



اثر تغییر موقعیت دیواره گرم و افزایش دامنه و تعداد نوسان دیواره موج دار بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال درون کانال در حضور میدان مغناطیسی

محمد نعمتی^۱، محمد سفید^۲ و احمدرضا رحمتی^{۳*}

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

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

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹

چکیده

در مقاله حاضر، اثر تغییر موقعیت منبع حرارتی بر انتقال حرارت نانوسیال تحت تأثیر میدان مغناطیسی درون کانال موج‌دار با دامنه و تعداد نوسان متغیر، به روش شبکه بولتزمن بررسی شده است. میدان مغناطیسی یکنواخت، عمود بر کانال اعمال شده است. نیمه ابتدایی دیواره بالایی کانال، موجی شکل با دامنه و تعداد نوسان متغیر در دمای ثابت سرد و نیمه از دیواره پایینی کانال با موقعیت متغیر، در دمای ثابت گرم قرار دارد. سایر دیواره‌ها نسبت به جرم و حرارت عایق شده‌اند. در این بررسی تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات، عدد هارتمن، موقعیت قرارگیری دیواره گرم و دامنه و تعداد نوسان دیواره موج‌دار، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در یک موقعیت مشخص قرارگیری دیواره گرم، با افزایش سایر پارامترها، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. همچنین بیشترین میزان انتقال حرارت مربوط به حالتی است که دیواره گرم به ورودی کانال نزدیک‌تر است که به طور متوسط منجر به افزایش ۲۰ درصدی عدد ناسلت متوسط می‌شود. بعلاوه تأثیر افزایش عدد هارتمن بر میزان انتقال حرارت، در حالتی که دیواره گرم به خروجی کانال نزدیک‌تر باشد، بیشتر است. افزایش درصد نانوذره، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد و این تأثیر با کاهش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: روش شبکه بولتزمن؛ جابجایی اجباری؛ نانوسیال؛ میدان مغناطیسی؛ کانال موجی؛ تغییر موقعیت دیواره گرم.

The Effect of Changing the Position of the Hot Wall and Increasing the Amplitude and Number of Oscillations of Wavy Wall on the Flow and Heat Transfer of Nanofluid Inside the Channel in the Presence of Magnetic Field

M. Nemati¹, M. Sefid², A. R. Rahmati^{3,*}

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

² Prof., Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

³ Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

Abstract

In this paper, the effect of changing position of heat source on nanofluid heat transfer under the influence of magnetic field in the wavy channel with variable amplitude and number of oscillations is investigated by lattice Boltzmann method. A uniform magnetic field is applied perpendicular to the channel. The first half of the upper channel wall, wavy form with the amplitude and number of variable oscillations at constant cold temperature, and the half of the bottom channel with variable position, are at constant hot temperature. Other walls are insulated for heat and mass. In this study, the effect of parameters such as Reynolds number, nanoparticle volume fraction, Hartmann number, hot wall position and amplitude and number of wavy wall oscillations were evaluated. The results show that at a specific position location of the hot wall, the average Nusselt number increases with the increase of other parameters. The highest heat transfer also occurs when the hot wall is closer to the channel inlet that results in an average 20% increase in the Nusselt number. The effect of increasing the Hartmann number on heat transfer is greater when the hot wall is closer to the channel outlet. Increasing the percentage of nanoparticles increases heat transfer and this effect increases with decreasing Reynolds number.

Keywords: Lattice Boltzmann Method; Mixed Convection; Nanofluid; Magnetic Field; Wavy Channel; Changing the Position of the Hot Wall.

۱- مقدمه

با توجه به استفاده فراوان از مبدل‌های حرارتی در زمینه‌های مهندسی، افزایش میزان انتقال حرارت در آن‌ها همواره مساله مهمی بوده است و محققان به دنبال راه‌هایی برای این افزایش بوده‌اند. در سالیان اخیر پژوهش‌های زیادی برای توسعه و بهبود مبدل‌های حرارتی صورت گرفته است. برخی از اهداف عمده در این مطالعات را می‌توان صرفه جویی در هزینه و مصرف انرژی و کوچک و سبک کردن آن‌ها برشمرد [۱ و ۲]. سیالاتی مانند آب، هوا و روغن که از گذشته‌ها در انتقال حرارت استفاده می‌شوند دارای ضریب رسانش حرارتی پایینی هستند. برای افزایش انتقال حرارت در این سیالات می‌توان ذراتی با ضریب رسانش حرارتی زیاد و در اندازه نانو را به آن‌ها اضافه نمود [۳-۵]. چوی نخستین کسی بود که ایده افزودن نانوذرات (معمولا ذراتی با ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر) به سیال پایه را پیشنهاد نمود و آن را نانوسیال نامید [۶]. از آنجایی که بهبود رسانایی ناشی از فرآیندهایی در مقیاس نانوذرات معلق می‌باشد، روش‌های عددی که مبتنی بر این اندازه‌ها و مکانیزم‌های حاکم بر آن هستند، امکان توفیق بیشتری دارند. در این بین، روش‌های دینامیک مولکولی و روش شبکه‌ای بولتزمن دارای اهمیت بیشتری می‌باشند و بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش شبکه‌ای بولتزمن از جمله روش‌هایی است که برای مدل‌سازی جریان سیال و نیز بسیاری از فرآیندهای ماکروسکوپی دیگر که از طریق معادلات دیفرانسیلی قابل توصیف هستند، استفاده می‌شود. روش شبکه بولتزمن در کنار سادگی اعمال روابط و شرایط مرزی، قابلیت پردازش موازی و صریح بودن معادلات حاکم، این امکان را نیز فراهم می‌آورد تا نتایج در اندازه مش‌های کمتر در مقایسه با روش‌های عددی مرسوم و نیز سرعت همگرایی بالاتر به دست آید [۷-۹]. به همین دلیل در کار حاضر از روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی استفاده شده است. میدان مغناطیسی هم بر جابجایی اجباری و هم بر جابجایی طبیعی اثرگذار است. استفاده از میدان مغناطیسی در جابجایی طبیعی به دلیل کاستن از سرعت در نزدیکی دیواره‌ها منجر به کاهش انتقال حرارت می‌شود [۱۰-۱۲]. بر خلاف جابجایی طبیعی، در جابجایی اجباری، اعمال نمودن میدان مغناطیسی سبب تخت شدن پروفیل سرعت می‌شود که این امر منجر به افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌های

کانال شده و باعث می‌شود که ضریب انتقال حرارت افزایش یابد [۱۳-۱۵]. میدان مغناطیسی باعث جهت‌گیری منظم ذرات نانوسیال می‌گردد و این موجب ارتباط بیشتر بین ذرات نانو می‌شود. بنابراین در جریان نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی مطلوب، می‌تواند انتقال حرارت را به طور چشمگیری افزایش دهد. از جمله کاربردهای میدان مغناطیسی می‌توان به استفاده در صنایع ریخته‌گری، پلیمر، متالورژی و صنایع حرارتی اشاره نمود [۱۶ و ۱۷]. تاکنون روش‌های زیادی برای افزایش انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی پیشنهاد شده است که به دو دسته روش‌های فعال (با صرف انرژی) و غیرفعال (بدون صرف انرژی) تقسیم می‌شوند. در روش‌های فعال یک عامل خارجی مانند میدان مغناطیسی یا نوسان‌ساز سبب ایجاد تغییر در میدان جریان و افزایش نرخ جابجایی می‌شود. در روش‌های غیرفعال، بدون استفاده از منبع خارجی و فقط با اقداماتی مانند تغییر در هندسه مجرای جریان مانند موج‌دار کردن دیواره‌ها و یا افزودن موادی مانند نانوذرات به سیال، نرخ انتقال حرارت را افزایش می‌دهند [۱۸]. کانال با صفحات غیر مسطح به دلیل افزایش سطح انتقال حرارت، مورد استفاده قرار می‌گیرند. کانال با دیواره موجی از جمله کانال‌هایی هستند که علاوه بر افزایش نرخ انتقال حرارت، تأثیر کمتری بر گرادین فشار نامطلوب در طول کانال دارند و بیشتر در جریان‌هایی با اعداد رینولدز پایین استفاده می‌شوند [۱۹ و ۲۰]. به چند نمونه از تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته است اشاره می‌شود. نتیجه مطالعه مانکا و همکاران [۲۱] نشان داد تغییر موقعیت محل قرار گیری دیواره گرم نقش بسیار مهمی بر میزان انتقال حرارت از کانال دارد. احمد و همکاران [۲۲] جریان نانوسیال را در یک کانال موج‌دار مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش عددی و تغییر عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذرات به بررسی اثر این پارامترها بر میزان انتقال حرارت پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش تمامی پارامترها منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود. امین الساداتی و همکاران [۲۳] نشان دادند که میزان انتقال حرارت از کانال با گرمایش مقطعی، با افزایش عدد هارتمن و عدد رینولدز بیشتر می‌شود. همچنین برای تمامی مقادیر اعداد رینولدز و هارتمن، افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب بیشتر شدن عدد ناسلت می‌شود. ثروتی و همکاران [۲۴] نشان دادند افزایش کسر

توسط ویجاییابو و همکاران [۳۳] صورت گرفت. محمدی-پیروز و همکاران [۳۴] به روش شبکه بولتزمن به بررسی انتقال حرارت درون کانال با موانعی در دیواره‌ها پرداختند. همچنین در زمینه کار حاضر می‌توان به مطالعات گوکالتون و دولیکراویچ [۳۵]، محبی و همکاران [۳۶] و حیدری و همکاران [۳۷] اشاره نمود.

با بررسی کارهای انجام شده، مشاهده می‌شود که تاکنون مطالعات چندانی در رابطه با کانال موج‌دار حاوی نانوسیال با تغییر هندسه و محل قرارگیری دیواره گرم تحت اثر میدان مغناطیسی چه به روش شبکه بولتزمن و چه با سایر روش‌ها، صورت نگرفته است. در این مقاله سعی شده است که تأثیر تمامی پارامترهای مهم در انتقال حرارت کانال مورد بررسی قرار گیرد.

