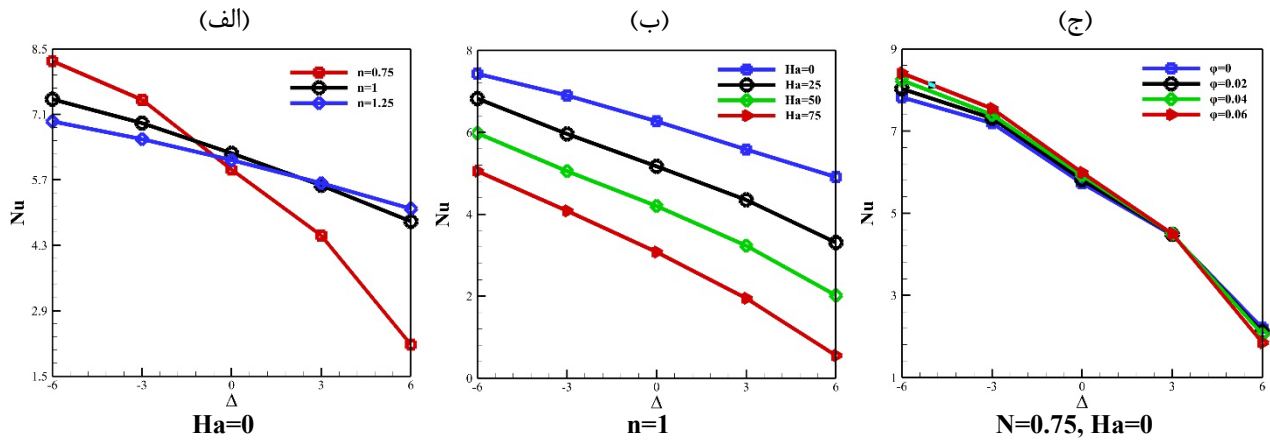
اما به ازای $Ha=75$ ، به ازای افزایش مقدار ضریب جذب/تولید حرارت، قدرت جریان افزایش می‌یابد. همچنین دیده می‌شود به ازای تولید حرارت و برای $n \leq 1$ و به خصوص برای سیال نازک‌شونده، در گوشه بالایی و سمت چپ محفظه گردابه واحد شکسته شده و گردابه‌ای کوچک شروع به رشد می‌کند که در حضور میدان مغناطیسی اندازه این گردابه کوچک‌شده و به تدریج محو می‌شود. برای داشتن درکی بهتر از وجود جذب/تولید حرارت، در شکل ۱۵ خطوط هم‌دما و آنتروپی ارائه شده است. به ازای $\Delta < 0$ به دلیل ایجاد چاه حرارتی، تراکم بالای خطوط هم‌دما در مجاورت دیواره

می‌شود که به ازای بالاترین مقدار جذب حرارت این اثر بیشترین است. از آنجایی که با افزایش کسر حجمی نانوذرات به سیال پایه علاوه بر افزایش ضریب رسانایی حرارت سیال، افزایش لزجت نیز به وجود می‌آید، پس نمی‌توان همواره انتظار داشت با افزایش درصد نانوذرات انتقال حرارت بیشتری را داشته باشیم. این موضوع به ازای $\Delta = +6$ در شکل ۱۷ ج به وضوح مشاهده می‌شود. جایی که به ازای تولید حرارت و به دلیل وجود ذخیره انرژی درون نانوذرات، افزایش کسر حجمی اثر معکوس دارد و منجر به کاهش عدد ناسلت می‌شود. طبق شکل ۱۸ که الگوهای جریان را برای سیال نازک‌شونده و ضخیم‌شونده برای مقادیر مختلف پارامتر تشعشع نشان می‌دهد، افزایش سرعت و قدرت نانوسیال درون محفظه از طریق افزایش انرژی جنبشی سیال به ازای وجود تشعشع مشهود است. زیرا اضافه کردن تشعشع به جریان داخل محفظه، متغیر جدیدی را به معادله انرژی اضافه می‌کند. با توجه به وابستگی متقابل معادله انرژی و معادله مومنتوم، افزایش مقدار پارامتر تشعشع، افزایش قدرت جریان را منجر می‌شود. با توجه به تأثیر افزایش پارامتر تشعشع بر خطوط هم‌دما، بیشتر شدن انحنای تراکم بیشتر خطوط در مجاورت دیواره‌های سرد و گرم محفظه است که به نوبه خود افزایش انتقال حرارت را منجر می‌شود. افزایش گرادیان‌های دما و سرعت نتیجه تقویت مقدار پارامتر تشعشع است که سبب افزایش مقدار بازگشت‌ناپذیری در مجاورت دیواره‌ها (به‌خصوص دیوار سرد) می‌شود.

