

اثرات تلفات لزجت بر انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری نانوسیال درون یک میکروکانال با حضور میدان مغناطیسی

احمد حاجت‌زاده پردنجان

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، شهرکرد، ایران

افراسیاب رئیسی*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

بهزاد قاسمی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران

چکیده

در این پژوهش اثرات تلفات لزجت بر انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری لایه‌ای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم درون میکروکانال صفحه موازی با حضور میدان مغناطیسی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. میکروکانال از دو صفحه موازی تشکیل شده است و در ناحیه میانی میکروکانال دیوارها تحت شار گرمایی و میدان مغناطیسی یکنواخت می‌باشند. معادلات بقاء جرم، مومنتوم و انرژی در حالت دو بعدی به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده و به کمک الگوریتم سیمپل حل می‌شوند. اثر پارامترهایی هم‌چون عدد رینولدز، درصد حجمی نانوذرات، عدد برینکمن و عدد هارتمن بر روی عدد ناسلت، خطوط جریان و هم‌دمای بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد برینکمن دمای سیال نزدیک دیواره افزایش یافته و آهنگ انتقال گرما از دیوار کاهش می‌یابد. با افزایش درصد حجمی نانوذرات با وجود تلفات لزجت، باعث کاهش انتقال گرما از دیوار به سیال می‌شود و میزان عدد ناسلت کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد هارتمن باوجود تلفات لزجت، سرعت سیال کاهش یافته و به دنبال آن زمان برای نفوذ انتقال گرما از دیوار افزایش یافته و دمای افزایش می‌یابد و عدد ناسلت کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جابه‌جایی اجباری، نانوسیال، میکروکانال، تلفات لزجت، میدان مغناطیسی.

Effects of Viscous Dissipation on MHD Forced Convection of a Nanofluid in a Microchannel

A. Hajatzadeh Pordanjani

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

A. Raisi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

B. Ghasemi

Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

Abstract

This paper performs a numerical investigation of the viscous dissipation effects on the laminar forced convection of a nanofluid within a horizontal parallel plate microchannel in the presence of a uniform magnetic field. A uniform heat flux and also a uniform magnetic field are applied to the middle section of the microchannel, while the entry and exit sections of the microchannel are thermally insulated. The finite volume method along with the SIMPLE algorithm is used to solve the governing equations. The effects of relevant parameters such as Reynolds Number, solid volume fraction, Hartman and Brinkman numbers on the flow and temperature fields and the heat transfer performance of the microchannel are examined against numerical predictions. The results show that the rate of heat transfer decreases with an increase in the Brinkman number. The results also show that in the absence of viscous dissipation the increase of solid volume fraction and Hartman number enhance the heat transfer performance of the microchannel. However, these parameters play a different role in the presence of viscous dissipation.

Keywords: Forced convection, Nanofluid, Microchannel, Thermal dissipation, Magnetic Field.

۱- مقدمه

انتقال گرمای نانوسیال از سیال پایه‌اش به مراتب بیشتر و برتر است. استفاده از این سیالات می‌تواند کارایی گرمایی میکروکانال‌ها را بهبود بخشد. نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی، دارای این ویژگی است که خواص مغناطیسی و سیال بودن را هم‌زمان دارد. جریان سیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی در خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی، خنک‌کاری ترانسفورماتورهای برق، راکتورهای هسته‌ای، بیوشیمی، پدیده‌های فیزیکی مانند پدیده‌های زمین‌شناسی، جریان‌های اتمسفری و موارد مشابه دیگر مطرح است [۱-۵].

در سال ۱۹۸۱ برای اولین بار تاکرمن و پیس [۶] برای خنک کردن مدارهای مجتمع از یک خنک‌کن که از میکروکانال‌های سیلیکونی بهره می‌جست، استفاده کردند. میکروکانال‌ها در صنایع و دستگاه‌های

دفع گرما و کنترل دما در دستگاه‌هایی با تولید شار گرمایی بالا در صنایعی همچون الکترونیک، هوافضا، نظامی و غیره دارای اهمیت حیاتی است. از سوی دیگر در دهه‌ی اخیر تلاش‌ها بر استفاده از نانوسیالات به‌عنوان سیال عامل در خنک‌کنندگی متمرکز بوده است. عبارت نانوسیال در واقع تصویری است که برای توصیف مخلوط جامد-مایع به کار می‌رود که این مخلوط شامل ذرات جامد در اندازه نانومتر به همراه یک سیال پایه است. نانوذراتی که در سیال پایه معلق‌اند می‌توانند مواد نانو ساختاری شامل پودرها اعم از فلزی و غیرفلزی و ذرات پلیمری باشند که قطر آن‌ها کمتر از ۱۰۰ (nm) است و عملکرد

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: raisi@eng.sku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۶

متفاوتی نظیر سرمایش قطعات الکترونیکی و مبدل‌های گرمایی کاربرد دارند. یکی از پدیده‌هایی که می‌تواند نقش مهمی بر روی جریان در داخل میکروکانال‌ها داشته باشد، اتلافات گرمایی ناشی از لزجت و نقش عدد برینکمن می‌باشد. از نخستین کارهایی که در این زمینه صورت گرفته است، تحقیق تسو و ماهولیکار [۷] است. آن‌ها به تحلیل تجربی و نظری میکروکانال‌های دایره‌ای با در نظر گرفتن جمله اتلاف لزجت پرداختند و دریافتند که نتایج تجربی مربوط به ضریب اصطکاک به‌خوبی با استفاده از عدد برینکمن یا جمله اتلاف لزجت قابل توجهی است. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که تغییرات محوری عدد برینکمن بر انتقال گرما جابجایی در میکروکانال تأثیر می‌گذارد.

هوانگ و همکاران [۸] با استفاده از روش‌های تحلیلی مختلف اقدام به حل معادلات حاکم بر جریان کردند و کارایی نانو سیال در میکروکانال‌ها را بررسی نمودند. آن‌ها نانو سیال را غیر نیوتنی در نظر گرفتند و نشان دادند که برای جابجایی اجباری لایه‌ای در ناحیه‌ی کاملاً توسعه یافته، با حذف جمله اتلاف لزجت، کارایی گرمایی میکروکانال بیش از مقدار واقعی به دست می‌آید. کو و کلینستروتر [۹] به حل عددی جریان دائم نانو سیال آب و اتیلن گلیکول و نانوذرات اکسید مس در درون یک میکروکانال پرداختند. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانوذرات اکسید مس با قطر میانگین ۲۰ نانومتر و در کسرهای حجمی ۱ تا ۴ درصد به سیالی با عدد پرناتل بالا، به طرز مشهودی کارایی خنک‌کن را افزایش می‌دهد. آن‌ها تأکید زیادی در استفاده از یک سیال پایه با عدد پرناتل بالا برای بهبود عملکرد نانو سیال داشتند.

رئیس و همکاران [۱۰] جریان نانو سیال در درون میکروکانال صفحه موازی را در رژیم جریان لایه‌ای با صرف‌نظر از جمله اتلاف لزجت و در نظر گرفتن لغزش سیال در دیوارها به صورت عددی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که لغزش در دیوارها هیچ‌گونه تأثیری در آهنگ انتقال گرما در اعداد رینولدز پایین ندارد اما در رینولدزهای بالا ضریب انتقال گرما با افزایش ضریب لغزش دیوارها افزایش می‌یابد.

امین‌والسادتی و همکاران [۱۱] به بررسی عددی تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی اجباری نانو سیال در یک میکروکانال صفحه موازی بدون در نظر گرفتن تلفات لزجت پرداختند، نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که انتقال گرما در اعداد هارتمن و رینولدز بالاتر بهتر صورت می‌گیرد و در تمامی اعداد رینولدز و هارتمن، عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی، افزایش می‌یابد که آهنگ این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر و اعداد هارتمن کمتر مشهودتر است.