۲- بیان مسأله و مدل ریاضی

۲-۱- بیان مسأله

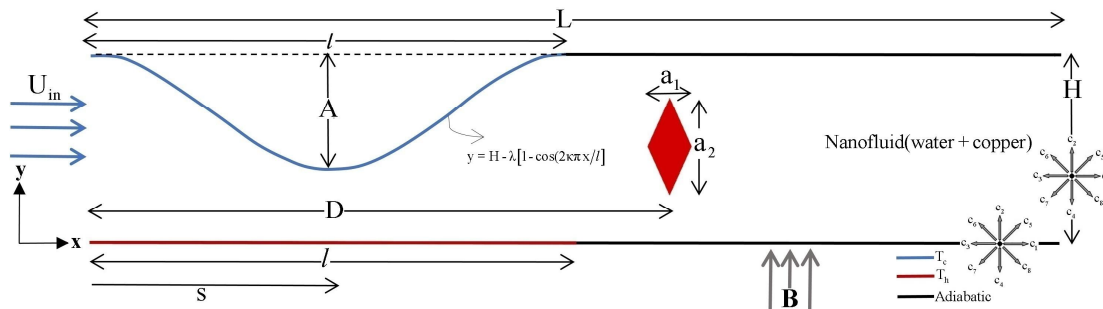
مطابق شکل ۱، کانالی دو بعدی حاوی نانوذرات تحت اثر میدان مغناطیسی یکنواخت عمودی در نظر گرفته شده است. نسبت طول به ارتفاع کانال مقدار ۵ فرض شده است. مانعی لوزی شکل با دمای ثابت گرم (T_h) با نسب طول به ارتفاع برابر ۰/۵ در مسیر جریان قرار گرفته است. نیمه ابتدایی از دیواره بالایی کانال به صورت موج‌دار با دامنه و تعداد نوسان متغیر در دمای ثابت سرد (T_c) در نظر گرفته شده است. نیمی از طول دیواره پایینی کانال در دمای ثابت گرم فرض شده است به نحوی که فاصله این طول نسبت به ابتدای کانال متغیر است. سایر دیواره‌ها آدیاباتیک در نظر گرفته شده‌اند. نانوسیال آب و مس به طور یکنواخت از ورودی با سرعت ثابت و دمای ثابت سرد وارد کانال می‌شود. فرض می‌شود ذرات نانو و ذرات سیال پایه در تعادل حرارتی هستند و اندازه ذرات نانو به قدری کوچک هستند که بتوان از سرعت لغزشی بین ذرات نانو و ذرات سیال صرف‌نظر کرد. جدول ۱ خواص آب و نانوذره مس را نشان می‌دهد.

پروفیل قسمت موج‌دار دیواره بالایی کانال به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است:

$$y = H - A \left[1 - \cos\left(2k\pi \frac{x}{l}\right) \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)، A دامنه و k تعداد موج نوسان می‌باشد.

حجمی ماده جامد سبب افزایش سرعت متوسط و دما در خروجی کانال می‌شود. همچنین عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن به تدریج زیاد می‌شود. عاشوری‌نژاد و ضرغامی [۲۵] تأثیر افزودن نانوذره مس به آب را بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال سینوسی شکل تحت تأثیر میدان مغناطیسی در محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد افزایش کسر حجمی ماده جامد و افزایش قدرت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. نتیجه مطالعه یانگ و همکاران [۲۶] برای بهینه سازی انتقال حرارت از کانال موجی شکل حاوی نانوسیال، نشان داد که افزایش میزان انتقال حرارت، وابسته به عدد رینولدز، دامنه نوسان و کسر حجمی ماده جامد است. حیدری و کرمانی [۲۷] با مطالعه عددی نشان دادند که افزایش کسر حجمی ماده جامد و استفاده از دیواره‌های موجی شکل، میزان انتقال حرارت را تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد. محبی و همکاران [۲۸] انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال درون کانالی را بررسی کردند که در دیواره‌های پایینی و بالایی آن موانعی مربعی شکل با سطح متغیر تعبیه شده بود. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزایش کسر حجمی ماده جامد منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود که درصد این افزایش در رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. بعلاوه مشاهده شد که وجود سطوح گسترش یافته (موانع) موجب افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد. از جمله پژوهش‌های دیگری که در این زمینه صورت گرفته است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. نوری و همکاران [۱۳] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در یک کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. گوهرخواه و همکاران [۲۹] به مطالعه و بهینه‌سازی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تحت اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت پرداختند. درمحمدی و فرزانه [۳۰] انتقال حرارت و تولید آنتروپی نانوسیال درون کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. روغنی و همکاران [۳۱] به بررسی عددی جریان عبوری سیال از روی مانع مربعی شکل پرداختند. پروین و حسین [۳۲] اثر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی سیال درون کانال موجی شکل مثلثی را به روش المان محدود مورد ارزیابی قرار دادند. شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت به روش شبکه بولتزمن از روی موانع مثلثی



شکل ۱- هندسه مسأله مورد بررسی

۲-۲-۱- روش شبکه بولتزنم

در روش شبکه بولتزنم، معادله حاکم، معادله بولتزنم است که با گسسته‌سازی این معادله برای مکان و زمان، تابع توزیع برای میدان جریان و دما حاصل می‌گردد. در کار حاضر از دو تابع توزیع برای میدان جریان و دما استفاده شده است که معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی را در مقیاس میکروسکوپی ارضا می‌کنند. مدل استفاده شده برای گسسته‌سازی معادله بولتزنم بر روی یک شبکه، عموماً به صورت $DnQm$ نمایش داده می‌شود که n بیانگر بعد و m نشان‌دهنده راستاهای مجاز برای حرکت ذرات است. مدل $D2Q9$ رایج‌ترین مدل دوبعدی است که در کار حاضر برای هر دو میدان چگالی و دما به کار گرفته شده است. جزئیات و شکل این آرایش شبکه و مزیت‌های آن در مراجع مختلف ذکر شده است [۳۸ و ۳۹].

معادله گسسته شده بولتزنم با وجود نیروی خارجی برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۱) و (۲) نوشته می‌شود [۴۰].

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_v} [(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t))] + \Delta t c_i F_i \quad (2)$$

$$g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i \Delta t, t + \Delta t) = g_i(\mathbf{x}, t) - \frac{\Delta t}{\tau_c} (g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t)) \quad (3)$$

که در آن Δt گام زمانی شبکه (برابر ۱)، c_i سرعت گسسته شبکه در جهت i ، F نیروی خارجی، τ_c و τ_v به ترتیب بیانگر زمان آسایش برای میدان جریان و دما می‌باشد. f و g به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توابع توزیع مربوط به میدان جریان و دما می‌باشد. تابع توزیع تعادلی در مدل $D2Q9$ برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت روابط (۴) و (۵) بیان می‌شوند.

$$f_i^{eq} = \omega_i \left[1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} - \frac{1}{2c_s^2} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2} \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{c_s^4} \right] \quad (4)$$

در مسأله حاضر فرض شده است که: $\lambda = A/L$ ، $H = 0.2L$ ، $D = 0.6L$ ، $l = 0.5L$ ، $a_1 = 0.15a_2$ و $a_2 = 0.1L$ ، $S = s/L$.

در این شبیه‌سازی تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز (۸، ۲۴ و ۴۸)، عدد هارتمن (۰، ۵ و ۱۵)، $(0.25, 0.5, 0.75)$ و $(0.02, 0.04, 0.06)$ و $(0.1, 0.2)$ و $(1, 2, 4)$ برای کسر حجمی ۰ و ۰/۰۵ نانوذره بر روی انتقال حرارت بررسی شده است. فرض می‌شود که جریان آرام، سیال نیوتنی و غیرقابل تراکم بوده و از ترم‌های اتلاف حرارتی نیز صرف نظر می‌شود.

جدول ۱- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذرات [۲۵] در ۲۵°C

خواص ترموفیزیکی	آب	مس
Pr	۶	-
(J/kgK) C_p	۴۱۷۸	۳۸۳
(W/mK) k	۰/۶۱۶	۴۰۰
(K ⁻¹) β	$2/1 \times 10^{-4}$	$1/67 \times 10^{-5}$
(kg/m ³) ρ	۹۹۵/۷	۸۹۵۴
(nm) d	۰/۳۸۴	۱۰۰

۲-۲- روش حل و معادلات

شبیه‌سازی عددی مسأله توصیف شده با استفاده از روش شبکه بولتزنم صورت می‌گیرد و در ادامه به جزئیات این روش اشاره شده است.

در تعیین میزان انتقال حرارت است به صورت رابطه (۱۱) بر روی دیواره گرم تعریف می‌شود ($\theta = T - T_c / T_h - T_c$).

$$Nu_{av} = \frac{1}{l} \int_0^l -\frac{k_{nf}}{k_f} \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0} dX \quad (11)$$

۲-۲-۲- مدل و روابط به کار رفته برای نانوسیال

در مطالعه حاضر نانوسیال را به عنوان یک محیط پیوسته با تعادل گرمایی بین سیال پایه و ذرات جامد در نظر می‌گیریم. خواص نانوسیال نسبت به تغییرات دما ثابت فرض شده است. همچنین به دلیل استفاده از مدل تک‌فازی، فرض شده است که نانوذرات جامد مشابه همان ذرات سیال پایه هستند و تعادل دمایی و سرعت برابر ذرات جامد و ذرات سیال پایه برقرار خواهد بود. خواص نانوسیال از قبیل چگالی، ظرفیت حرارتی، ضریب انبساط حرارتی و ضریب پخش حرارتی را می‌توان طبق روابط (۱۲) تا (۱۵) محاسبه کرد [۳۶].

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_f + \phi\rho_s \quad (12)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad (13)$$

$$(\rho\beta)_{nf} = (1-\phi)(\rho\beta)_f + \phi(\rho\beta)_s \quad (14)$$

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho C_p)_{nf}} \quad (15)$$

که ϕ کسر حجمی نانوذرات، β ضریب انبساط حرارتی، ρ چگالی و C_p ظرفیت گرمایی ویژه است و زیر نویس‌های f ، s و nf به ترتیب مربوط به سیال خالص، نانو ذرات و نانوسیال است. لزجت دینامیکی نانوسیال طبق رابطه برینکمن [۴۱] محاسبه می‌شود.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (16)$$

برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال برای دو جزء مستقل از ذرات کروی سوسپانسیون از رابطه پاتل و همکاران [۴۲] به صورت روابط (۱۷) و (۲۰) استفاده می‌شود.