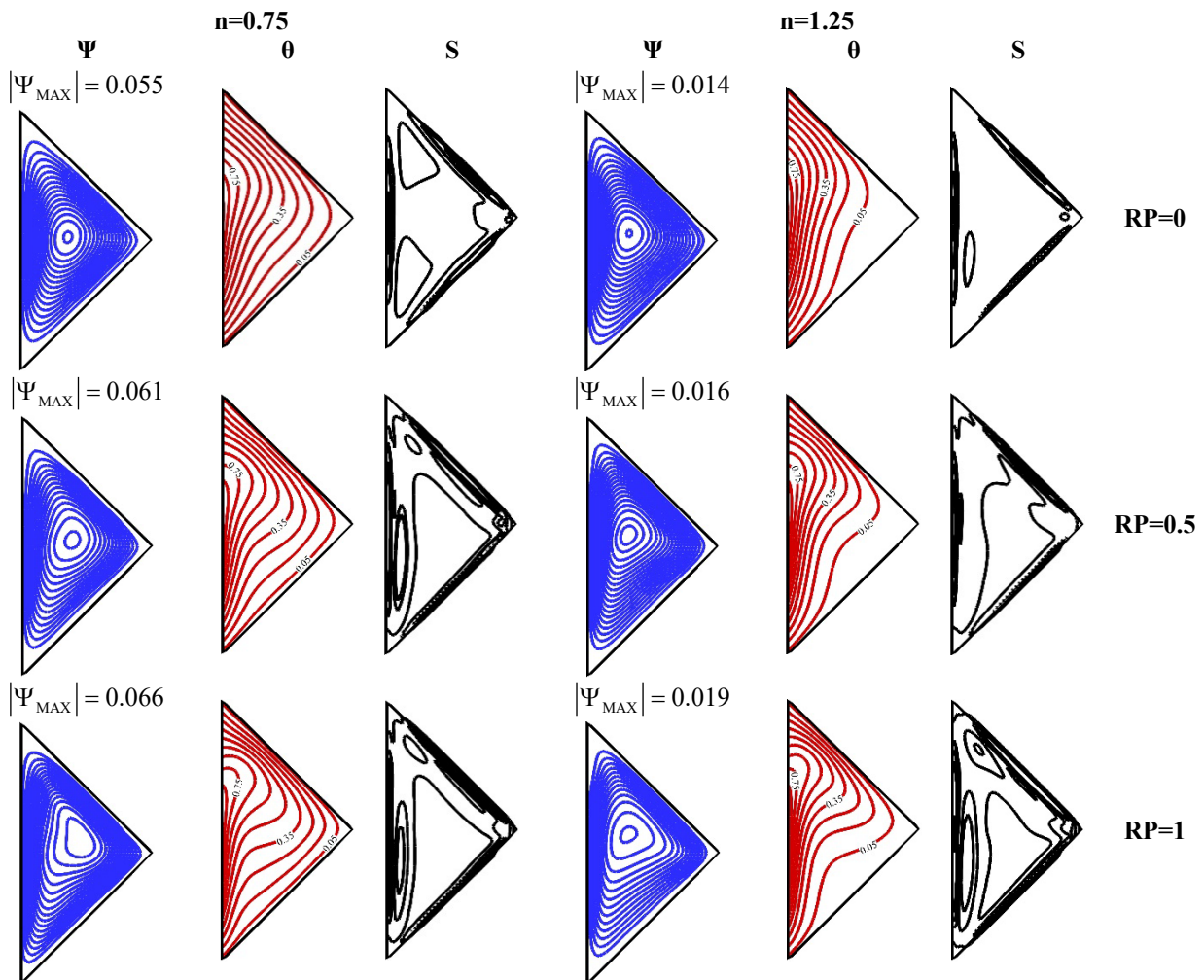
افزایش شاخص توانی سیال است. این مطلب را علاوه بر شکل ۱۵ می‌توان از شکل ۱۶ نیز استنباط کرد. بر طبق شکل ۱۶ در غیاب میدان مغناطیسی، تأثیر افزایش ضریب جذب/تولید حرارت در افزایش دمای سیال با تقویت مقدار شاخص توانی سیال به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد به‌طوری‌که به ازای سیال ضخیم‌شونده می‌توان گفت افزایش متغیر Δ تقریباً بی‌اثر است. زیرا لزجت سیال در این حالت به قدری بالا است که قدرت تغییر شکل جریان وجود ندارد. طبق شکل ۱۷ الف، با تغییر نوع سیال می‌توان اثرات وجود جذب/تولید حرارت را کنترل کرد به نحوی که به ازای سیال نازک‌شونده، افزایش متغیر Δ از -6 به $+6$ کاهش 74% درصدی عدد ناسلت را در پی دارد در حالی که این تأثیر به ازای سیال نیوتنی و ضخیم‌شونده به ترتیب در حدود 37% درصد و 26% درصد است. وقتی تولید حرارت وجود دارد، دمای نانوسیال بیشتر از حالت عادی است و این عامل مقدار حرارت منتقل‌شده از دیوار گرم به سیال را کاهش می‌دهد، برخلاف حالتی که به ازای جذب گرما مشاهده می‌شود. از آنجایی که افزایش عدد هارتمن و افزایش ضریب جذب/تولید حرارت هر دو از عوامل کاهنده مقدار ناسلت هستند، تأثیر هم‌زمان این دو عامل کاهش بیشتر نرخ انتقال حرارت را منجر می‌شود، همان‌طور که در شکل ۱۷ ب قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۷ ج، به ازای $\Delta = +3$ اثر افزودن نانوذرات به سیال پایه در تغییر عدد ناسلت تقریباً ناچیز است در حالی که به ازای $\Delta < 3$ ، افزودن نانوذرات به دلیل رسانایی حرارتی بالاتر، عدد ناسلت بزرگ‌تری را منجر