امین‌فر و معروفی آذر [۱۲] جریان و انتقال گرما نانو سیال آب - آلومینا را در یک میکروکانال مستطیلی در رژیم جریان لایه‌ای مورد بررسی قرار دادند، آن‌ها از مدل دوفازی برای در نظر گرفتن لغزش بین نانوذرات و سیال استفاده کردند نتایج آن‌ها نشان داد که اختلاف بین نتایج مدل تک فازی و مدل دوفازی بسیار کم و در ناحیه توسعه یافته ناچیز است.

قزویی و همکاران [۱۳] اثر اتلاف لزجت را در جریان نانو سیال درون میکروکانال به‌صورت تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای میکروکانال‌ها از مدل محیط متخلخل و برای ناحیه سیال از مدل داری تغییر یافته و برای انتقال گرما بین ناحیه جامد و سیال از مدل دو معادله‌ای استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که تنها در نسبت‌های

منظری کوچک و کسر حجمی‌های کوچک می‌توان از اثر جمله اتلاف لزجت صرف‌نظر کرد.

جانگ یل و همکاران [۱۴] با انجام آزمایشی به بررسی انتقال گرما جابجایی اجباری نانو سیال در میکروکانال پرداختند. آن‌ها از یک میکروکانال چهاروجهی که درون آن نانو سیال Al_2O_3 در حال عبور بود و دو طرف آن با استفاده از یک گرماساز در حال گرم شدن بود استفاده کردند و دریافتند که ضریب انتقال گرما جابجایی نانو سیال در رژیم جریان لایه‌ای با درصد حجمی ۱/۸ نانوذرات بدون در نظر گرفتن تلفات اصطکاک به میزان ۳۲ درصد نسبت به آب خالص افزایش می‌یابد.

شیخ‌الاسلام و همکاران [۱۵] انتقال گرمای نانو سیال مغناطیسی را با در نظر گرفتن تلفات لزجت شبیه‌سازی نمودند. آن‌ها نانو سیال را در بین دو صفحه دایره‌ای در حال چرخش قرار دادند و به نتایج جالبی دست یافتند. نتایج آنها نشان داد که به ضریب اصطکاک سطح تابعی از شدت میدان مغناطیسی، سرعت چرخش و عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات است. شیخ‌الاسلام و گنجی [۱۶] جریان و انتقال گرمای نانو سیال آب و نانوذرات CuO و Al_2O_3 را بین صفحات موازی با توجه به حرکت براونی نانوذرات به کمک روش DTM^1 مطالعه کردند و اثرات درصد حجمی نانوذرات، عدد هارتمن و پارامتر تولید انرژی را بر میدان جریان و انتقال گرما بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که عدد ناسلت با افزایش درصد حجمی نانوذرات و عدد هارتمن افزایش می‌یابد اما با افزایش عدد فشار کاهش می‌یابد. هدایتی و گنجی [۱۷] اثر مهاجرت نانوذرات بر انتقال گرمای نانو سیال درون یک میکروکانال صفحه موازی را در ناحیه توسعه یافته بررسی کردند. آن‌ها با در نظر گرفتن شرایط لغزشی بین نانوذرات جامد و سیال و اثرات حرکت براونی نانوذرات نتایج خود را ارائه کردند. نتایج آن‌ها حاکی از این است که آهنگ انتقال گرما در میکروکانال با وجود اثرات لغزشی افزایش می‌یابد همچنین با افزایش درصد حجمی نانوذرات آهنگ انتقال گرما نسبت به سیال خالص افزایش می‌یابد.

اهمیت استفاده از نانو سیال درون میکروکانال را می‌توان به این حالت درک کرد که با کاهش ابعاد کانال، قطر هیدرولیکی کاهش یافته و در نتیجه گرادیان دما و ضریب انتقال گرما افزایش می‌یابند. از طرفی با افزودن نانوذرات، ضریب هدایت گرمایی افزایش می‌یابد و به تبع آن، ضریب انتقال گرمای جابجایی افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از میکروکانال و نانو سیال در کنار یکدیگر به طور قابل ملاحظه‌ای فرآیند انتقال را بهبود می‌بخشند.

در بیشتر پژوهش‌هایی که در مورد جریان نانو سیال در داخل میکروکانال صفحه موازی ارائه شده است، معمولاً از اثر جمله اتلاف لزجت در میکروکانال صرف‌نظر شده است. به دلیل کوچک بودن قطر هیدرولیکی میکروکانال‌ها، معمولاً گرادیان سرعت در مجاورت سطح آن‌ها قابل ملاحظه است و این سبب می‌شود که اتلاف لزجت تأثیر به‌سزایی در آهنگ انتقال گرما داشته باشد. از طرف دیگر وجود نانوذرات در نانو سیال سبب تغییر خواص ترموفیزیکی از جمله لزجت آن می‌شود و تغییرات لزجت نیز بر میزان تأثیر جمله اتلاف لزجت اثر

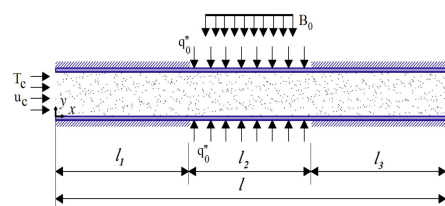
¹Differential Transformation Method

می‌گذارد. با توجه به بررسی مطالعات قبلی، اثر اتلاف لزجت بر جریان نانوسیال درون میکروکانال‌ها در حضور میدان مغناطیسی بررسی نشده است. بنابراین هدف از این پژوهش بررسی اثر اتلاف لزجت در جریان لایه‌ای نانوسیال در داخل یک میکروکانال در حضور میدان مغناطیسی و با اعمال شرط مرزی شار گرمایی ثابت، که یکی از کاربردی‌ترین شرایط مرزی در صنعت است، می‌باشد.

۲- بیان مسئله و معادلات حاکم

در این تحقیق جریان نانوسیال آب - Al_2O_3 بین دو صفحه موازی مطابق شکل (۱) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

هندسه مورد نظر در این تحقیق، مطابق شکل (۱)، یک میکروکانال شامل دو صفحه موازی با فاصله $h = 25 \mu m$ از یکدیگر و به طول $1 = 2.5 mm$ است. با بی‌بعد سازی پارامترهای هندسی، طول بی‌بعد میکروکانال $L = 1/h = 100$ و فاصله دو صفحه برابر $H = h/h = 1$ می‌شود.



شکل ۱- هندسه مسئله و مختصات در نظر گرفته

قسمت‌های ابتدایی و انتهایی میکروکانال که دارای طول بی‌بعد $L_1 = L_3 = 30$ هستند، به‌خوبی عایق شده‌اند. ناحیه‌ی میانی میکروکانال با طول بی‌بعد $L_2 = 40$ تحت اثر شار گرمایی ثابت و میدان مغناطیسی یکنواخت قرار دارد. جریان نانوسیال لایه‌ای و دائمی است. سیال و نانوذرات در حال تعادل گرمایی و نانوسیال به‌صورت تک فاز در نظر گرفته شده است. نانوسیال نیوتنی و تراکم ناپذیر می‌باشد و همچنین شکل و اندازه نانوذرات در نانوسیال یکسان می‌باشند. معادلات بدون بعد پیوستگی، مومنتوم و انرژی برای جریان نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی باوجود اثر تلفات لزجت به‌صورت روابط (۱) تا (۴) می‌باشند.

$$\frac{dU}{dX} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (1)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \frac{Ha^2}{Re} U \quad (2)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \alpha_f} \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{\alpha_{nf}}{\alpha_f} \frac{1}{RePr} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + \frac{\mu_{nf}}{\mu_f} \frac{Br}{RePr} \phi \quad (4)$$

آخرین جمله در رابطه (۴)، عبارت تلفات لزجت می‌باشد. در سیستم‌های با ابعاد ماکرو، اثر اتلاف لزجت تنها زمانی حائز اهمیت می‌شود که عدد رینولدز خیلی بزرگ باشد یا لزجت سیال بسیار زیاد