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + ck_s Pe \frac{A_s}{k_f A_f} \quad (17)$$

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_s (1-\phi)} \quad (18)$$

$$Pe = \frac{u_s d_s}{\alpha_s} \quad (19)$$

$$g_i^{eq} = \omega_i T \left[1 + \frac{(c_i \cdot u)}{c_s^2} \right] \quad (5)$$

در روابط بالا، ω_i و c_s به ترتیب ضریب وزنی و سرعت صوت شبکه است که برابر است با $c_s = 1/\sqrt{3}$.

کمیت‌های ماکروسکوپیکی چگالی، سرعت و دما به صورت رابطه (۶) تعریف می‌شوند.

$$\rho = \sum_i f_i, \quad \rho u = \sum_i c_i f_i, \quad T = \sum_i g_i \quad (6)$$

ضرایب وزنی و سرعت‌های گسسته شبکه به صورت روابط (۷) و (۸) تعیین می‌شوند [۳۸].

$$\omega_0 = 4/9, \quad \omega_i = 1/9 \quad i=1,2,3,4$$

$$\omega_i = 1/36 \quad i=5,6,7,8 \quad (7)$$

$$c_0 = 0$$

$$c_i = [\cos(\frac{(i-1)\pi}{2}), \sin(\frac{(i-1)\pi}{2})] \quad i=1,2,3,4$$

$$c_i = \sqrt{2} [(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}), \sin(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}))] \quad i=5,6,7,8 \quad (8)$$

نیروی خارجی موجود در مساله انتقال حرارت جابجایی اجباری، نیروی ناشی از میدان مغناطیسی است که در معادله جریان ظاهر می‌شود. برای اعمال نیروی خارجی F در معادله (۲) داریم [۲۵]:

$$F = F_x + F_y$$

$$F_x = 3\omega_i \rho_f \chi (v \sin \zeta \cos \zeta - u \sin^2 \zeta)$$

$$F_y = 3\omega_i \rho_f \chi (u \sin \zeta \cos \zeta - v \cos^2 \zeta)$$

$$\chi = Ha^2 \left(\frac{\mu_{nf}}{H^2} \right) \quad (9)$$

در رابطه (۹)، Ha ، عدد هارتمن و ζ زاویه اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد که در کار حاضر $\zeta = \pi/2$ است.

زمان آسایش مربوط به میدان جریان و دما توسط رابطه (۱۰) از طریق لزجت سینماتیکی (۱۰) و ضریب پخش حرارتی (۱۰) حاصل می‌شوند.

$$\tau_v = \frac{v}{c_s^2 \Delta t} + 0.5, \quad \tau_c = \frac{\alpha}{c_s^2 \Delta t} + 0.5 \quad (10)$$

در روابط فوق، برای آنکه مقدار لزجت سینماتیکی از نظر فیزیکی با معنی و ضریب پخش حرارتی یک مقدار مثبت باشد باید محدودیت $\tau_v > 0.5, \tau_c > 0.5$ لحاظ شود. همچنین لزجت سینماتیکی بر اساس عدد رینولدز به صورت $v_f = U_{in} H / Re$ تعریف می‌شود.

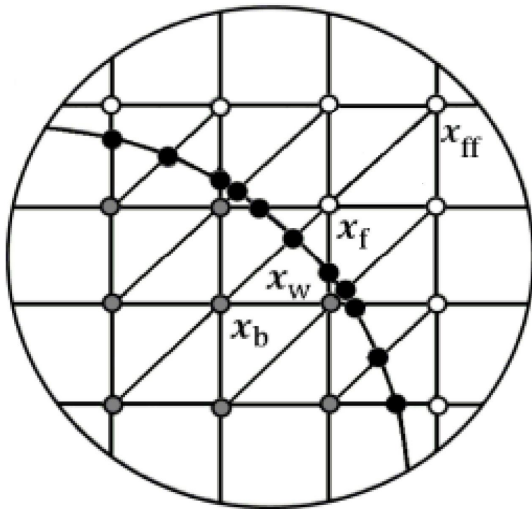
به منظور داشتن معیاری برای تعیین مقدار انتقال حرارت، عدد ناسلت متوسط که یکی از مهمترین اعداد بی‌بعد

است. در این روش بعد از مرحله برخورد، با استفاده از تقریب برون‌یابی توابع توزیع چگالی و انرژی مربوط به تقاطع مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و سرعت مرز منحنی محاسبه می‌شوند. برای مرحله پخش، توابع توزیع محاسبه شده در گره‌های مرز جامد به گره‌های درون حوزه حل منتقل می‌شوند. تقریب برون‌یابی با توجه به محل تقاطع مرز منحنی و راستاهای شبکه از مرتبه اول یا دوم خواهد بود. برای این منظور پارامتر Δ به صورت

$$\Delta = \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|}$$

تعریف شده است که برای محاسبه توابع توزیع چگالی و انرژی استفاده می‌شود [۴۷]. همچنین نحوه اعمال شرایط مرزی دما ثابت روی دیواره گرم پایینی به صورت زیر است [۳۸]:

$$\begin{aligned} g_2 &= (\omega_2 + \omega_4)T_h - g_4, & g_5 &= (\omega_5 + \omega_7)T_h - g_7, \\ g_6 &= (\omega_6 + \omega_8)T_h - g_8 \end{aligned} \quad (25)$$



شکل ۲- مرز دیواره منحنی و گره‌ها

۳- ارزیابی استقلال حل از شبکه و صحت‌سنجی

برای اطمینان از عدم وابستگی نتایج به شبکه انتخاب شده، تغییرات سرعت در شکل ۳ و عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم در جدول ۲ برای پنج شبکه مختلف ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که برای بهینه نمودن محاسبات از نظر دقت و هزینه، شبکه 600×120 را می‌توان انتخاب نمود.

$$u_s = \frac{2k_b T}{\pi \mu_r d_s^2} \quad (20)$$

که در روابط فوق C یک ضریب تجربی بوده و برای نانوسیال آب-مس، $c=36000$ پیشنهاد شده است [۴۳]. d بیانگر قطر ذرات، u_s سرعت حرکت براونی ذرات و k_B ثابت بولتزمن بوده و برابر 1.38×10^{-23} ژول بر درجه کلوین است.

۲-۲-۳- شرایط مرزی

جهت مدل نمودن شرایط مرزی سرعت برای دیواره‌های صاف، از روش کمانه کردن استفاده می‌شود. مثلاً برای دیواره افقی پایینی محفظه، با مشخص بودن f_4 ، f_7 و f_8 و با توجه به ساکن بودن مرزهای جامد برای تابع توزیع جریان رابطه (۲۱) برقرار است [۳۸].

$$f_2 = f_4, f_5 = f_7, f_6 = f_8 \quad (21)$$

در مورد شرایط مرزی ورودی کانال، چون توابع توزیع خروجی از دامنه (f_3, f_6, f_7) از مرحله جاری شدن مشخص هستند، توابع توزیع مجهول ورودی به دامنه و چگالی طبق مدل ژو-هی [۴۴] به صورت رابطه (۲۲) تعیین می‌شوند.

$$\begin{aligned} \rho_{in} &= 1/1 - U_{in} [f_0 + f_2 + f_4 + 2(f_3 + f_6 + f_7)] \\ f_1 &= f_3 + 2/3 \rho_{in} U_{in} \\ f_5 &= f_7 + 1/2(f_4 - f_2) + 1/6 \rho_{in} U_{in} \\ f_8 &= f_6 + 1/2(f_2 - f_4) + 1/6 \rho_{in} U_{in} \end{aligned} \quad (22)$$

برای تعیین توابع توزیع مجهول در خروجی کانال داریم:

$$f_3^n = 2f_3^{n-1} - f_3^{n-2}, f_6^n = 2f_6^{n-1} - f_6^{n-2}, f_7^n = 2f_7^{n-1} - f_7^{n-2} \quad (23)$$

برای شرایط مرزی دمایی خروجی داریم:

$$\begin{aligned} g_3^n &= 2g_3^{n-1} - g_3^{n-2}, & g_6^n &= 2g_6^{n-1} - g_6^{n-2}, \\ g_7^n &= 2g_7^{n-1} - g_7^{n-2} \end{aligned} \quad (24)$$

برای محاسبه سرعت و دما بر روی مرزهای منحنی از روش-های ارائه شده توسط می و همکاران [۴۵] استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از مرز منحنی مورد استفاده و شبکه گره‌ها آورده شده است.

در روش مذکور از بین گره‌های موجود در ناحیه مرز جامد تنها گره‌هایی وارد حوزه محاسباتی می‌شوند که در مجاورت مرز منحنی قرار دارد. این گره‌ها با زیرنویس b مشخص شده‌اند. محل تقاطع راستاهای هشت‌گانه شبکه با مرز منحنی با زیرنویس w نشان داده شده است. اولین و دومین گره در هر یک از راستاهای مذکور درون ناحیه محاسباتی نیز به ترتیب با زیرنویس‌های f و ff نام‌گذاری شده

در این بررسی دو صفحه موازی با دمای ثابت گرم حاوی نانوسیال که موجب خنک کاری می‌شود، در نظر گرفته شده است. همانگونه که در جدول ۳ مشخص است، تطابق خوبی بین کار حاضر و نتایج مراجع وجود دارد.

عملکرد برنامه در جریان‌های تحت تأثیر میدان مغناطیسی نتایج با کار انجام شده در جدول ۳ مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج قابل قبول و منطقی است. همچنین برای بررسی صحت برنامه حاضر برای مرزهای منحنی، خطوط همدمما در شکل ۴ نشان داده شده است که صحت کد نوشته شده را تایید می‌کند.