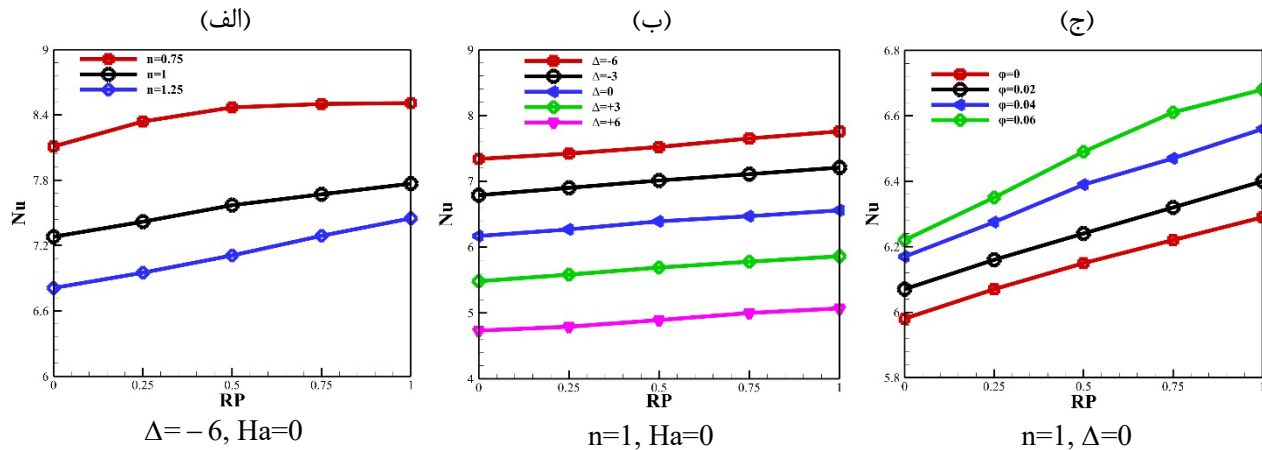
شکل (۱۶): تغییرات دما به ازای $\phi=0.04$, $Ha=0$, $RP=0.25$