باشد. این در حالی است که در ابعاد میکرو، که با نسبت طول به قطر هیدرولیکی بزرگی سروکار داریم، گرادیان سرعت در نزدیکی دیوارهای کانال زیاد است و این باعث تولید انرژی گرمایی به‌وسیله اتلاف لزجت می‌شود. از طرف دیگر با توجه به این که در میکروکانال‌ها معمولاً عدد رینولدز پایین است، گرادیان دما در عرض میکروکانال کوچک است و یک افزایش جزئی در دما تأثیر بسزایی در انتقال گرمای جابجایی و هر خاصیت وابسته به دمای سیال دارد. عدد برینکمن که به‌صورت نسبت انتقال گرمای ناشی از اتلاف لزجت و انتقال گرمای بین سیال و دیواره کانال است، به عنوان پارامتری برای تعیین اثرگذاری جمله اتلاف لزجت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۸، ۱۳]. در حالت دوبعدی ϕ به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi = 2 \left[\left(\frac{\partial U}{\partial X} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial V}{\partial X} + \frac{\partial U}{\partial Y} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} \right)^2 \quad (5)$$

در روابط (۱) تا (۴) از متغیرهای بی بعد ارائه شده در رابطه (۶) استفاده شده است.

$$X = \frac{x}{h}, \quad Y = \frac{y}{h}, \quad V = \frac{v}{u_c}, \quad U = \frac{u}{u_c}, \quad P = \frac{p}{\rho_{nf} u_c^2}, \quad \Delta T = \frac{q_0^* h}{k_f}, \quad \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T} \quad (6)$$

اعداد بدون رینولدز، هارتمن، پراتنل و برینکمن طبق رابطه (۷) تعریف می‌شوند.

$$Re = \frac{u_c h}{\nu_f}, \quad Ha = B_0 h \sqrt{\frac{\sigma_f}{\rho_f \nu_f}}, \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f}, Br = \frac{\mu_f u_c^2}{k_f \Delta T} \quad (7)$$

۳- شرایط مرزی

شرایط مرزی برای حل معادلات (۱) تا (۴) به‌صورت زیر بیان می‌شوند.

$$X=0, \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad U=1, \quad V=\theta=0$$

$$X=100, \quad 0 \leq Y \leq 1 \quad V=0, \quad \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad (8)$$

$$0 \leq X \leq 100, \quad Y=0, 1 \quad U=V=0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0, \pm \frac{k_f}{k_{nf}}$$

عدد نوسلت موضعی به عنوان معیاری از آهنگ انتقال گرما به صورت رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$Nu_s = \frac{\lambda h}{k_f} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، λ ضریب انتقال گرمای جابجایی است و از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$\lambda = \frac{q_0^*}{T_s - T_c} \quad (10)$$

پس از ساده‌سازی و استفاده از متغیرهای بدون بعد رابطه‌ی (۶)، عدد نوسلت موضعی به‌صورت رابطه (۱۱) حاصل می‌شود.

$$Nu_s(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \quad (11)$$

نوسلت متوسط (Nu_m) از انتگرال‌گیری معادله (۱۱) بر روی دیوارهای بالایی و پایینی میکروکانال به‌صورت رابطه (۱۲) به دست می‌آید.

$$Nu_m = \frac{1}{L_2} \int_{L_1}^{L_1+L_2} Nu_s(X) dX \quad (12)$$

۴- روابط مربوط به خواص نانوسیال

ضریب رسانایی الکتریکی، چگالی، ضریب انبساط حجمی، ظرفیت گرمایی و ضریب پخش گرمایی نانوسیال به ترتیب به کمک خواص سیال و نانوذرات از روابط (۱۳) تا (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$\sigma_{nf} = (1 - \varphi)\sigma_f + \varphi\sigma_p \quad (13)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (14)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho\beta)_f + \varphi(\rho\beta)_p \quad (15)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (16)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (17)$$

در این روابط زیرنویس‌های nf، f و p به ترتیب اشاره به خواص نانوسیال، آب و نانوذرات Al_2O_3 دارد. خواص فیزیکی آب و اکسید آلومینیوم در جدول (۱) ارائه شده است. برای ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال حسنی و همکاران [۱۹] رابطه‌ای جدیدی با استفاده از آنالیز ابعادی و مدل‌های کو و کلینسترو [۹] و واجها و داس [۲۰] ارائه نمودند که اختلاف آن با داده‌های تجربی ۲/۷۴ درصد است. این مدل شامل حرکت براونی، درصد حجمی نانوذرات، دما و اندازه و مشخصات نانوذرات و مشخصات سیال پایه است. رابطه حسنی و همکاران [۱۹] برای ضریب رسانایی گرمایی به صورت رابطه (۱۸) است.

$$\pi_1 = 1.04 + \pi_2^{1.11} \pi_3^{0.33} \pi_4^{-1.7} \left(\frac{1}{\pi_4^{-1.7}} - \frac{262}{\pi_3^{0.33}} + \left(\frac{135 \pi_5^{0.23} \pi_6^{0.82} \pi_7^{-0.1} \pi_8^{-7}}{\pi_4^{-1.7}} \right) \right) \quad (18)$$

که در معادله فوق پارامترهای بی‌بعد به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{k_{nf}}{k_f}, \quad \pi_2 = \varphi, \quad \pi_3 = \frac{k_p}{k_f}, \quad \pi_4 = Pr, \quad \pi_5 = \frac{d_{ref}}{d_p} \\ \pi_6 &= \frac{v_f}{d_p v_{Br}}, \quad \pi_7 = \frac{C_p}{T^{-1} v_{Br}^2}, \quad \pi_8 = \frac{T_b}{T} \end{aligned} \quad (19)$$

در رابطه (۱۹) v_{Br} سرعت براونی نانوذرات است که به صورت رابطه (۲۰) بیان می‌شود.

$$v_{Br} = \sqrt{\frac{18 \kappa_b T}{\pi \rho_p d_p^3}} \quad (20)$$

در رابطه (۲۰)، $\kappa_b = 1.3897 \times 10^{-23} J/K$ ثابت بولتزمن است. ویسکوزیته نانوسیال توسط رابطه واجها و داس [۲۰] محاسبه می‌شود.

$$\mu_{nf} = \mu_{Static} + \mu_{Brownian} \quad (21)$$

در رابطه (۲۱) عبارت μ_{Static} از رابطه برینکمن [۲۱] استفاده می‌شود. با جای‌گذاری خواهیم داشت.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{(1 - \varphi)^{2.5}} + 5 \times 10^4 \beta \varphi \rho_f (C_p)_f \frac{\mu_f}{k_f Pr} \sqrt{\frac{\kappa_b T}{\rho_p d_p}} f(T, \varphi) \quad (22)$$

در رابطه (۲۲) عبارت β و $f(T, \varphi)$ با استفاده از روابط (۲۳) و (۲۴) برای نانوسیال آب- Al_2O_3 محاسبه می‌شوند.

$$f(T, \varphi) = \left(2.8217 \times 10^{-2} \varphi + 3.917 \times 10^{-3} \right) \left(\frac{T}{T_0} \right) + \left(-3.0669 \times 10^{-2} \varphi - 3.91123 \times 10^{-3} \right) \quad (23)$$

$$\beta = 8.4407 (100\varphi)^{-1.07304} \quad (24)$$

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی آب و اکسید آلومینیوم

خواص فیزیکی	آب	اکسید آلومینیوم
$\rho (kg/m^3)$	۹۹۷/۱	۳۹۷۰
$C_p (J/kgK)$	۴۱۷۹	۷۶۵
$k (W/mK)$	۰/۶۱۳	۴۰
$d_p (nm)$	-	۴۰

۵- روش عددی

معادله‌های (۱) تا (۴) همراه با شرایط مرزی ارائه شده در رابطه (۸) به روش اختلاف محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری شده‌اند. میدان حل با روش شبکه جابجا شده شبکه‌بندی شده است. در روش شبکه جابجا شده، علاوه بر راحتی محاسبه دبی‌ها روی وجوه حجم کنترل، به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می‌شود. برای حل هم‌زمان معادله‌های جبری شده از الگوریتم سیمپل که جزئیات کامل آن در مرجع [۲۲] آمده است، استفاده شده است. همگرایی وقتی حاصل می‌شود که مجهول محاسبه شده در دو تکرار متوالی به عدد ثابتی رسیده باشد. در حل معادلات حاکم، ضرایب معادله از مقادیر محاسبه شده در تکرار قبل به دست می‌آیند. همچنین معیار همگرایی به صورت رابطه (۲۵) استفاده شده است:

$$\sum_j \sum_l \left| \frac{\varepsilon^{n+1} - \varepsilon^n}{\varepsilon^{n+1}} \right| \leq 10^{-8} \quad (25)$$

در رابطه (۲۴)، n برابر تعداد سلول‌ها است و ε متغیر عمومی (U, V, θ) را نشان می‌دهد.