در کار حاضر، معیار همگرایی برای پایان یافتن محاسبات طبق رابطه ۲۶ بیان شده است.

$$\max \frac{|\Gamma^{n+1} - \Gamma^n|}{|\Gamma^n|} \leq 10^{-7} \quad (26)$$

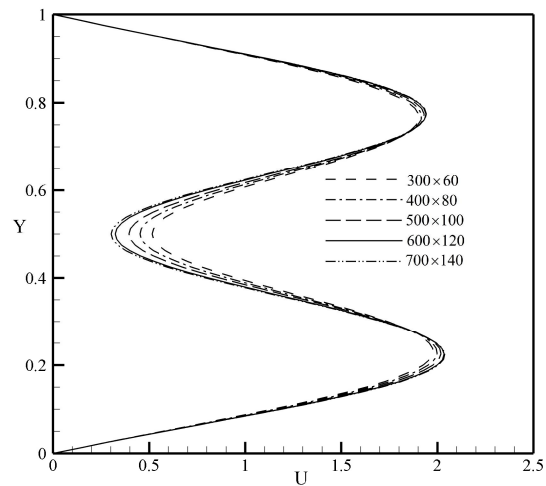
n: تعداد تکرار و Γ : متغیر عمومی (U, V, θ)

جدول ۳- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۴۳] و [۴۶] برای $Re=10$

عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم			
ϕ	مرجع [۴۳]	مرجع [۴۶]	کار حاضر
۰	۰/۴۱۸	۰/۳۷۲	۰/۴۰۱
۰/۰۱	۰/۴۲۸	۰/۳۷۹	۰/۴۱۲
۰/۰۳	۰/۴۳۹	۰/۳۸۸	۰/۴۲۲
۰/۰۵	۰/۴۵۹	۰/۴۰۳	۰/۴۴۱

جدول ۴- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۴۸] برای عدد رایلی 10^5

عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم			
عدد هارتمن	مرجع [۴۸]	کار حاضر	درصد اختلاف
۰	۱۲/۲۳	۱۲/۱۱	۰/۹۸
۵۰	۱۲/۷۵	۱۲/۴۹	۲/۰۴
۱۰۰	۱۳/۱۸	۱۲/۷۷	۳/۱۱



شکل ۳- سرعت افقی در $X=0.75$ برای $Ha=5$, $\phi=0.05$ و $\lambda=0.06$ و $\kappa=1$, $S=0.25$, $Re=48$

برای اثبات کارایی روش و برنامه نوشته شده، نتایج عددی حاصل، با کارهای مشابه صورت گرفته توسط دیگران مقایسه شده است. برای بررسی عملکرد کد رایانه‌ای نوشته شده به زبان فورتن در مسائل انتقال حرارت جابجایی نانوسیال در کانال‌ها، مقایسه‌ای در مورد جریان نانوسیال در یک کانال افقی صورت گرفته است.

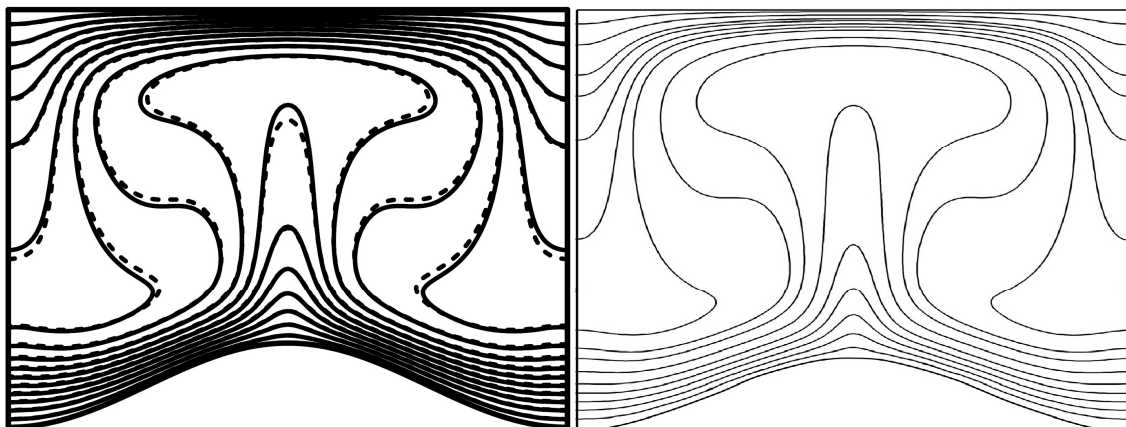
جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای ابعاد مختلف شبکه برای $Re=48$, $\phi=0.05$, $S=0.25$, $\kappa=2$ و $\lambda=0.04$

ابعاد شبکه	عدد هارتمن	Nu_{av}
۳۰۰×۶۰	۰	۱۳/۴۵۱
	۱۵	۱۴/۹۹۱
۴۰۰×۸۰	۰	۱۴/۱۸۵
	۱۵	۱۵/۸۹۳
۵۰۰×۱۰۰	۰	۱۴/۹۱۱
	۱۵	۱۶/۶۷۱
۶۰۰×۱۲۰	۰	۱۵/۴۷۹
	۱۵	۱۷/۱۸۸
۷۰۰×۱۴۰	۰	۱۵/۸۰۴
	۱۵	۱۷/۶۳۱

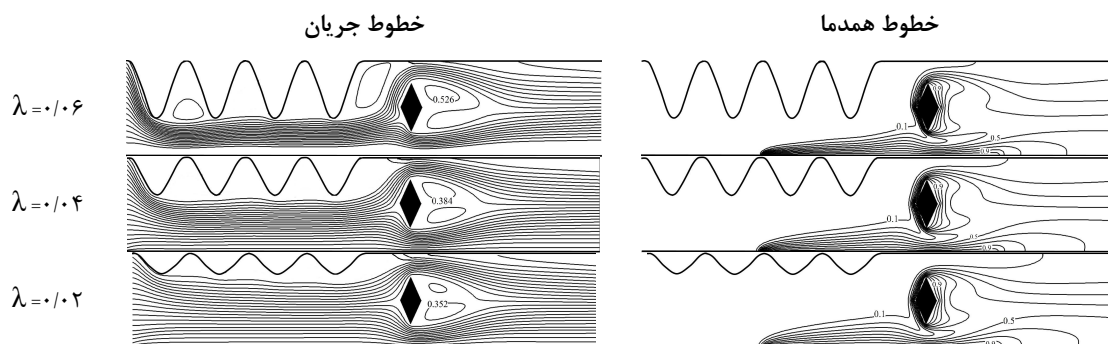
۴- نتایج

وجود نانوذرات است. در شکل ۵ خطوط جریان و همدمها به ازای مقادیر مختلف دامنه نوسان نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود افزایش دامنه نوسان سبب تراکم خطوط همدمها بر روی دیواره گرم می‌شود که این عامل سبب افزایش گرادیان دما و به تبع آن افزایش انتقال حرارت می‌شود. جریان در حین عبور از کانال پس از برخورد با مانع، به علت جدایش جریان و بازیابی مومنتم ورودی به مقدار اولیه، باعث تشکیل گردابه‌های کوچک در پشت مانع می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که افزایش دامنه سبب ایجاد گردابه‌های کوچک‌تر در نزدیکی دیواره به علت ایجاد جریان برگشتی می‌شود. لازم به ذکر است که به دلیل عدم تقارن کانال، گردابه‌های ایجاد شده پشت مانع، نامتقارن هستند.

همچنین برای بررسی صحت برنامه حاضر در مواجهه با مرزهای منحنی، خطوط همدمها برای کار حاضر و مرجع [۴۷] در شکل ۴ نشان داده شده است که صحت کد نوشته شده را تایید می‌کند. برای بررسی عملکرد برنامه در جریان‌های تحت تأثیر میدان مغناطیسی، نتایج با کار انجام شده در مرجع [۴۸] در جدول ۴ مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج قابل قبول و منطقی است. همچنین برای بررسی در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ارائه و بیان می‌شود. هدف، بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر از قبیل عدد رینولدز، عدد هارتمن، موقعیت قرارگیری دیواره گرم و دامنه و تعداد نوسان دیواره موج‌دار کانال بر روی ماهیت و عملکرد انتقال حرارت جابجایی اجباری با



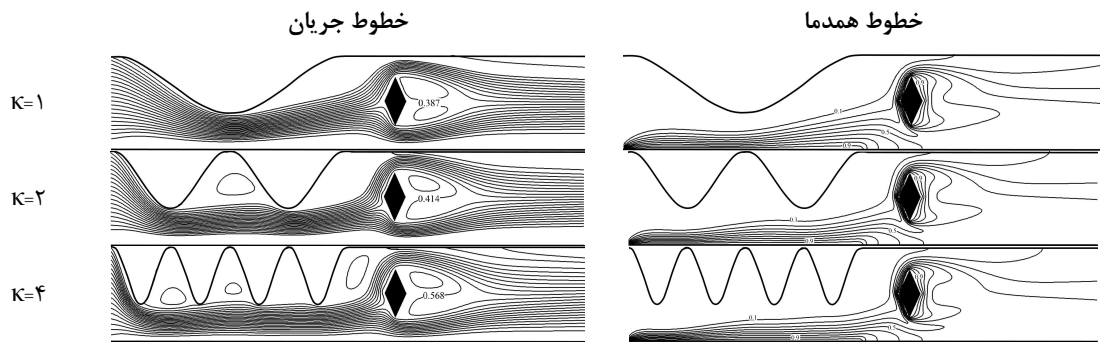
شکل ۴- مقایسه خطوط همدمها در عدد رایلی 10^5 (سمت راست کار حاضر و سمت چپ مرجع [۴۷])