شکل (۱۷): مقدار ناسلت متوسط به ازای $RP=0.25$.



شکل (۱۸): خطوط جریان، هم‌دما و آنتروپی $Ha=50$ و $\varphi=0.04$.



شکل (۱۹): مقدار ناسلت متوسط.

مرتبط به خوبی می‌توان استنباط کرد. در حالی که به ازای تولید حرارت، در اکثر موارد سهم انتقال حرارت در تولید آنتروپی بالای ۹۰ درصد است. به ازای جذب حرارت، شاخص عملکرد سیستم رشد می‌کند، زیرا با توجه به شکل ۱۵، تولید آنتروپی کاهش می‌یابد. از آنجایی که برگشت‌ناپذیری به واسطه وجود اختلاف دما کاهش می‌یابد، عدد بجان در حالت جذب حرارت، کمتر از $\Delta > 0$ است. نکته بسیار حائز اهمیت راجع به جدول ۷، ذکر این مطلب است که در حضور تشعشع حرارتی، مقدار شاخص عملکرد حرارتی تقویت می‌شود. اگرچه به ازای افزایش پارامتر تشعشع، گرادیان سرعت و قدرت جریان شکل‌گرفته افزایش می‌یابد و گرادیان دما رشد می‌کند که نتیجه آن افزایش مقدار آنتروپی است، اما نسبت مقدار عدد ناسلت به تولید آنتروپی بیشتر است. از این رو افزایش شاخص عملکرد حرارتی سیستم نتیجه افزایش پارامتر تشعشع است. کاهش تدریجی عدد بجان به ازای افزایش پارامتر تشعشع متذکر این نکته است که سهم میدان مغناطیسی و اصطکاک سیال در مقابل سهم انتقال حرارت افزایش یافته است. زیرا انرژی جنبشی وارد شده به جریان سیال از طریق اعمال تشعشع به‌طور محسوسی افزایش می‌یابد.

۶- جمع‌بندی

در این پژوهش عددی، میزان تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت جابجایی طبیعی تحت اثر تشعشع و جذب/تولید

اثر متغیر تشعشع بر مقدار عدد ناسلت در شکل ۱۹ ارائه شده است. شکل ۱۹ الف نشان می‌دهد افزایش پارامتر تشعشع منجر به بهبود انتقال حرارت می‌شود. زیرا همان‌گونه که در شکل ۱۸ نیز نشان داده شد، وجود تشعشع اثرات جابجایی را بیشتر می‌کند و نیروهای شناوری را تقویت می‌کند. اثرگذاری بیشتر تشعشع به ازای افزایش شاخص توانی سیال، یکی از نکات با اهمیت است. طبق شکل ۱۹ ب، به ازای تمامی مقادیر ضریب جذب/تولید گرما، افزایش مقدار پارامتر تشعشع منجر به رشد مقدار عدد ناسلت می‌کند. در میزان اثرگذاری بر عدد ناسلت می‌توان گفت که پارامتر تشعشع همسو با جذب حرارت و مخالف با تولید حرارت عمل می‌کند. نانوذرات پراکنده شده در سیال پایه می‌توانند انرژی ساطع شده از دیوار گرم را جذب نموده و آن را به دیواره سرد منتقل کنند. با افزایش پارامتر تشعشع، ضریب جذب و دفع حرارت این ذرات افزایش می‌یابد. بنابراین همان‌طور که در شکل ۱۹ ج دیده می‌شود، با افزایش مقدار پارامتر تشعشع، انتقال حرارت تشعشعی بیشتری از دیوار گرم به دیوار سرد منتقل می‌شود و عدد ناسلت بزرگ‌تری حاصل می‌شود. از طرفی، رسانایی بالاتر نانوسیال نسبت به سیال معمولی، عدد ناسلت بیشتری را حاصل می‌کند.