۶- بررسی صحت کد نوشته شده

برای اجرای الگوریتم مورد نظر برنامه‌ای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شد. برای اثبات کارایی روش عددی و برنامه نوشته شده، نتایج عددی حاصل از آن با کارهای مشابه انجام گرفته توسط دیگران مقایسه شد. برای بررسی عملکرد برنامه کامپیوتری تهیه شده در مسائل انتقال گرمای جابجایی نانوسیال در کانال‌ها، نتایج به دست آمده از اجرای برنامه‌ی کامپیوتری حاضر با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۳] مقایسه شده است. برای این منظور مطابق مرجع [۲۳] جریان نانوسیال آب- مس درون کانالی با صفحات موازی بررسی شده است و در جدول (۲) نتایج حاصل از حل عددی حاضر با نتایج ارائه شده در مرجع [۲۳] مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول (۲) دیده می‌شود، اختلاف ناچیزی بین نتایج مرجع [۲۳] و نتایج حاصل از برنامه حاضر وجود دارد.

برای بررسی عملکرد برنامه در جریان‌های تحت تأثیر میدان مغناطیسی، در جدول (۳) و شکل (۲) نتایج آن با نتایج موجود در مرجع [۱۱] مقایسه و تحلیل شده است.

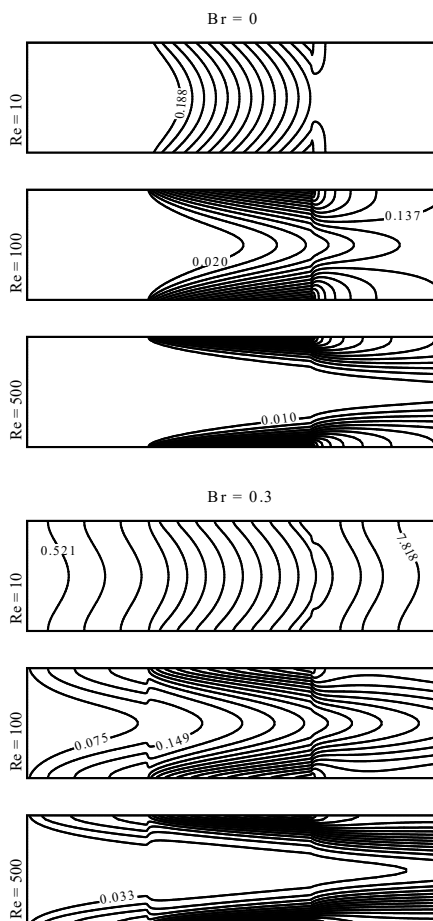
۸- نتایج

پس از اطمینان از درستی کارکرد برنامه کامپیوتری و روش عددی و همچنین انتخاب شبکه‌ی مناسب، نتایج این تحقیق به صورت اتر عدد رینولدز: $10 \leq Re \leq 500$ ، عدد برینکمن $0 \leq Br \leq 1.5$ ، کسر حجمی نانوذرات $0 \leq \phi \leq 0.04$ و عدد هارتمن $0 \leq Ha \leq 40$ بر روی میدان‌های جریان و دما و پروفیل دما در مقاطع مختلف میکروکانال و همچنین آهنگ انتقال گرما بررسی می‌شود. در این تحقیق عدد پرانتل برابر $6/2$ در نظر گرفته شده است.

۸-۱- اثر اعداد رینولدز و برینکمن

در این بخش عدد هارتمن $Ha = 20$ و کسر حجمی نانوذرات $\phi = 0.02$ ثابت در نظر گرفته شده‌اند و اثر تغییرات اعداد رینولدز و برینکمن بر روی نتایج بررسی می‌شود.

در شکل ۳ خطوط هم‌دما به ازای دو مقدار مختلف برای عدد برینکمن $Br = 0, 0.3$ و مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. همان‌طور که در قبل اشاره شد عدد برینکمن بیانگر جمله اتلاف لزجت در معادله انرژی است.



شکل ۳- خطوط هم‌دما برای اعداد رینولدز و به ازای $\phi = 0.02$ و

$$Ha = 20$$

جدول ۲- مقایسه ناسلت متوسط برای نانوسیال با مرجع

$\phi(\%)$	Re = 100		Re = 500	
	مرجع [۲۳]	تحقیق حاضر	مرجع [۲۳]	تحقیق حاضر
۱	۴/۵۷۴	۴/۳۹۳	۶/۳۴۵	۶/۱۲۸
۲	۸/۷۳۸	۸/۵۳۴	۱۳/۰۷۶	۱۳/۰۱۱
۳	۱۲/۵۱۸	۱۲/۲۱۲	۲۰/۱۱۷	۱۹/۲۱۳
۴	۱۵/۹۳۸	۱۵/۰۴۳	۲۷/۳۲۸	۲۶/۵۲۰

در مرجع [۱۱] جریان بین دو صفحه موازی تحت میدان مغناطیسی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است که اختلاف ناچیزی بین نتایج وجود دارد.

جدول ۳- مقایسه ناسلت متوسط برای نانوسیال آب- Al_2O_3 به

ازای $Ha = 20$ و $Re = 100$ ، $\phi = 0.02$

Ha					
۴۰	۳۰	۲۰	۱۰	۰	
۱/۷۸۷	۱/۷۶۰	۱/۷۱۷	۱/۶۳۷	۱/۵۳۴	مرجع [۱۱]
۱/۷۸۷	۱/۷۶۰	۱/۷۱۶	۱/۶۳۷	۱/۵۳۹	تحقیق حاضر
۶/۱۱۷	۵/۹۰۳	۵/۵۷۳	۵/۰۲۰	۴/۳۹۴	مرجع [۱۱]
۶/۰۴۴	۵/۸۷۵	۵/۵۵۰	۵/۰۱۶	۴/۳۹۳	تحقیق حاضر
۱۲/۳۱۵	۱۱/۶۵۳	۱۰/۶۷۳	۹/۱۷۳	۷/۷۳۱	مرجع [۱۱]
۱۲/۰۷۶	۱۱/۴۸۹	۱۰/۴۴۰	۹/۰۲۴	۷/۷۱۴	تحقیق حاضر

۷- انتخاب شبکه حل مناسب

نتایج حاصل از روش‌های عددی باید مستقل از تعداد نقاط شبکه باشند. برای انتخاب شبکه مناسب، اثر تعداد نقاط شبکه بر روی نتایج حاصل از حل عددی بررسی شد. نمونه‌ای از بررسی‌های انجام شده در جدول ۴ آورده شده است.