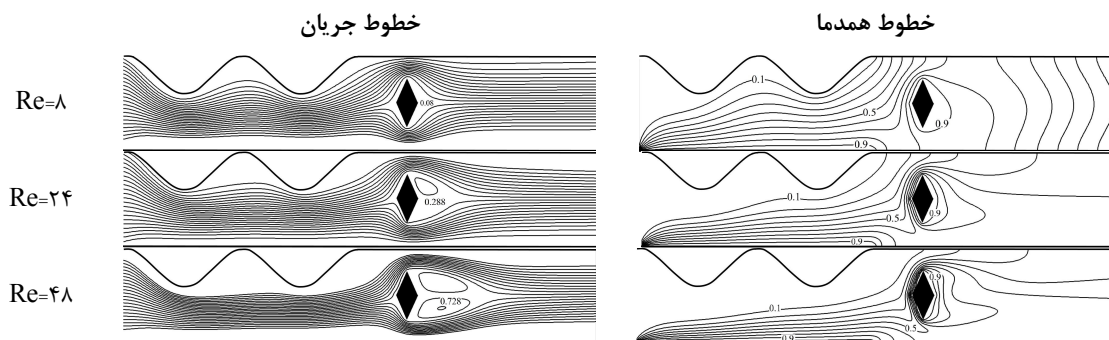
شکل ۵- خطوط جریان و همدمها به ازای مقادیر مختلف λ برای $Ha=0$ ، $\varphi=0$ ، $Re=48$ ، $S=0.5$ و $\kappa=4$

به نقطه سکون اتفاق می‌افتد. بعلاوه با افزایش عدد رینولدز و به تبع آن افزایش سرعت سیال و اثرات جابجایی، خطوط همدمای در نزدیکی دیواره گرم متراکم‌تر شده و نتیجه آن افزایش انتقال حرارت است. تأثیر افزودن نانوذرات، موقعیت قرارگیری دیواره گرم و عدد هارتمن بر خطوط همدمای شکل ۸ نشان داده شده است. تقویت قدرت میدان مغناطیسی با افزایش عدد هارتمن منجر به نزدیک‌تر شدن خطوط همدمای می‌شود. زیرا افزایش عدد هارتمن منجر به افزایش گرادیان دما در نزدیکی دیواره می‌شود. همچنین با افزایش عدد هارتمن، انحنای خطوط کم می‌شود و به موازات دیوار قرار می‌گیرند و سبب افزایش گرادیان دما نزدیک دیواره می‌شود. این افزایش گرادیان دما باعث افزایش عدد ناسلت شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که تراکم خطوط همدمای در قسمت جلویی مانع که در برابر جریان قرار دارد، خیلی بیشتر از قسمت پشت مانع

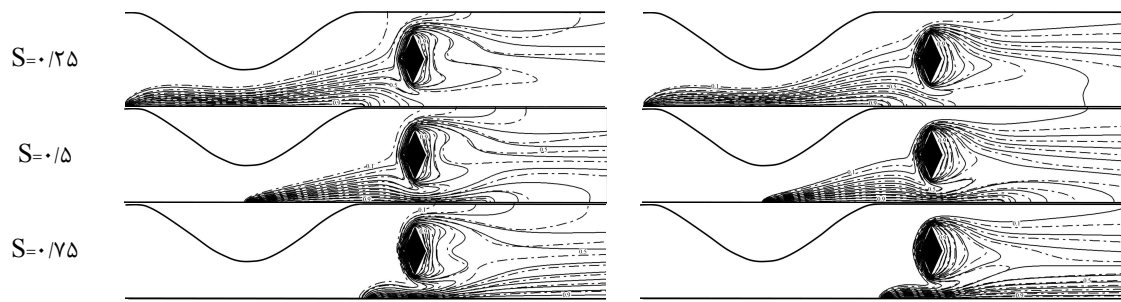
شکل ۶ خطوط جریان و خطوط همدمای را برای مقادیر مختلف K نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش تعداد نوسان، تعداد گردابه‌های کوچک ایجاد شده در مجاورت دیواره نوسانی افزایش می‌یابد. زیرا افزایش تعداد نوسان به مثابه افزایش تعداد موانع در سر راه جریان است که موجب ایجاد جریان برگشتی و تشکیل گردابه‌های کوچک می‌شود. افزایش K به دلیل افزایش سطح تبادل حرارت در طول دیواره گرم، سبب فشرده‌تر کردن خطوط همدمای می‌شود. تأثیر عدد رینولدز بر جریان در شکل ۷ نشان داده شده است. در عدد رینولدز ۸ به دلیل غالب بودن نیروی ویسکوز، جدایش سیال از روی مانع رخ نمی‌دهد، ولی با افزایش عدد رینولدز به دلیل افزایش اثرات نیروی اینرسی نسبت به نیروی ویسکوز، جدایش جریان را شاهد خواهیم بود. همچنین با افزایش عدد رینولدز، اندازه گردابه‌های ایجاد شده افزایش می‌یابد و جدایی جریان در زاویه کمتری نسبت



شکل ۶- خطوط جریان و همدمای به ازای مقادیر مختلف K برای $Ha=0$ ، $\varphi=0$ ، $Re=48$ ، $S=0/25$ و $\lambda=0/06$



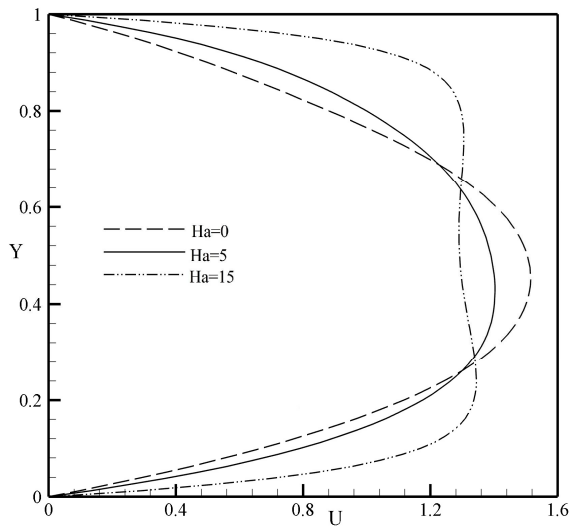
شکل ۷- خطوط جریان و همدمای به ازای مقادیر مختلف Re برای $Ha=0$ ، $\varphi=0/05$ ، $K=2$ ، $S=0/25$ و $\lambda=0/04$



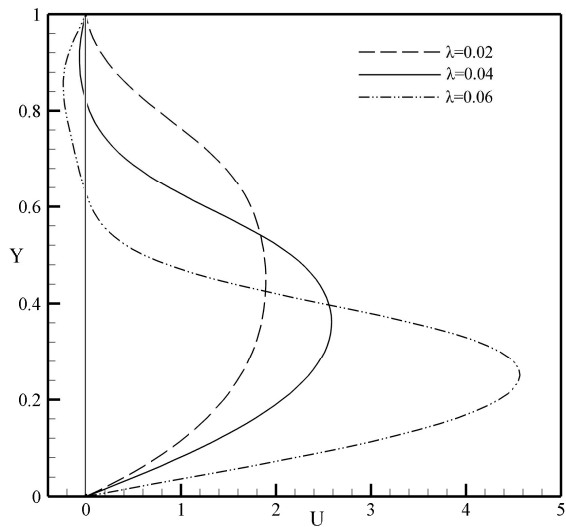
شکل ۸- خطوط همدمما برای مقادیر مختلف S و Ha (سمت راست Ha=۱۵ و سمت چپ Ha=۰) برای $\lambda=0.06$ ، $\kappa=1$ ، $Re=48$ ، $\phi=0.05$ (-) و $\phi=0$ (-)

افزایش یابد. همچنین با افزایش κ ، ناحیه جدایش جریان نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ تغییرات سرعت را بر حسب مقادیر مختلف عدد رینولدز نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود با افزایش عدد رینولدز، سرعت نیز افزایش می‌یابد. بعلاوه در عدد رینولدز ۸ که نیروی ویسکوز غالب است، جریان برگشتی وجود ندارد اما با افزایش اثرات اینرسی با افزایش عدد رینولدز، ناحیه جریان برگشتی افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، سرعت در نزدیکی دیواره بیشتر می‌شود و این عامل سبب ایجاد گردایان دمایی بیشتر در نزدیکی دیواره گرم شده و باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می‌گردد. در جدول ۵ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای مقادیر مختلف عدد هارتمن و عدد رینولدز برای کسر حجمی ۰ و ۰/۰۵ نانوسیال ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود افزایش عدد رینولدز و درصد حجمی نانوذره سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود ولی اثر عدد هارتمن بستگی به عدد رینولدز دارد به نحوی که افزایش عدد هارتمن در $Re=8$ موجب کاهش و با افزایش عدد رینولدز سبب افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. افزایش عدد رینولدز به سبب افزایش سرعت جریان و افزایش اثرات جابجایی و افزایش عدد هارتمن به دلیل افزایش سرعت در نزدیکی دیواره و متراکم کردن خطوط همدمما، انتقال حرارت را افزایش می‌دهند. مثلاً در $\phi=0.05$ ، افزایش عدد هارتمن از صفر به ۱۵، منجر به کاهش ۰/۲۲ درصدی عدد ناسلت متوسط برای عدد رینولدز ۸ و افزایش ۷/۹۸ درصدی برای عدد رینولدز ۴۸ می‌شود. افزودن نانوذره به سیال پایه نیز به دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. بعلاوه با کم شدن عدد رینولدز، تأثیر افزودن نانوذره در افزایش عدد