بر اساس جدول ۷ دیده می‌شود که شاخص عملکرد حرارتی با افزایش ضریب تولید گرما کاهش می‌یابد. زیرا در این حالت، تولید آنتروپی به واسطه انتقال حرارت به شکل فزاینده‌ای زیاد می‌شود. این مطلب را با توجه به عدد بجان

آنتروپی تولیدی می‌شود. به ازای $\Delta = +3$ افزایش کسر حجمی نانوذرات بر نرخ انتقال حرارت تقریباً بی‌اثر است اما به ازای $\Delta = +6$ کاهش عدد ناسلت متوسط با افزایش درصد نانوذرات مشاهده می‌شود.

(۴) چنانچه بتوان دیواره سرد محفظه را به شکل صاف طراحی کرد، علاوه بر کسب بالاترین مقدار شاخص عملکرد حرارتی و قدرت جریان، می‌توان اثربخشی میدان مغناطیسی را افزایش داد. به ازای طراحی دیواره محفظه به شکل مورب، اثر تغییر شاخص توانی سیال بر مشخصات حرارتی سیستم کمتر است.

(۵) برای دستیابی به بالاترین مقدار شاخص عملکرد حرارتی و کم کردن مقدار عدد بجان، کاهش شاخص توانی سیال راهکاری مناسب است. کاهش اثرگذاری میدان مغناطیسی و تغییر ضریب جذب/تولید حرارت از طریق افزایش شاخص توانی سیال امکان‌پذیر است.

(۶) به‌واسطه افزایش پارامتر تشعشع میزان اثرگذاری متغیرهای دیگر قابل‌کنترل است. به ازای کاهش شاخص توانی، اثربخشی افزایش پارامتر تشعشع در افزایش عدد ناسلت کاهش می‌یابد.

حرارت یکنواخت به روش شبکه بولتزمن بررسی شد. محفظه حاوی نانوسیال غیرنیوتنی با مدل توانی، در معرض میدان مغناطیسی یکنواخت و غیریکنواخت در حالی قرار داشت که دیواره سرد آن در سه شکل مختلف طراحی، بررسی شد. میزان تأثیر عدد هارتمن، پارامتر تشعشع، شکل دیواره، کسر حجمی نانوذرات، ضریب جذب/تولید حرارت، شاخص توانی سیال، شکل و زاویه اعمال میدان مغناطیسی بر عملکرد حرارتی موردبررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج حاصله عبارت‌اند از:

(۱) افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش عدد ناسلت و شاخص عملکرد حرارتی می‌شود. این تأثیر با اعمال افقی و یکنواخت میدان مغناطیسی تشدید می‌شود. به ازای افزایش عدد هارتمن و اعمال افقی، تغییر در شکل اعمال میدان مغناطیسی نمایان‌تر می‌شود.

(۲) به ازای جذب حرارت، شاخص عملکرد و عدد ناسلت بالاتری حاصل می‌شود ولی در این حالت، اثر میدان مغناطیسی کمتر است. به ازای تولید حرارت، بیشترین مقدار عدد بجان به دست می‌آید.

(۳) در حالت کلی، افزایش کسر حجمی نانوذرات منجر به افزایش عدد ناسلت می‌شود اما درعین‌حال منجر به افزایش عدد بجان و مقدار

جدول (۷): شاخص عملکرد حرارتی و عدد بجان $\phi=0.04, Ha=25$.