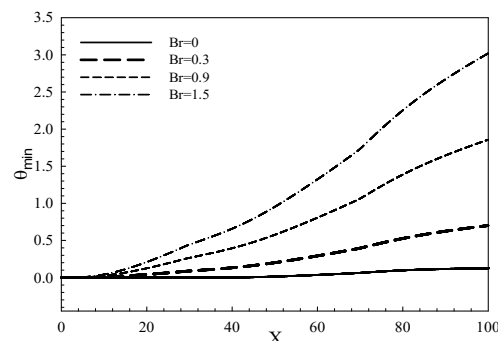
جدول ۴- اثر تعداد نقاط شبکه بر روی نتایج حاصل از حل عددی

۶۰×۶۰۰	۵۰×۵۰۰	۴۰×۴۰۰	۳۰×۳۰۰	۲۰×۲۰۰	۱۰×۱۰۰
Re = 200					
۱/۹۵۹۱	۱/۹۵۹۱	۱/۹۵۹۲	۱/۹۶۰۱	۱/۹۶۹	۲/۰۴۸
۰/۶۷۲	۰/۶۷۲	۰/۶۷۲	۰/۶۷۳	۰/۶۷۵	۰/۶۹۲
۱/۴۹۸	۱/۴۹۸	۱/۴۹۸	۱/۴۹۷	۱/۴۸۸	۱/۴۶۴
Re = 500					
۲/۶۹۵	۲/۶۹۹	۲/۷۰۴	۲/۸۲۱۲	۲/۹۳۲۲	۳/۱۱۲
۰/۵۳۴	۰/۵۳۴	۰/۵۳۴	۰/۵۳۵	۰/۵۳۹	۰/۵۵۳
۱/۴۹۴	۱/۴۹۴	۱/۴۹۴	۱/۴۹۳	۱/۴۹۱	۱/۴۸۷

تغییرات عدد نوسلت متوسط، دمای ماکزیمم منابع گرمایی و سرعت روی محور مرکزی کانال در مقطع خروجی به ازای عدد هارتمن ۲۰ و درصد حجمی ۲٪ و اعداد رینولدز ۵۰۰ و ۲۰۰ و عدد برینکمن ۰/۳ برحسب تعداد نقاط شبکه در جدول ۴ ارائه شده‌اند. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴، مقدار پارامترهای مورد نظر برای شبکه‌های ریزتر از 400×40 بدون تغییر باقی مانده‌اند. بدین ترتیب با توجه به بررسی‌های انجام شده و زمان اجرای برنامه، شبکه‌بندی یکنواخت 400×40 برای اجرای برنامه انتخاب شد.

در نظر گرفتن جمله اتلاف لزجت در معادله انرژی مانند وجود یک منبع گرمایی در داخل سیال عمل کرده و در واقع اتلاف لزجت انرژی جنبشی سیال را به انرژی گرمایی تبدیل می کند. از آنجایی که عبارت تلفات لزجت طبق رابطه (۵) با گرادیان سرعت رابطه مستقیم دارد و گرادیان سرعت در نزدیکی سطوح بیشترین مقدار را دارد، بنابراین در شکل ۳ دیده می شود که با در نظر گرفتن تلفات لزجت، گرادیان دما در مجاورت دیوارهای میکروکانال در قسمت میانی آن کاهش می یابد. تولید گرما ناشی از تلافت لزجت سبب ایجاد گرادیان دما در قسمت عایق شده ی ورودی میکروکانال می شود، در حالی که برای $Br=0$ ، دمای جریان نانوسیال در قسمت ورودی تغییر نمی کند. بنابراین در صورتی که تلفات لزجت در نظر گرفته شود، نانوسیال با دمای بیشتری وارد ناحیه ی میانی میکروکانال می شود و به این علت و همچنین به دلیل تولید گرمای قابل ملاحظه در نزدیکی دیوارها، آهنگ انتقال گرما از دیوارهای میکروکانال به جریان نانوسیال کاهش می یابد. در ضمن همانطور که انتظار می رود با افزایش عدد رینولدز ضخامت لایه های مرزی گرمایی کاهش می یابند و گرادیان دما در مجاورت دیوارها افزایش می یابد.

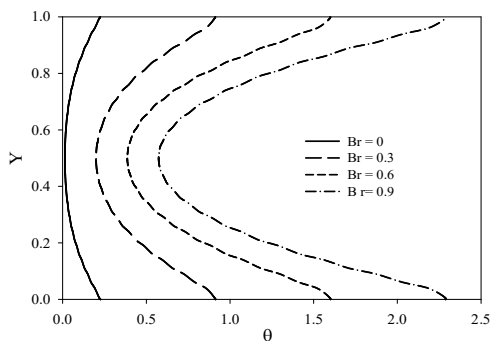
در شکل ۴، تغییرات دمای بدون بعد بر روی خط مرکزی میکروکانال ($Y=0.5$) برای مقادیر مختلف عدد برینکمن نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴ دیده می شود که برای $Br=0$ دما بر روی خط مرکزی تغییر چندانی ندارد. در واقع چون در این حالت تلفات لزجت در نظر گرفته نشده است، افزایش دمای نانوسیال فقط ناشی از انتقال گرما از دیوارها می باشد و برای اعداد رینولدز بالا، دمای خط مرکزی خیلی تحت تاثیر شرط مرزی گرمایی قرار نمی گیرد. هنگامی که در معادله ی انرژی جمله تلفات لزجت در نظر گرفته شود، جریان نانوسیال با تولید گرمای غیر یکنواخت بر واحد حجم همراه است. بنابراین تولید انرژی و انتقال آن بین لایه های نانوسیال سبب می شود دما بر روی خط مرکزی میکروکانال از ابتدای آن شروع به افزایش کند. هر چقدر عدد برینکمن بیشتر باشد تولید انرژی با آهنگ بیشتری صورت می گیرد و دمای خط مرکزی با شیب بیشتری افزایش می یابد.



شکل ۳- حداقل دمای بی بعد به ازای اعداد برینکمن مختلف ($Ha=20$ و $Re=100$ ، $\phi=0.02$)

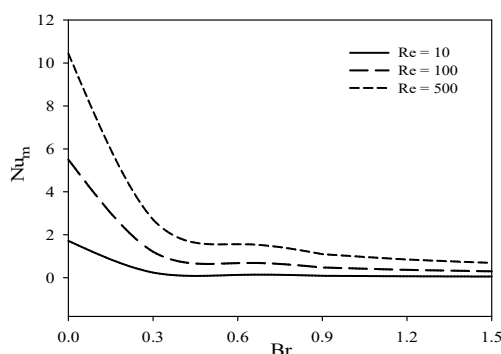
در شکل ۵ پروفیل دما در عرض میکروکانال در مقطع ($X=50$) برای مقادیر مختلف عدد برینکمن رسم شده است. با توجه به شکل ۵ دیده می شود که با افزایش عدد برینکمن دمای نانوسیال به دلیل افزایش آهنگ تولید انرژی افزایش می یابد. چون آهنگ تولید انرژی در

نزدیکی دیواره بیشتر است، بیشترین افزایش دما در مجاورت دیوارها اتفاق می افتد.