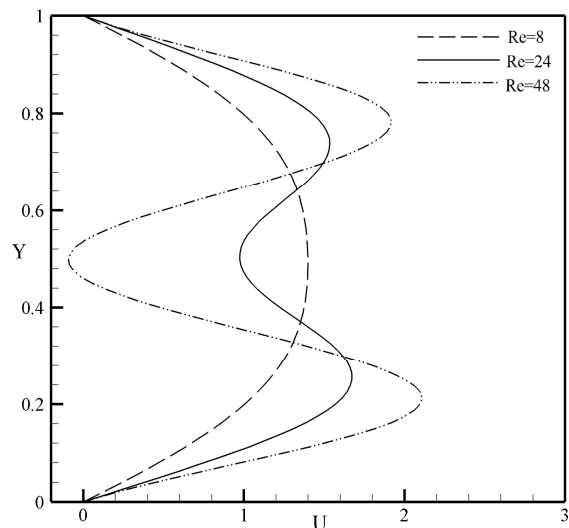
است و نشان از گردایان دمایی بالا دارد. بعلاوه مشاهده می‌شود که وقتی $S=0.25$ است، به دلیل وجود دیواره موجی شکل، تراکم خطوط همدمما در نزدیکی دیواره بیشتر از دو حالت دیگر است که همین امر موجب بیشتر بودن عدد ناسلت متوسط نسبت به دو حالت دیگر است. شکل ۹ تغییرات سرعت افقی در قسمت میانی کانال را بر حسب تغییرات دامنه نوسان نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد با افزایش دامنه، سرعت افزایش می‌یابد زیرا بر طبق قانون بقای جرم، با کم شدن سطح مقطع عبوری سیال، برای پایستاری جرم، باید سرعت افزایش یابد. به همین دلیل گردایان دمایی نزدیک دیواره نیز افزایش می‌یابد و منجر به افزایش انتقال حرارت می‌گردد. مقدار منفی سرعت، ناحیه جریان چرخشی را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش دامنه نوسان، ناحیه جدایی جریان افزایش می‌یابد. شکل ۱۰ تأثیر عدد هارتمن که بیانگر قدرت میدان مغناطیسی است را بر سرعت افقی نشان می‌دهد. وجود میدان مغناطیسی عمودی باعث ایجاد نیرویی مقاوم در برابر حرکت سیال می‌شود. بنابراین افزایش عدد هارتمن سبب کاهش مقدار سرعت سیال می‌گردد. همانطور که دیده می‌شود، افزایش عدد هارتمن منجر به تخت‌تر شدن پروفیل سرعت می‌گردد. این تخت شدن پروفیل سرعت سبب می‌گردد تا مقادیر سرعت متوسط در کنار دیواره‌ها افزایش یابد که این افزایش گردایان سرعت سبب افزایش گردایان دما و به تبع آن افزایش عدد ناسلت می‌شود. تأثیر κ بر سرعت جریان در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد نوسان، سرعت افزایش می‌یابد. زیرا طبق قانون بقای جرم برای جریان تراکم‌ناپذیر، برای جبران کاهش سطح باید سرعت



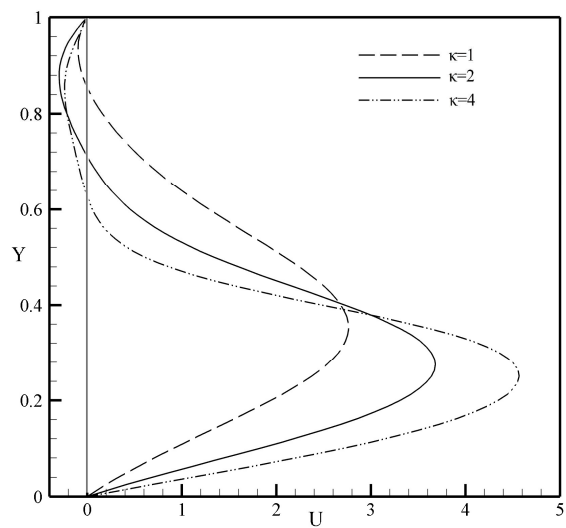
شکل ۱۰- سرعت افقی در $X=0.5$ برای مقادیر مختلف Ha در $\kappa=1, S=0.5, Re=48, \phi=0.05, \lambda=0.02$



شکل ۹- سرعت افقی در $X=0.5$ برای مقادیر مختلف λ در $\kappa=4, S=0.75, Re=48, \phi=0, Ha=0$



شکل ۱۲- سرعت افقی در $X=0.75$ برای مقادیر مختلف Re در $Ha=0, S=0.25, \kappa=2, \phi=0.05, \lambda=0.04$



شکل ۱۱- سرعت افقی در $X=0.5$ برای مقادیر مختلف κ در $Ha=0, S=0.25, Re=48, \phi=0, \lambda=0.06$

متوسط می‌شود. مثلاً در غیاب نانوذره و میدان مغناطیسی، افزایش عدد رینولدز از ۸ به ۴۸، منجر به افزایش ۶۷ درصدی عدد ناسلت می‌شود که این افزایش خیلی چشمگیر است. در جداول ۶ تا ۸ عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای تغییرات تعداد و دامنه نوسان دیواره موج‌دار، محل قرارگیری دیواره گرم و عدد هارتمن برای سیال پایه و نانوسیال در $Re=48$ ارائه شده است. همانطور که ملاحظه

ناسلت متوسط بیشتر می‌شود. زیرا در این حالت هدایت بر جابجایی غلبه دارد و افزودن نانوذره به دلیل افزایش ضریب رسانایی، انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. مثلاً در $Ha=15$ ، افزایش درصد نانوذره از صفر به ۰/۰۵ منجر به افزایش ۱۸/۴ و ۹/۹ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای اعداد رینولدز ۸ و ۴۸ می‌شود. عدد رینولدز بر میزان انتقال حرارت بسیار تأثیرگذار است و افزایش آن سبب افزایش عدد ناسلت

جدول ۵- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز، کسر حجمی ماده جامد و عدد هارتمن

برای $S=0.25$, $K=2$ و $\lambda=0.04$

Re	Ha	ϕ	عدد ناسلت متوسط	درصد اختلاف
۸	۰	۰	۸/۷۴۴	-
	۱۵	۰	۸/۷۳۳	-۰/۱۳
	۰	۰/۰۵	۱۰/۳۶۲	-
	۱۵	۰/۰۵	۱۰/۳۳۹	-۰/۲۲
۲۴	۰	۰	۱۲/۰۸۱	-
	۱۵	۰	۱۲/۳۳۸	۲/۱۳
	۰	۰/۰۵	۱۳/۴۱۹	-
	۱۵	۰/۰۵	۱۳/۸۱۸	۲/۹۷
۴۸	۰	۰	۱۴/۶۰۳	-
	۱۵	۰	۱۵/۶۳۹	۷/۱
	۰	۰/۰۵	۱۵/۹۱۷	-
	۱۵	۰/۰۵	۱۷/۱۸۸	۷/۹۸

جدول ۶- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف K ، کسر حجمی ماده جامد، S و عدد هارتمن برای $Re=48$

$\lambda=0.06$ و

κ	Ha	ϕ	$S=0.25$	$S=0.5$	$S=0.75$
۱	۰	۰	۱۵/۰۴۵	۱۳/۷۶۱	۱۲/۱۶۲
		۰/۰۵	۱۶/۶۴۱	۱۵/۰۰۹	۱۲/۹۱۵
	۵	۰	۱۵/۳۱۵	۱۴/۱۳۶	۱۲/۷۸۱
		۰/۰۵	۱۷/۲۲۲	۱۵/۵۸۶	۱۳/۷۹۲
	۱۵	۰	۱۵/۹۹۵	۱۵/۴۹۹	۱۴/۶۴۵
		۰/۰۵	۱۸/۳۴۵	۱۷/۳۱۵	۱۵/۹۳۲
۲	۰	۰	۱۶/۶۰۵	۱۵/۴۲۹	۱۳/۵۴۸
		۰/۰۵	۱۷/۷۶۱	۱۶/۲۱۹	۱۳/۹۴۳
	۵	۰	۱۶/۹۸۱	۱۵/۹۴۱	۱۴/۴۳۳
		۰/۰۵	۱۸/۷۲۱	۱۶/۶۹۱	۱۴/۹۵۱
	۱۵	۰	۱۷/۹۲۲	۱۶/۹۴۴	۱۵/۸۹۲
		۰/۰۵	۱۹/۸۴۱	۱۸/۸۰۸	۱۷/۳۱۱
۴	۰	۰	۱۷/۹۵۵	۱۶/۷۱۷	۱۵/۱۷۵
		۰/۰۵	۱۹/۲۱۱	۱۷/۰۵۹	۱۵/۵۹۹
	۵	۰	۱۸/۵۳۱	۱۶/۹۰۴	۱۵/۴۶۷
		۰/۰۵	۲۰/۴۷۷	۱۷/۵۱۷	۱۵/۹۳۱
	۱۵	۰	۲۰/۰۶۳	۱۸/۹۵۹	۱۷/۶۴۵
		۰/۰۵	۲۲/۴۸۵	۲۱/۰۷۴	۱۹/۲۷۵

جدول ۷- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف K ، کسر حجمی ماده جامد، S و عدد هارتمن برای $Re=48$ و $\lambda=0/04$

κ	Ha	ϕ	$S=0/25$	$S=0/5$	$S=0/75$
۱	۰	۰	۱۳/۳۸۵	۱۲/۳۱۴	۱۰/۹۷۵
		۰/۰۵	۱۴/۷۲۳	۱۳/۳۶۱	۱۱/۶۳۳
	۵	۰	۱۳/۵۲۴	۱۲/۶۴۲	۱۱/۵۲۴
		۰/۰۵	۱۵/۲۳۱	۱۴/۸۴۹	۱۲/۴۲۳
	۱۵	۰	۱۴/۲۱۴	۱۳/۶۶۸	۱۳/۰۶۱
		۰/۰۵	۱۶/۰۴۸	۱۵/۲۳۲	۱۴/۱۸۴
۲	۰	۰	۱۴/۶۰۳	۱۳/۷۶۷	۱۲/۱۸۳
		۰/۰۵	۱۵/۴۷۹	۱۴/۵۱۱	۱۲/۵۲۴
	۵	۰	۱۴/۹۱۲	۱۴/۱۸۴	۱۲/۹۲۶
		۰/۰۵	۱۶/۳۸۶	۱۴/۸۱۹	۱۳/۳۷۸
	۱۵	۰	۱۵/۶۳۹	۱۵/۰۶۱	۱۴/۲۵۴
		۰/۰۵	۱۷/۱۸۸	۱۶/۷۰۳	۱۵/۴۰۹
۴	۰	۰	۱۵/۷۴۱	۱۴/۶۵۴	۱۳/۷۷۳
		۰/۰۵	۱۶/۶۸۵	۱۴/۹۴۷	۱۴/۱۸۶
	۵	۰	۱۶/۲۴۵	۱۵/۹۵۸	۱۴/۰۴۸
		۰/۰۵	۱۷/۸۶۸	۱۶/۵۱۶	۱۴/۴۸۳
	۱۵	۰	۱۷/۴۲۵	۱۶/۵۵۹	۱۵/۸۲۵
		۰/۰۵	۱۹/۴۸۱	۱۸/۳۶۴	۱۷/۲۱۸