RP=0		RP=0.5		RP=1					
n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	n=0.75	n=1	n=1.25	
TPI									
۰/۶۹۱	۰/۶۳۵	۰/۵۹۴	۰/۷۲۷	۰/۶۵۱	۰/۶۰۳	۰/۷۸۵	۰/۷۰۶	۰/۶۴۵	$\Delta=-6$
۰/۶۲۲	۰/۵۹۱	۰/۵۶۴	۰/۶۴۸	۰/۵۹۸	۰/۵۶۲	۰/۶۹۱	۰/۶۳۸	۰/۵۹۳	$\Delta=-3$
۰/۴۸۲	۰/۵۳۹	۰/۵۱۶	۰/۵۰۲	۰/۵۵۵	۰/۵۱۴	۰/۵۳۳	۰/۵۷۲	۰/۵۳۹	$\Delta=0$
۰/۳۴۲	۰/۴۷۵	۰/۴۶۹	۰/۳۵۶	۰/۴۱۵	۰/۴۶۲	۰/۳۸۴	۰/۴۹۴	۰/۴۷۸	$\Delta=+3$
۰/۱۳۸	۰/۴۰۱	۰/۴۱۶	۰/۱۲۸	۰/۳۸۵	۰/۴۰۶	۰/۱۱۷	۰/۴۰۹	۰/۴۱۹	$\Delta=+6$
Be									
۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۹۲	۰/۶۹	۰/۷۷	۰/۸۸	۰/۶۵	۰/۷۴	۰/۸۱	$\Delta=-6$
۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۹۳	۰/۷۲	۰/۸۲	۰/۸۹	۰/۷۱	۰/۷۹	۰/۸۵	$\Delta=-3$
۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۹۴	۰/۷۷	۰/۸۴	۰/۹۱	۰/۷۴	۰/۸۱	۰/۸۷	$\Delta=0$
۰/۸۹	۰/۹۲	۰/۹۷	۰/۸۴	۰/۸۹	۰/۹۵	۰/۷۹	۰/۸۷	۰/۹۱	$\Delta=+3$
۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۸۹	۰/۹۴	۰/۹۸	۰/۸۳	۰/۸۹	۰/۹۵	$\Delta=+6$

۸- مراجع

- [1] Al-Farhany K, Al-Muhja B, Ali F, Khan U, Zaib A, Raizah Z, Galal AM. The baffle length effects on the natural convection in nanofluid-filled square enclosure with sinusoidal temperature. *Molecules*. 2022 Jul 12;27(14):4445. DOI <https://doi.org/10.3390/molecules27144445>.
- [2] Omara A, Touiker M, Bourouis A. Thermosolutal natural convection in a partly porous cavity with sinusoidal wall heating and cooling. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*. 2022 Jan 20;32(3):1115-44. DOI <https://doi.org/10.1108/HFF-01-2021-0062>.
- [3] Iftikhar B, Siddiqui MA, Javed T. Dynamics of magnetohydrodynamic and ferrohydrodynamic natural convection flow of ferrofluid inside an enclosure under non-uniform magnetic field. *Alexandria Engineering Journal*. 2023 Mar 1;66:523-36. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.11.011>.
- [4] Islam T, Yavuz M, Parveen N, Fayz-Al-Asad M. Impact of non-uniform periodic magnetic field on unsteady natural convection flow of nanofluids in square enclosure. *Fractal and Fractional*. 2022 Feb 11;6(2):101. DOI <https://doi.org/10.3390/fractalfract6020101>.
- [5] Nemati M, Farahani SD. Using lattice Boltzmann method to control entropy generation during conjugate heat transfer of power-law liquids with magnetic field and heat absorption/production. *Computational Particle Mechanics*. 2023 Jun;10(3):331-54. DOI <https://doi.org/10.1007/s40571-022-00497-3>.
- [6] Shahriari A. Numerical simulation of free convection heat transfer of nanofluid in a wavy-wall cavity with sinusoidal temperature distribution, using lattice Boltzmann method. *Modares Mechanical Engineering*. 2016 Nov 10;16(9):143-54. DOR <http://dorl.net/dor/20.1001.1.10275940.1395.16.9.11.0>.
- [7] Das SK, Putra N, Thiesen P, Roetzel W. Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003 Aug 1;125(4):567-74. DOI <https://doi.org/10.1115/1.1571080>.
- [8] Putra N, Roetzel W, Das SK. Natural convection of nano-fluids. *Heat and mass transfer*. 2003 Sep;39(8-9):775-84. DOI <https://doi.org/10.1007/s00231-002-0382-z>.