شکل ۴- پروفیل دما در عرض میکروکانال در مقطع ($X=50$) برای اعداد برینکمن مختلف ($Ha=20$ و $Re=100$ ، $\phi=0.02$)

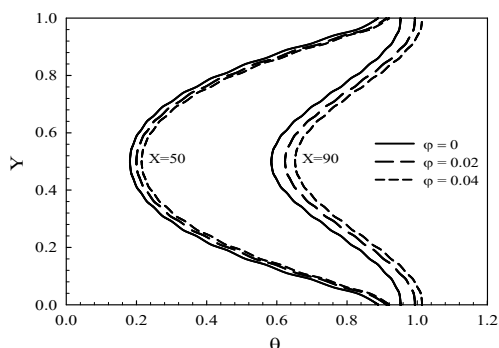
در شکل ۶، تغییرات عدد نوسلت متوسط بر حسب عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان داده شده است. به ازای یک مقدار ثابت برای عدد برینکمن، با افزایش عدد رینولدز عدد نوسلت متوسط افزایش می یابد. این افزایش به این دلیل است که با افزایش عدد رینولدز ضخامت لایه مرزی گرمایی کاهش و گرادیان دما در مجاورت دیوارها افزایش می یابد. با توجه به شکل ۶ دیده می شود که در اعداد برینکمن پائین تاثیر عدد رینولدز بر روی عدد نوسلت متوسط بیشتر است. در اعداد برینکمن بالا به دلیل افزایش تولید انرژی غیر یکنواخت، بین لایه های نانوسیال انتقال گرما صورت می گیرد و باعث می شود که حتی در اعداد رینولدز بالا نیز، لایه ی مرزی گرمایی تمام عرض کانال را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو برای اعداد برینکمن بالا، نقش عدد رینولدز در فرایند انتقال گرما ضعیف تر می شود. کاهش عدد نوسلت متوسط با افزایش عدد برینکمن در یک عدد رینولدز ثابت به دلیل افزایش دمای دیوارها و نانوسیال مجاور آنها است.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد برینکمن برای مقادیر مختلف عدد رینولدز ($Ha=20$ و $\phi=0.02$)

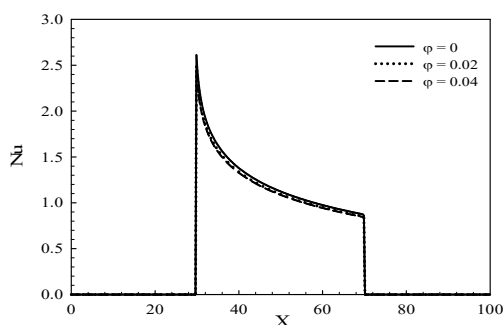
در شکل ۷ خطوط هم دما برای $\phi=0$ و $\phi=0.05$ نشان داده شده است. افزودن نانوذرات به سیال خالص باعث افزایش ضریب رسانایی گرمایی و همچنین افزایش ویسکوزیته ی نانوسیال می شود. افزایش ویسکوزیته سبب افزایش آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت می شود و افزایش ضریب رسانایی گرمایی سبب می شود که

لزجت و هم به دلیل افزایش آهنگ انتقال گرما ناشی از افزایش ضریب رسانایی گرمایی است.



شکل ۹- پروفیل دما در دو مقطع مختلف میکروکانال برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات ($Re = 100, Ha = 20, Br = 0.3$)

در شکل ۱۰ تغییرات عدد نوسلت موضعی برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات نشان داده شده است. با توجه به اینکه نتایج ارائه شده در این بخش به ازای عدد برینکمن $Br = 0.3$ است، تلفات لزجت سبب می شود که دمای نانوسیال در نزدیکی دیوارها افزایش یابد. افزایش دمای نانوسیال در مجاورت دیوارها سبب افزایش دمای سطح و کاهش عدد نوسلت می شود. بنابراین با وجود اینکه افزایش کسر حجمی نانوذرات باعث افزایش ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال می شود و انتظار می رود که عدد نوسلت با افزایش ϕ افزایش یابد، اما به دلیل افزایش آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت، با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد نوسلت موضعی اندکی کاهش یافته است. در واقع با افزایش کسر حجمی نانوذرات ضریب رسانایی گرمایی نانوسیال و همچنین لزجت آن افزایش می یابند. افزایش ضریب رسانایی گرمایی عدد نوسلت را افزایش می دهد و افزایش لزجت عدد نوسلت را کاهش می دهد.

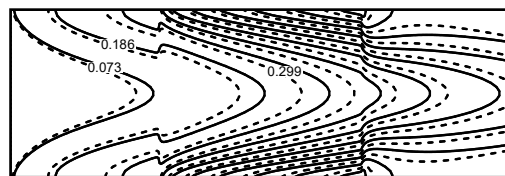


شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت موضعی برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات ($Re = 100, Ha = 20, Br = 0.3$)

۸-۳- بررسی اثر هارتمن باوجود تلفات لزجت

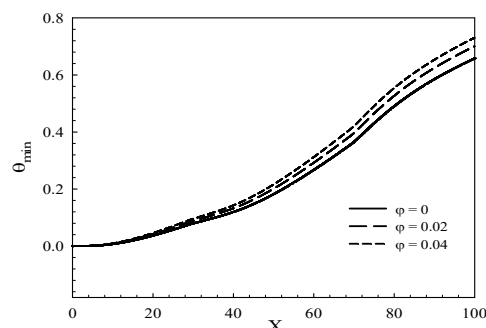
در این قسمت اثر میدان مغناطیسی بر روری میدان های جریان و دما و آهنگ انتقال گرما بررسی می شود. برای این منظور عدد هارتمن

انتقال گرما بین لایه های سیال بهتر صورت بگیرد. بنابراین با توجه به شکل ۷ دیده می شود که در حالتی که نانوذرات به سیال پایه اضافه شده اند، دمای نانوسیال هم در مجاورت دیوارها و هم در مرکز میکروکانال افزایش یافته است.



شکل ۷- خطوط هم دما، $\phi = 0$ (—) و $\phi = 0.05$ (---)، ($Re = 100, Ha = 20, Br = 0.3$)

در شکل ۸ دمای بی بعد روی خط مرکزی میکروکانال برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات نشان داده شده است. از آنجایی که شکل ۸ تلفات لزجت در نظر گرفته شده است ($Br = 0.3$)، دمای خط مرکزی میکروکانال از ابتدای کانال شروع به افزایش می کند. افزایش کسر حجمی نانوذرات به دو دلیل باعث افزایش دمای خط مرکزی میکروکانال می شود. اول اینکه افزایش کسر حجمی نانوذرات لزجت نانوسیال را افزایش می دهد و این سبب افزایش آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت می شود و دوم اینکه افزایش کسر حجمی نانوذرات سبب افزایش ضریب رسانایی گرمایی و افزایش آهنگ انتقال گرما از نانوسیال گرم مجاور دیوار به نانوسیال موجود در ناحیه ی مرکزی میکروکانال می شود.



شکل ۸- حداقل دمای بی بعد برای مقادیر مختلف درصد حجمی نانوذرات ($Re = 100, Ha = 20, Br = 0.3$)

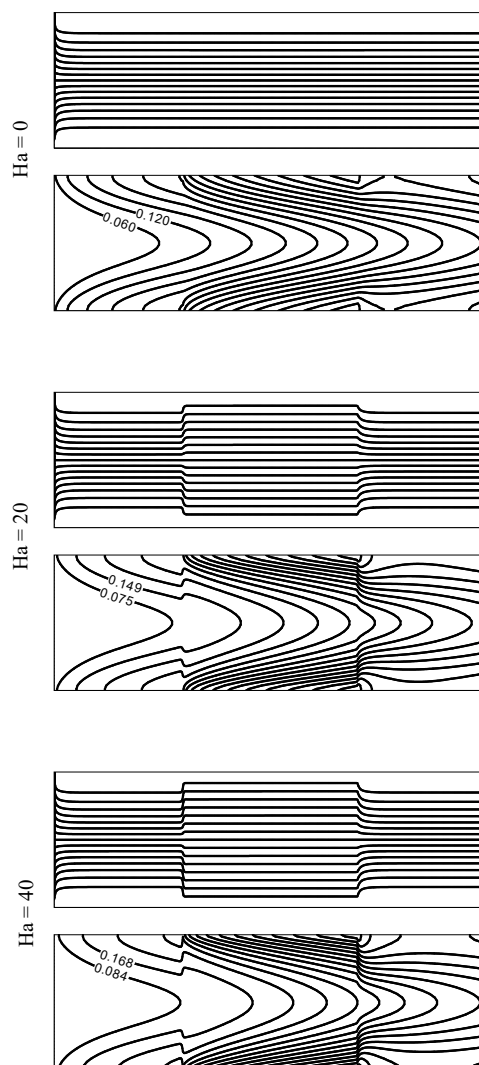
در شکل ۹ پروفیل دمای بدون بعد در دو مقطع $X = 50$ و $X = 90$ برای مقادیر مختلف کسر حجمی نانوذرات نشان داده شده است. مقطع $X = 50$ در ناحیه میانی میکرو کانال که تحت شار گرمایی ثابت قرار دارد، واقع شده است و مقطع $X = 90$ نزدیک به مقطع خروجی میکروکانال است. با توجه به شکل ۹ دیده می شود که در هر دو مقطع، افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش دمای نانوسیال در سراسر عرض میکروکانال شده است. در مقطع $X = 90$ که دیوارهای میکروکانا عایق هستند افزایش دما در مجاورت دیوارهای عایق فقط به دلیل افزایش ویسکوزیته و افزایش آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت است و افزایش دما روی خط مرکزی هم به دلیل افزایش تلفات

در بازه‌ی $0 \leq Ha \leq 40$ تغییر می‌کند در حالی که پارامترهای دیگر ثابت هستند ($Re = 100, Br = 0.3, \phi = 0.02$).