ناسلت متوسط می‌شود. محل قراگیری دیواره گرم، پارامتر بسیار مهمی در تعیین میزان انتقال حرارت است به نحوی که با ثابت بودن تمامی پارامترها، افزایش مقدار S (افزایش فاصله دیواره گرم از ورودی کانال) سبب کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. زیرا بر اساس هندسه کانال، هر اندازه S بیشتر باشد، سطح تبادل حرارت دیواره گرم با دیواره سرد دورتر می‌شود و هم دیواره گرم به مانع گرمی که در مسیر جریان قرار گرفته نزدیک‌تر می‌شود. به عنوان نمونه به ازای مقادیر $\lambda=0/06$ ، $Ha=0$ ، $K=2$ و $\phi=0$ ، افزایش S از $0/25$ تا $0/75$ منجر به کاهش حدود ۱۸ درصدی مقدار انتقال حرارت می‌گردد. همچنین دیده می‌شود که افزایش عدد هارتمن در تمامی

می‌شود، افزایش تعداد و دامنه نوسان دیواره موجی در هر یک از مقادیر S ، منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می‌شود. زیرا در این حالت سطح تبادل حرارت افزایش یافته و نرخ انتقال حرارت بیشتر می‌شود. از طرفی همانطور که بیان شد، افزایش دامنه و تعداد نوسات منجر به افزایش سرعت جریان و در نتیجه افزایش گرادیان دمایی روی دیواره گرم می‌شود. به عنوان نمونه در حالتی که $\lambda=0/06$ ، $Ha=15$ ، $S=0/25$ و $\phi=0/05$ ، افزایش تعداد نوسان از ۱ به ۴، منجر به افزایش ۲۲/۶ درصدی عدد ناسلت متوسط می‌گردد. و یا در حالتی که $k=4$ ، $Ha=0$ و $S=0/75$ ، $\phi=0$ افزایش نسبت دامنه نوسان از $0/02$ به $0/06$ سبب افزایش ۲۵/۵ درصدی عدد

جدول ۸- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف K ، کسر حجمی ماده جامد، S و عدد هارتمن برای $Re=48$

و $\lambda = 0.02$

κ	Ha	ϕ	$S=0.25$	$S=0.5$	$S=0.75$
1	.	.	12/021	11/107	10/038
		0.05	13/103	12/041	10/612
	5	.	12/143	11/396	10/529
		0.05	13/696	12/649	11/308
	15	.	12/741	12/229	11/971
		0.05	14/411	13/562	13/036
2	.	.	13/079	12/239	11/098
		0.05	13/877	12/954	11/401
	5	.	13/341	12/699	11/772
		0.05	14/751	13/321	12/179
	15	.	13/971	13/439	12/995
		0.05	15/508	14/917	14/061
4	.	.	14/065	13/106	12/641
		0.05	14/909	13/369	13/021
	5	.	14/488	14/089	12/894
		0.05	15/937	14/596	13/294
	15	.	15/471	14/796	14/537
		0.05	17/405	16/421	15/845

می‌دهد که این تأثیر با افزایش عدد هارتمن، بیشتر می‌شود. در شکل ۱۳ تأثیر ϕ ، S و Ha بر مجموع دمای بی‌بعد خروجی کانال نشان داده شده است. دیده می‌شود که افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب افزایش مجموع دمای خروجی می‌شود. همچنین با افزایش عدد هارتمن، مجموع دمای خروجی کاهش می‌یابد که شیب این کاهش برای عدد هارتمن بزرگتر از ۵، کمتر است. بعلاوه دیده می‌شود که مجموع دمای خروجی با افزایش S افزایش می‌یابد که با توجه به محل محل قرارگیری دیواره گرم در نزدیکی خروجی کانال، امری واضح است.

حالات، عدد ناسلت متوسط را افزایش می‌دهد. تأثیر این پیرامتر با افزایش S ، بیشتر می‌شود. زیرا وقتی که دیواره گرم به ورودی کانال نزدیک است، دیواره موج‌دار عامل فشرده شدن خطوط همدمای می‌شود که این عامل زمانی که دیواره گرم در نزدیکی خروجی کانال است، وجود ندارد. مثلاً افزایش عدد هارتمن از صفر به ۱۵ در حالتی که $Re=48$ ، $\phi=0.05$ ، $K=1$ و $\lambda=0.06$ است، افزایش ۲۳ و ۱۵ درصدی عدد ناسلت متوسط را به ترتیب برای $S=0.25$ و $S=0.75$ در پی خواهد داشت. بعلاوه دیده می‌شود که افزایش درصد حجمی ماده جامد در تمامی حالات، میزان انتقال حرارت را افزایش

شده و گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره افزایش می‌یابد و به تبع آن گرادیان دما نیز افزایش می‌یابد.

۵- با فاصله گرفتن دیواره گرم از ورودی کانال، اثر افزایش قدرت میدان مغناطیسی، بیشتر می‌شود.

۶- با افزایش کسر حجمی ماده جامد، ضریب هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد و بر میزان انتقال حرارت افزوده می‌شود که درصد این تأثیر با افزایش عدد رینولدز، کاهش می‌یابد.

۷- بیشترین میزان انتقال حرارت برای نانوسیال در بیشترین عدد رینولدز و در حالتی که دیواره گرم به ورودی کانال نزدیک‌تر باشد و عدد هارتمن، دامنه نوسان و تعداد موج دیواره بیشترین باشد، اتفاق می‌افتد.

۶- فهرست علائم

دامنه نوسان

قدرت میدان مغناطیسی

سرعت گسسته شبکه

سرعت صوت

گرمای ویژه در فشار ثابت

قطر ذرات

فاصله مانع گرم از ورودی کانال

نیروی خارجی

تابع توزیع جریان

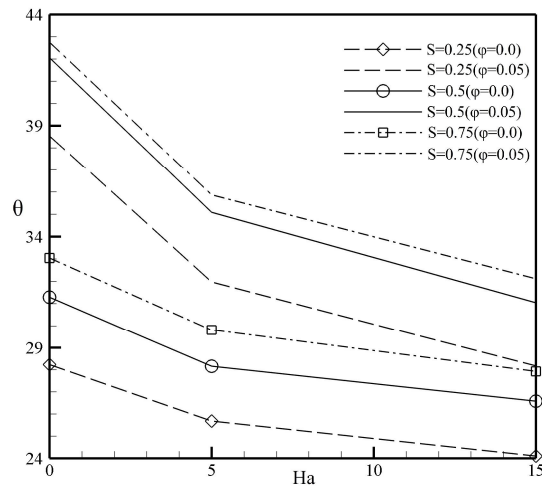
تابع توزیع دما

ارتفاع کانال

عدد هارتمن

ضریب هدایت حرارتی

طول دیواره گرم و دیواره موج‌دار



شکل ۱۳- مجموع دمای بی‌بعد خروجی کانال برای مقادیر مختلف S ، Ha و ϕ در $\lambda = 0.04$ ، $\kappa = 2$ ، $Re = 48$

۵- جمع‌بندی

در این مطالعه، انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در کانال دو بعدی به روش شبکه بولتزمن مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی اثر همزمان تغییر موقعیت دیواره گرم، افزایش تعداد و دامنه نوسان دیواره موج‌دار در حضور میدان مغناطیسی بر ماهیت جریان و میزان انتقال حرارت، از ویژگی‌های کار حاضر است که در مطالعات قبلی به چشم نمی‌خورد. نتایج حاصل، به صورت زیر قابل جمع‌بندی است:

- A ۱- افزایش دامنه و تعداد نوسان دیواره موج‌دار در تمامی حالات به دلیل افزایش سطح تبادل حرارت با دیواره گرم کانال، موجب افزایش انتقال حرارت می‌شود.
- B ۲- افزایش عدد رینولدز باعث افزایش اثرات جابجایی شده و منجر به وجود آمدن جریان برگشتی می‌شود و به طور میانگین سبب افزایش ۶۰ درصدی مقدار انتقال حرارت می‌شود.
- C_p ۳- موقعیت قرارگیری دیواره گرم پارامتر بسیار مهمی بر میزان انتقال حرارت است به نحوی که با دور شدن دیواره گرم از ورودی کانال، حدود ۲۰ درصد از مقدار انتقال حرارت کاسته می‌شود.
- D ۴- با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط افزایش می‌یابد. زیرا در این حالت پروفیل سرعت تخت‌تر

متوسط	av	طول کانال	L
سرد	c	عدد ناسلت	Nu
سیال	f	عدد پراتل	Pr
گرم	h	عدد رینولدز	Re
شماره لینک مدل شبکه	i	فاصله دیواره گرم از ورودی کانال	s
نانوسیال	nf	دما	T
جامد	s	سرعت در جهات شبکه	$u(u,v)$
		سرعت ورودی	U_{in}
		مختصات شبکه	$x(x,y)$
			$X = x/L$
		مختصات بی‌بعد شبکه	$Y = y/L$
			علائم یونانی
		ضریب پخش حرارتی	α
		ضریب انبساط حرارتی	β
		کسر حجمی نانوذرات	ϕ
		تعداد نوسان	κ
		دامنه بی‌بعد نوسان	λ
		لزجت دینامیکی	μ
		دمای بی‌بعد	θ
		چگالی	ρ
		زمان آسایش میدان دما	τ_c
		زمان آسایش میدان جریان	τ_v
		لزجت سینماتیکی	ν
		ضریب وزنی	ω
			بالانویس
		تعادلی	eq
			زیرنویس‌ها

۷- مراجع

- [1] Pietropaoli M, Montomoli F, Gaymann A (2019) Three-dimensional fluid topology optimization for heat transfer. *Struct Multidiscipl Optim* 59: 801-812.
- [2] Menni Y, Azzi A, Chamkha AJ, Harmand S (2019) Analysis of fluid dynamics and heat transfer in a rectangular duct with staggered baffles. *J Appl Comput Mech* 5: 231-248.
- [3] He W, Toghraie D, Lotfipour A, Pourfattah F, Karimipour A, Afrand M (2020) Effect of twisted-tape inserts and nanofluid on flow field and heat transfer characteristics in a tube. *Int J Heat Mass Transf* 110: 211-219.
- [۴] محمدی م، مظلومی س ح، حسنی س م، خوشوقت علی‌آبادی م (۲۰۱۸) بهبود عملکرد هیدرولیکی-حرارتی چاه‌های حرارتی میکروکانال با استفاده از پین-فین‌های V شکل و نانوسیال/Al₂O₃. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۲۲۸-۲۱۱: ۸(۴)
- [5] Bouzerzour A, Djezzar M, Oztop HF, Tayebi T, Abu-Hamdeh N (2020) Natural convection in nanofluid filled and partially heated annulus: Effect of different arrangements of heaters. *Physica A* 538: 122-138.
- [6] Choi SUS (1995) Mixed convection magnetohydrodynamics flow of a nanofluid with heat transfer: A numerical study. *ASME Int* 66: 99-105.
- [7] Wang CS, Wei TC, Shen PY, Liou TM (2020) Lattice Boltzmann study of flow pulsation on heat transfer augmentation in a louvered microchannel heat sink. *Int J Heat Mass Tran* 148: 119-139.
- [۸] شهریاری ع، جهان‌تیغ ن (۲۰۱۸) مطالعه عددی تاثیر زبری-های یکنواخت سینوسی بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی

- [19] Musatfa AW, Khalif HJ, Ali HH (2011) Effect of sinusoidal wavy wall on heat transfer from discrete heat sources placed in two dimensional channel. *Al Qadisiya J Eng Sci* 4: 408-418.
- [20] Joodaki A (2018) Numerical analysis of fully developed flow and heat transfer in channels with periodically grooved parts. *Int J Eng Tran* 31: 1129-1138.
- [21] Manca O, Nardini S, Khanafer K, Vafai K (2003) Effect of heated wall position on mixed convection in a channel with an open cavity. *Numerical Heat Transfer* 43: 259-282.
- [22] Ahmed MA, Shuai NH, Yusoff MZ (2012) Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid. *Int J Heat Mass Tran* 55: 5891-5898.
- [23] Aminossadati S, Raisi A, Ghasemi B (2011) Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *Int J Non Linear Mech* 46: 1373-1382.
- [24] Servati AA, Javaherdeh K, Ashorynejad HR (2014) Magnetic field effects on force convection flow of a nanofluid in a channel partially filled with porous media using Lattice Boltzmann Method. *Adv Powder Tec* 25: 666-675.
- [25] Ashorynejad HR, Zarghami A (2018) Magnetohydrodynamics flow and heat transfer of Cu-water nanofluid through a partially porous wavy channel. *Int J Heat Mass Tran* 119: 247-258.
- [26] Yang YT, Wang YH, Tseng PK (2013) A micro convection model for thermal conductivity of nanofluids. *Int Commun Heat Mass* 55: 5891-5898.
- [27] Heidary H, Kermani M (2010) Effect of nanoparticles on forced convection in sinusoidal-wall channel. *Int Communications Heat Mass Tran* 37: 1520-1527.
- [28] Mohebbi R, Rashidi M, Izadi M, Sidik NAC, Xian HW (2018) Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method. *Int J Heat Mass Tran* 117: 1291-1303.
- [29] Goharkhah M, Esmaili M, Ashjaee M (2018) Numerical simulation and optimization of forced convection heat transfer of magnetic nanofluid in a channel in the presence of a non-uniform magnetic field. *J Space Sci Tec* 11: 11-19.
- [30] Dormohammadi R, Farzaneh-Gord M, Ebrahimi-Moghadam A, Ahmadi MH (2018) Heat transfer and entropy generation of the nanofluid flow inside sinusoidal wavy channels. *J Molecular Liquids* 269: 229-240.
- [31] Rowghani S, Mirzaei M, Kamali R (2010) Numerical simulation of fluid flow past a square. Cylinder using a lattice boltzmann method. *J Agricultural Sci Tec* 7: 9-17.
- نانوسیال در محفظه مربعی به روش شبکه بولتزمن. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۸۶-۲۷۳: ۸(۴).
- [۹] کاوه ر، سفید م، مظفری شمسی م (۲۰۱۹) بررسی عددی اختلاط دو سیال با لزجت متفاوت در یک میکروکانال در نسبت‌های منظری مختلف پره به روش شبکه بولتزمن. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۰۲-۱۸۷: ۹(۱).
- [۱۰] رحمتی ا، نعمتی م (۲۰۱۸) بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه K شکل با استفاده از روش شبکه بولتزمن. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۱۲۶-۱۱۱: ۸(۱).
- [11] Lawal KK, Jibril HM (2019) Unsteady MHD natural convection flow of heat generating/absorbing fluid near a vertical plate with ramped temperature and motion. *J Taibah Univ Sci* 37: 1528-1534.
- [12] El Desouky A, Ismail HNA, Abourabia AM, Ahmed NA (2020) Numerical simulation of MHD flow and heat transfer inside T-shaped cavity by the parallel walls motion. *SN Appl Sci* 2: 1-18.
- [13] Nouri R, Gorji-Bandpy M, Domiri Ganji D (2014) Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel. *Moades Mech Eng* 13: 43-55.
- [14] Mousavi SV, Gerdroodbary MB, Sheikholeslami M, Ganji D (2016) The influence of a magnetic field on the heat transfer of a magnetic nanofluid in a sinusoidal channel. *Euro Physic J Plus* 131: 347-359.
- [15] Dehghani MS, Toghraie D, Mehmandoust B (2019) Effect of MHD on the flow and heat transfer characteristics of nanofluid in a grooved channel with internal heat generation. *Int J Numerical Methods Heat Fluid Flow* 29: 1403-1431.
- [۱۶] تقی‌پور ع، کریمی‌پور آ (۲۰۱۵) شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال متشکله از آب و نانو لوله کربنی FMWNT در یک ریز کانال تحت میدان مغناطیسی در رژیم جریان لغزشی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها* ۲۲۲-۲۰۹: ۵(۳).
- [۱۷] امیددزیانی س، خزایی ا، قره‌خانی س، اشجعی م، زندیان و (۲۰۱۹) بررسی تجربی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال فریک گرافنی در یک لوله دایروی تحت میدان مغناطیسی. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس* ۱۹۲۹-۱۹۴۱: ۱۹(۸).
- [۱۸] اشرفی‌زاده ع، جودکی ع (۲۰۱۴) تحلیل جابجایی حرارت در کانال‌های موج‌دار با نگاهی نو به مدل‌سازی هندسی آن‌ها. *نشریه علمی پژوهشی مکانیک امیرکبیر* ۱۵۶-۱۴۷: ۱۴.

- [40] Nasser L, Ameziani DE, Rahli O, Bennacer R (2019) Numerical study of mixed convection in a ventilated square enclosure with the lattice Boltzmann method. *Num Heat Tran Part A App* 75: 674-689.
- [41] Brinkman H (1952) The viscosity of concentrated suspensions and solutions. *J Chemical Physics* 20: 571-571.
- [42] Patel HE, Sundarajan T, Pradeep T, Dasgupta A, Dasgupta N, Das SK (2005) A micro convection model for thermal conductivity of nanofluids. *Pramana J Phys* 65: 863-869.
- [43] Santra AK, Chakraborty N (2009) Study of heat transfer due to laminar flow of copper-water nanofluid through two isothermally heated parallel plates. *Int J Therm Sci* 48: 391-400.
- [44] Zou Q, He X (1997) On pressure and velocity boundary conditions for the lattice Boltzmann BGK model. *Phys Fluids* 9: 1591-1598.
- [45] Mei R, Luo LS, Shyy W (1999) An accurate curved boundary treatment in the lattice Boltzmann method. *J Comput Phys* 155: 307-330.
- [۴۶] صادقی ص، قاسمی ب (۲۰۱۳) انتقال حرارت جابجایی توام نانوسیال در یک کانال مورب تحت میدان مغناطیسی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس ۳۱-۱۸: ۱۳.
- [۴۷] شهریاری ع، عاشوری‌نژاد ح ر (۲۰۱۷) مطالعه عددی انتقال حرارت و تولید آنتروپی جابجایی رایلی-بنارد نانوسیال در محفظه موجی تحت تأثیر میدان مغناطیسی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس ۳۹۶-۳۸۵: ۱۷.
- [48] Sathiyamoorthy M, Chamkha A (2010) Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall(s). *Int J Therm Sci* 49: 1856-1865.
- [32] Parvin S, Hossain N (2012) Finite element simulation of MHD combined convection through a triangular wavy channel. *Int Communications Heat Mass Tran* 39: 811-817.
- [33] Vijaybabu T, Anirudh K, Dhinakaran S (2018) Lattice Boltzmann simulations of flow and heat transfer from a permeable triangular cylinder under the influence of aiding buoyancy. *Int J Heat Mass Tran* 117: 799-817.
- [34] Pirouz MM, Farhadi M, Sedighi K, Nemati H, Fattahi E (2011) Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles. *Scientia Iranica* 18: 213-221.
- [35] Dulikravich G, Gokaltun S (2010) Lattice Boltzmann computations of incompressible laminar flow and heat transfer in a constricted channel. *Comput Math Appl* 59: 2431-2441.
- [36] Mohebbi R, Lakzayi H, Sidik NAC, Japar WMAA (2018) Lattice Boltzmann computations of incompressible laminar flow and heat transfer in a constricted channel. *Int J Heat Mass Tran* 117: 425-435.
- [37] Heidary H, Kermani MJ, Dabir B (2017) Magnetic field effect on convective heat transfer in corrugated flow channel. *Therm Sci* 21: 2105-2115.
- [38] Mohamad AA (2011) Lattice Boltzmann method: fundamentals and engineering applications with computer codes. Springer Science & Business Media.
- [۳۹] ربانی ر، طالبی ش (۲۰۱۳) رفتار غیر دائم انتقال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه در حال چرخش ۹۰ درجه‌ای. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها* ۳۳۹-۳۲۹: ۵(۲).