۷- علائم

ضریب نفوذ حرارت	α
ضریب خاموشی	β_R
ضریب جذب/تولید حرارت	Δ
زاویه اعمال میدان مغناطیسی	λ
دمای بدون بعد	θ
کسر حجمی نانوذرات	ϕ
لزجت دینامیکی	μ
لزجت سینماتیکی	ν
تابع جریان	Ψ
شدت میدان مغناطیسی	B
عدد بجان	Be
تابع توزیع مربوط به میدان جریان	f
تابع توزیع مربوط به میدان دما	h
ارتفاع محفظه	H
عدد هارتمن	Ha
تابع توزیع مربوط به تشعشع	I
طول محفظه	L
شکل میدان مغناطیسی اعمالی	MFM
شاخص توانی سیال	n
عدد ناسلت متوسط	Nu
پارامتر جذب/تولید حرارت	\tilde{Q}
پارامتر تشعشع	RP
دما	T
آنتروپی کل	S
شاخص عملکرد حرارتی سیستم	TPI
سرعت (افقی و عمودی)	$u(u,v)$
مختصات شبکه	$x(x,y)$
زیرنویس‌ها	
سرد	c
گرم	h
جهت شبکه	i
نانوسیال	NF
نانوذره	NP
سیال پایه	PF

- thermodynamics. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2022 Dec 1;145:335-51. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.09.022>.
- [17] Pordanjani AH, Aghakhani S, Alnaqi AA, Afrand M. Effect of alumina nano-powder on the convection and the entropy generation of water inside an inclined square cavity subjected to a magnetic field: uniform and non-uniform temperature boundary conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019 Mar 1;152:99-117. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.12.030>.
- [18] Rezaie MR, Norouzi M. Numerical investigation of MHD flow of non-Newtonian fluid over confined circular cylinder: a lattice Boltzmann approach. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2018 Apr;40:1-0. DOI <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1128-2>.
- [19] Rahman A, Redwan DA, Thohura S, Kamrujaman M, Molla MM. Natural convection and entropy generation of non-Newtonian nanofluids with different angles of external magnetic field using GPU accelerated MRT-LBM. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022 Feb 1;30:101769. DOI <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.101769>.
- [20] Aljaloud AS. Hybrid nanofluid mixed convection in a cavity under the impact of the magnetic field by lattice Boltzmann method: Effects of barrier temperature on heat transfer and entropy. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2023 Feb 1;147:276-91. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2022.12.007>.
- [21] Teamah MA, El-Maghlany WM. Augmentation of natural convective heat transfer in square cavity by utilizing nanofluids in the presence of magnetic field and uniform heat generation/absorption. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012 Aug 1;58:130-42. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.029>.
- [22] Zainodin S, Jamaludin A, Nazar R, Pop I. MHD Mixed Convection Flow of Hybrid Ferrofluid through Stagnation-Point over the Nonlinearly Moving Surface with Convective Boundary Condition, Viscous Dissipation, and Joule Heating Effects. *Symmetry*. 2023 Apr 7;15(4):878. DOI <https://doi.org/10.3390/sym15040878>.
- [23] Rana BK, Senapati JR. Natural convection from an isothermally heated hollow vertical [9] Chon CH, Kihm KD, Lee SP, Choi SU. Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid (Al_2O_3) thermal conductivity enhancement. *Applied Physics Letters*. 2005 Oct 10;87(15):153107. DOI <https://doi.org/10.1063/1.2093936>.
- [10] Khan F, Xiao-Dong Y, Aamir N, Saeed T, Ibrahim M. The effect of radiation on entropy and heat transfer of MHD nanofluids inside a quarter circular enclosure with a changing L-shaped source: lattice Boltzmann methods. *Chemical Engineering Communications*. 2023 May 4;210(5):740-55. DOI <https://doi.org/10.1080/00986445.2021.1990887>.
- [11] Hussain S, Pour MS, Jamal M, Armaghani T. MHD mixed convection and entropy analysis of non-Newtonian hybrid nanofluid in a novel wavy elbow-shaped cavity with a quarter circle hot block and a rotating cylinder. *Experimental Techniques*. 2023 Feb;47(1):17-36. DOI <https://doi.org/10.1007/s40799-022-00549-6>.
- [12] Kumar S, Sharma K. Entropy optimization analysis of Marangoni convective flow over a rotating disk moving vertically with an inclined magnetic field and nonuniform heat source. *Heat Transfer*. 2023 Mar;52(2):1778-805. DOI <https://doi.org/10.1002/htj.22763>.
- [13] Nemati M, Mohamadzade H, Sefid M. Investigation the Effect of Direction of Wall Movement on Mixed Convection in Porous Enclosure with Heat Absorption/Generation and Magnetic Field. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*. 2020 Jun 21;9(1):99-115. DOI <https://doi.org/10.1001/1.23223278.1399.9.1.7.5>.
- [14] Tighchi HA, Sobhani M, Esfahani JA. Effect of volumetric radiation on natural convection in a cavity with a horizontal fin using the lattice Boltzmann method. *The European Physical Journal Plus*. 2018 Jan;133:1-8. DOI <https://doi.org/10.1140/epjp/i2018-11835-1>.
- [15] Sheikholeslami M, Li Z, Shamlooei MJ. Nanofluid MHD natural convection through a porous complex shaped cavity considering thermal radiation. *Physics Letters A*. 2018 Jun 19;382(24):1615-32. DOI <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2018.04.006>.
- [16] Bai J, Hu X, Tao YH, Ji WH. Investigation of non-Newtonian power-law free convection affected by a magnetic field in an inclined quarter-circle chamber containing the lozenge-shaped obstacle via MRT-LBM of first and second laws of