شکل ۱۱ خطوط جریان و هم‌دما را برای مقادیر مختلف عدد هارتمن نشان می‌دهد. با اعمال میدان مغناطیسی به دلیل وجود قابلیت رسانایی الکتریکی در نانوذرات و سیال پایه، نیروی لورنتز به وجود می‌آید. نیروی لورنتز در معادله‌ی X مومنوم توسط عبارت

$$-\frac{\rho_f}{\rho_{nf}} \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} \frac{Ha^2}{Re} U$$

نشان داده شده است.

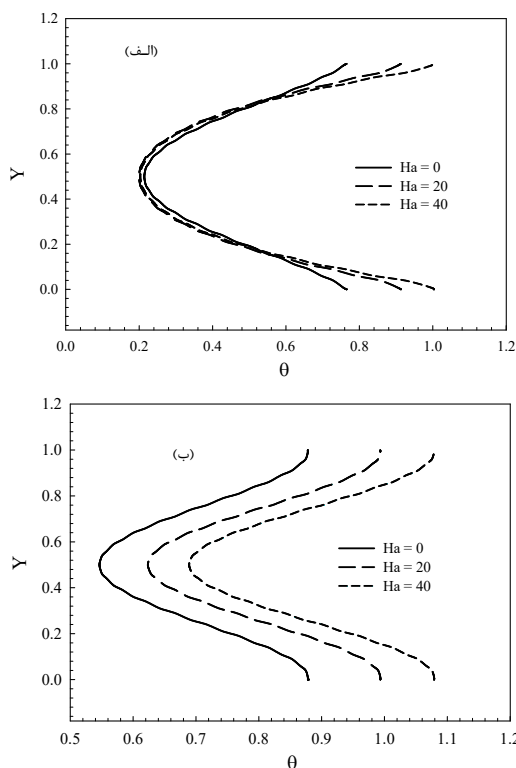


شکل ۱۱- خطوط جریان و هم‌دما به ازای اعداد هارتمن مختلف ($Re = 100, \phi = 0.02, Br = 0.3$)

این نیرو باعث کاهش سرعت در ناحیه‌ی مرکزی میکروکانال می‌شود و با توجه به ثابت بودن دبی جرمی عبوری از میکروکانال به ناچار سرعت جریان در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی میانی میکرو کانال شکسته‌گی‌هایی در خطوط جریان ایجاد می‌شود به طوری که خطوط جریان در ناحیه‌ی مرکزی میکروکانال از هم فاصله می‌گیرند و در مجاورت دیوارها به هم نزدیک‌تر می‌شوند. این

رفتار با افزایش عدد هارتمن و نیروی لورنتز مشهودتر است. افزایش سرعت در مجاورت دیوارها باعث افزایش گرادیان دما در مجاورت دیوارها می‌شود. با توجه به اینکه در این بخش تلفات لزجت نیز در نظر گرفته شده است ($Br = 0.3$)، تغییر سرعت ناشی از اعمال میدان مغناطیسی سبب تغییر جمله‌ی اتلاف لزجت و تغییر گرادیان دما در عرض میکروکانال می‌شود.

در شکل ۱۲ (الف) و (ب) پروفیل دمایی بی‌بعد به ترتیب برای مقاطع $X = 50$ و $X = 90$ برای مقادیر مختلف عدد هارتمن نشان داده شده است. مقطع $X = 50$ در ناحیه‌ی میانی میکرولوله تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار دارد، واقع شده است.



شکل ۱۲- پروفیل دما به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و $X = 90$ (ب) و $X = 50$ (الف) ($Re = 100, \phi = 0.02, Br = 0.3$)

در شکل ۱۲ (الف) دیده می‌شود که با افزایش عدد هارتمن، دمای دیوارهای میکروکانال و نانوسیال مجاور آنها افزایش می‌یابد. با افزایش عدد هارتمن، سرعت جریان در مجاورت دیوارها افزایش می‌یابد و چنانچه تلفات لزجت در نظر گرفته نشود، افزایش سرعت جریان در مجاورت دیوارها سبب کاهش دمای دیوارها می‌شود. اما چون در این بخش تلفات لزجت در نظر گرفته شده است، افزایش سرعت در نزدیکی دیوارها، تلفات لزجت را افزایش می‌دهد و دمای دیوار با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیوارها، آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت در قسمت میانی میکرولوله افزایش می‌یابد، دمای

افزودن نانوذرات به سیال پایه ضریب رسانایی گرمایی و همچنین لزجت نانوسیال را افزایش می‌دهد. افزایش ضریب رسانایی گرمایی عملکرد گرمایی میکروکانال را بهبود می‌بخشد، اما افزایش لزجت نانوسیال آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت را زیاده‌تر می‌کند و سبب می‌شود که آهنگ انتقال گرما از دیوارها به نانوسیال کاهش یابد. بنابراین با افزایش درصد حجمی نانوذرات آهنگ انتقال گرما از دیوارهای میکروکانال اندکی کاهش می‌یابد و در صورتیکه تلفات لزجت حائز اهمیت باشد، افزودن نانوذرات به سیال پایه کمکی در جهت افزایش آهنگ انتقال گرما نمی‌کند.

افزایش عدد هارتمن، اگرچه سرعت جریان را در مجاورت دیوارهای میکروکانال افزایش می‌دهد، اما این افزایش سرعت چون باعث افزایش تلفات لزجت می‌شود، نه تنها آهنگ انتقال گرما از دیوارها را افزایش نمی‌دهد، بلکه سبب کاهش آهنگ انتقال گرما از دیوارها نیز می‌شود.

۱۰- فهرست علائم

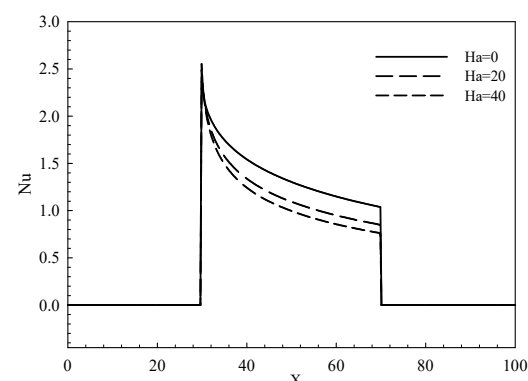
عدد برینکمن	Br
شدت میدان مغناطیسی، T	B ₀
گرمای مخصوص، Jkg ⁻¹ K ⁻¹	C _p
شتاب گرانشی، ms ⁻²	g
عرض کانال، m	h
عرض بی بعد کانال	H
ضریب انتقال گرمای رسانایی، Wm ⁻¹ K ⁻¹	k
طول کانال، m	l
طول بی بعد کانال	L
عدد نوسلت موضعی	Nu _s
عدد نوسلت متوسط	Nu _m
فشار، Nm ⁻²	p
فشار بی بعد	P
عدد پرانتل	Pr
شار گرمایی، Wm ⁻²	q"
عدد رینولدز	Re
دما، K	T
دمای ورودی جریان، K	T _c
سرعت ورودی جریان، ms ⁻¹	u _e
مولفه‌های افقی و عمودی سرعت، ms ⁻¹	u, v
سرعت افقی و عمودی سرعت بی بعد	U, V
سرعت حرکت براونی نانوذرات، ms ⁻¹	v _{Br}
مختصات کارتزین، m	x, y
مختصات بی بعد کارتزین	X, Y