Heat & Fluid Flow. 2021 Mar 10;31(3):933-58.
DOI <https://doi.org/10.1108/HFF-04-2020-0223>.

cylinder submerged in quiescent power-law fluids. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2023 Feb 1;15(2):021003. DOI <https://doi.org/10.1115/1.4055824>.

[24] Malkeson SP, Alshaaili S, Chakraborty N. Numerical investigation of steady state laminar natural convection of power-law fluids in side-cooled trapezoidal enclosures heated from the bottom. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 2023 Apr 3;83(7):770-89. DOI <https://doi.org/10.1080/10407782.2022.2157353>.

[25] Alqahtani AM, Sajadi SM, Al Hazmi SE, Alsenani TR, Alqurashi RS, El Bouz MA. Entropy generation and mixed convection in an enclosure with five baffles exposed to a uniform magnetic field with volumetric radiation for the solar collectors via lattice Boltzmann method. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2023 May 1;150:285-97. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.01.028>.

[26] Rahman A, Nag P, Molla MM, Hassan S. Magnetic field effects on natural convection and entropy generation of non-Newtonian fluids using multiple-relaxation-time lattice Boltzmann method. International Journal of Modern Physics C. 2021 Jan 17;32(01):2150015. DOI <https://doi.org/10.1142/S0129183121500157>.

[27] Nemati M, Sefid M, Mohammad Sajadi S, Ghaemi F, Baleanu D. Lattice Boltzmann method to study free convection and entropy generation of power-law fluids under influence of magnetic field and heat absorption/generation. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2022 Oct;147(19):10569-94. DOI <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11271-1>.

[28] Ilis GG, Mobedi M, Sunden B. Effect of aspect ratio on entropy generation in a rectangular cavity with differentially heated vertical walls. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2008 Jul 1;35(6):696-703. DOI <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.02.002>.

[29] Massoudi MD, Ben Hamida MB, Almeshaal MA. Free convection and thermal radiation of nanofluid inside nonagon inclined cavity containing a porous medium influenced by magnetic field with variable direction in the presence of uniform heat generation/absorption. International Journal of Numerical Methods for