علائم یونانی

ضریب پخش گرمایی، m ² s ⁻¹	α
اختلاف دما	ΔT
دمای بی بعد	θ
ضریب انتقال گرمای جابجایی، Wm ⁻² K ⁻¹	λ

نانوسیال در مقطع خروجی میکرولوله نیز مطابق شکل ۱۲ (ب) با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۳ تغییرات عدد نوسلت موضعی در طول میکروکانال برای اعداد هارتمن مختلف نشان داده شده است. در قسمت‌های ورودی و خروجی میکروکانال که دیوارها عایق هستند، عدد نوسلت صفر است. در قسمت میانی میکروکانال که دیوارها تحت شرط مرزی گرمایی شار ثابت قرار دارند، عدد نوسلت موضعی یک روند کاهشی با افزایش X دارد و همچنین متاثر از عدد هارتمن است. از آنجائیکه با افزایش عدد هارتمن سرعت جریان در نزدیکی دیوارها افزایش می‌یابد، چنانچه تلفات لزجت در نظر گرفته نشود، با افزایش عدد هارتمن عدد نوسلت افزایش می‌یابد. اما هنگامی که تلفات لزجت در نظر گرفته شود، با افزایش عدد هارتمن، به دلیل افزایش گرادیان سرعت در مجاورت دیوارها، آهنگ تولید انرژی ناشی از تلفات لزجت افزایش می‌یابد و دمای نانوسیال در مجاورت دیوارها نیز افزایش می‌یابد و آهنگ انتقال گرما از دیوارها به جریان نانوسیال کاهش می‌یابد. بنابراین در شکل ۱۴ که تلفات لزجت لحاظ شده است (Br = 0.3)، با افزایش عدد هارتمن عدد نوسلت موضعی کاهش یافته است.



شکل ۱۳- تغییرات عدد ناسلت موضعی به ازای اعداد هارتمن مختلف (Re = 100, φ = 0.02, Br = 0.3)

۹- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثر تلفات لزجت بر انتقال گرمای اجباری نانوسیال درون یک میکروکانال صفحه موازی با وجود میدان مغناطیسی به صورت عددی بررسی شده است. نتایج حاصل از حل عددی به صورت زیر قابل جمع‌بندی می‌باشند. با افزایش عدد رینولدز، قدرت خنک‌کنندگی جریان نانوسیال افزایش می‌یابد و بنابراین عدد نوسلت متوسط افزایش می‌یابد. تاثیر عدد رینولدز بر عملکرد گرمایی میکروکانال در اعداد برینکمن پائین چشم‌گیرتر است و با افزایش عدد برینکمن تاثیر عدد رینولدز کمتر می‌شود.

افزایش عدد برینکمن سبب افزایش دمای دیوارهای میکروکانال و دمای نانوسیال جاری در نزدیکی دیوارها می‌شود. بنابراین با افزایش عدد برینکمن آهنگ انتقال گرما از دیوارها به نانوسیال کاهش می‌یابد. این موضوع در قالب کاهش عدد نوسلت متوسط با افزایش عدد برینکمن نشان داده شده است.

- Numerical Heat Transfer*, Part A: Applications, Vol. 59, No. 2, pp. 114-129, 2011.
- [11] Aminossadati S., Raisi A., Ghasemi B., Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 46, No. 10, pp. 1373-1382, 2011.
- [12] Aminfar H., Maroofiazar R., A numerical study of the hydro-thermal behaviour of nanofluids in rectangular microchannels using a mixture model, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 225, No. 4, pp. 791-798, 2011.
- [13] Ghazvini M., Akhavan-Behabadi M., Esmaceli M., The effect of viscous dissipation on laminar nanofluid flow in a microchannel heat sink, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, No. 11, pp. 2697-2706, 2009.
- [14] Jung J. Y., Oh H. S., Kwak H. Y., Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 1, pp. 466-472, 2009.
- [15] Sheikholeslami M., Abelman S., Ganji D. D., Numerical simulation of MHD nanofluid flow and heat transfer considering viscous dissipation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 79, pp. 212-222, 2014.
- [16] Sheikholeslami M., Ganji D. D., Nanofluid flow and heat transfer between parallel plates considering Brownian motion using DTM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 283, pp. 651-663, 2015.
- [17] Hedayati F., Domairry G., Nanoparticle migration effects on fully developed forced convection of TiO₂-water nanofluid in a parallel plate microchannel. *Particuology*, Vol. 24, pp. 96-107, 2016.
- [18] Elgazery N. S., Elazem N. Y. A., Effects of viscous dissipation and Joule heating on natural convection flow of a viscous fluid from heated vertical wavy surface. *Zeitschrift für Naturforschung A*, Vol. 66, No. 6-7, pp. 427-440, 2011.
- [19] Hassani S., Saidur R., Mekhilef S., Hepbasli A., A new correlation for predicting the thermal conductivity of nanofluids using dimensional analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 90, pp. 121-130, 2015.
- [20] Vajjha R. S., Das D. K., Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations. *International journal of heat and mass transfer*, Vol. 52, pp. 4675-4682, 2009.
- [21] Brinkman H.C., The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solution. *The Journal of Chemical Physics*. Vol. 20, pp. 571-581, 1952.
- [22] Patankar S.V., *Numerical heat transfer and fluid flow*. Taylor and Francis Group, New York, 1980.
- [23] Santra A.K., Sen S., Chakraborty N., Study of Heat Transfer Due to Laminar Flow of Copper-Water Nanofluid through Two Isothermally Heated Parallel Plates. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 391-400, 2009.

μ	ویسکوزیته دینامیکی، $\text{kgs}^{-1}\text{m}^{-1}$
ν	ویسکوزیته سینماتیکی m^2s^{-1}
ρ	چگالی، kgm^{-3}
σ	رسانایی الکتریکی $\mu\text{S}/\text{cm}$
φ	درصد حجمی نانوذرات
ϕ	جمله اتلاف لزجت در معادله انرژی
زیر نویس ها	
c	سرد
f	سیال خالص
m	متوسط
max	بیشترین
min	کمترین
nf	نانوسیال
p	نانوذرات
s	دیوار

۱۱- مراجع

- [1] Das S. K., Choi S. U., Patel H. E., Heat transfer in nanofluids—a review. *Heat transfer engineering*, Vol. 27, No. 10, pp. 3-19, 2006.
- [2] S. Kakac, A. Pramuanjaroenkij, Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 13, pp. 3187-3196, 2009.
- [3] Mohammed H., Bhaskaran G., Shuaib N., Saidur R., Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1502-1512, 2011.
- [4] Salman B., Mohammed H., Munisamy K., Kherbeet A. S., Characteristics of heat transfer and fluid flow in microtube and microchannel using conventional fluids and nanofluids: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 28, pp. 848-880, 2013.
- [5] Wang X. Q., Mujumdar A. S., Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, No. 1, pp. 1-19, 2007.
- [6] Tuckerman D. B., Pease R. F., Method and means for improved heat removal in compact semiconductor integrated circuits. *Google Patents*, 1986.
- [7] Tso C., Mahulikar S., Experimental verification of the role of Brinkman number in microchannels using local parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, No. 10, pp. 1837-1849, 2000.
- [8] Hung T. C., Yan W.M., Wang X.D., Chang C.Y., Heat transfer enhancement in microchannel heat sinks using nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, No. 9, pp. 2559-2570, 2012.
- [9] Koo J., Kleinstreuer C., Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 13, pp. 2652-2661, 2005.
- [10] Raisi A., Ghasemi B., Aminossadati S., A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions.