اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره غیر صاف به روش شبکه بولتزمن

محمد نعمتی [۱*]، احمد رضا رحمتی [۲]

[۱] دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان
[۲] استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان

دریافت: زمستان ۹۶ پذیرش: تابستان ۹۷

چکیده

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیال آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره غیر صاف در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شده است. دیواره‌های غیر صاف محفظه بصورت آدیاباتیک هستند و دیواره‌های عمودی در دمای ثابت سرد قرار دارند. همچنین مانعی که در دمای ثابت گرم قرار دارد، محفظه را به دو قسمت بالایی و پایینی تقسیم می‌کند. در شبیه‌سازی صورت گرفته میدان جریان و دما با حل همزمان توابع توزیع جریان و دما محاسبه شده است. تأثیر پارامترهای مختلفی چون عدد رینولدز، عدد هارتمن و موقعیت قرارگیری مانع گرم بر روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی ارزیابی شده است. نتایج نشان می‌دهد در یک موقعیت ثابت مانع، افزایش عدد رینولدز و عدد هارتمن بترتیب منجر به افزایش و کاهش عدد ناسلت متوسط می‌شود. بعلاوه با تغییر موقعیت قرارگیری مانع می‌توان بر روی میزان انتقال حرارت و مشخصات جریان تأثیرگذار بود. شایان ذکر است که این هندسه، برای اولین بار به روش شبکه بولتزمن مورد بررسی قرار گرفته است.

* **عهده‌دار مکاتبات: aminenemati1365@grad.kashanu.ac.ir**

کلمات کلیدی: روش شبکه بولتزمن، جابجایی ترکیبی، میدان مغناطیسی، دیواره غیرصاف، عدد ناسلت متوسط.

۱- مقدمه

مسأله انتقال حرارت جابجایی اعم از اجباری، طبیعی و ترکیبی در یک محفظه بسته به دلیل کاربردهای فراوان آن در صنعت و مهندسی مانند خنک‌کاری قطعات الکترونیکی، تهویه ساختمان‌ها، کلکتورهای خورشیدی و رآکتورهای هسته‌ای همواره مورد توجه محققین بوده است و کاربرد فراوانی دارد [۱]. جریان جابجایی ترکیبی درون محفظه با دیواره متحرک از دو عامل ناشی می‌شود. عامل اول، جریان برشی ایجاد شده ناشی از حرکت دیواره و عامل دوم، نیروی شناوری ایجاد شده ناشی از شرایط مرزی دمایی محفظه است [۲]. روش شبکه بولتزمن به دلیل مزایایی از جمله سهولت در اعمال شرایط مرزی، محاسبات ساده‌تر و قابلیت موازی شدن، برای حل مسائلی با هندسه پیچیده دارای کاربرد فراوانی است [۳]. استفاده از روش شبکه بولتزمن علاوه بر سادگی اعمال روابط و شرایط مرزی، این امکان را فراهم می‌آورد تا نتایج در اندازه مش-های کمتر و سرعت همگرایی بالاتر در مقایسه با سایر روش‌های عددی صورت پذیرد [۴]. به همین دلایل، در کار حاضر از روش شبکه بولتزمن برای شبیه‌سازی استفاده شده است. از جمله کارهای صورت گرفته پیرامون موضوع کار حاضر می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

قاسمی و امین‌السادات [۵] جابجایی ترکیبی نانوسیال درون محفظه مثلثی شکل با دیواره متحرک در دو جهت مختلف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که جهت حرکت دیواره پارامتر مهمی بر میزان انتقال حرارت است. همچنین افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش میزان انتقال می-شود. کفایتی و همکاران [۶] تأثیر میدان مغناطیسی بر جابجایی ترکیبی درون محفظه مربعی با درپوش متحرک را به روش شبکه بولتزمن مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که تأثیر افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت متوسط در عدد ریچاردسون پایین ، کم است. اودین و همکاران [۷] تأثیر میدان مغناطیسی بر جابجایی ترکیبی درون محفظه مثلثی شکل با درپوش متحرک را به روش المان محدود بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش عدد هارتمن موجب کاهش سرعت جریان درون محفظه و انتقال حرارت می‌شود. اسماعیل و چامخا [۸] انتقال حرارت جابجایی ترکیبی درون محفظه ذوزنقه شکل با دو جهت مختلف دیواره را ارزیابی کردند. مجری و همکاران [۹] انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه مثلثی شکل را با تغییر زاویه چرخش ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رایلی منجر به افزایش انتقال حرارت می‌گردد و زاویه چرخش محفظه بر انتقال حرارت تأثیر بسزایی دارد. جاود و همکاران [۱۰] جابجایی ترکیبی نانوسیال در محفظه مثلثی شکل

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

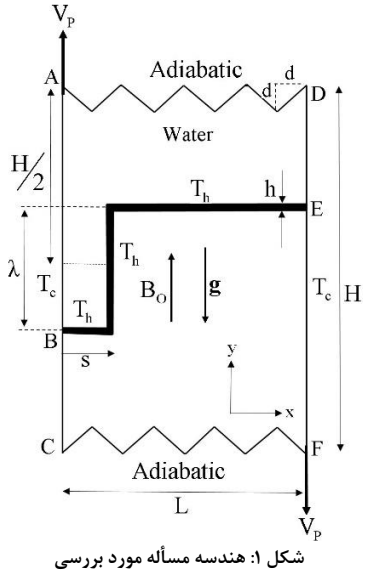
متخلخل تحت تأثیر میدان مغناطیسی را بررسی کردند. از جمله دیگر مطالعات مرتبط با موضوع مورد بررسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن می‌توان به کار شهریاری [۱۱] ، شاپوری و سعیدی [۱۲] و یزدان پرست و دبیرپور [۱۳] و اشاره نمود.

در مطالعه حاضر اثر میدان مغناطیسی و موقعیت قرارگیری مانع گرم درون محفظه بر مشخصات جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. این مسأله که در مطالعات قبلی به چشم نمی‌خورد می‌تواند شبیه‌سازی انتقال حرارت یک قطعه الکترونیکی باشد که دیواره‌های آن متحرک بوده و تحت میدان مغناطیسی ناخواسته‌ای قرار دارد.

۲- شرح و نحوه حل مسأله

مطابق شکل ۱ هندسه مسأله شامل محفظه‌ای مستطیلی شکل با مانعی گرم در وسط و دیواره بالایی و پایینی غیر صاف می‌باشد. دیواره سمت چپ و راست محفظه در دمای ثابت سرد قرار دارد و دیواره بالایی و پایینی آدیاباتیک است. یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمودی از پایین به بالا اعمال می‌گردد. دیواره‌های عمودی سمت چپ و راست محفظه بترتیب بسمت بالا و پایین با سرعت ثابت حرکت می‌کنند. در کار حاضر، λ=۰/۵L ، $S=s/L$، h=۰/۰۲۵L و d=۰/۱۲۵L است و سیال عامل آب با عدد پرانتل ۶/۵۷ و عدد گراشف برابر 10^4 فرض می‌شود. تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز (۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰)، عدد هارتمن (۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰) و S=۰/۲ ،۰/۵ و ۰/۸ بررسی شده است. هدف از این مطالعه، بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر روی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی و ویژگی‌های انتقال حرارتی جریان بوجود آمده می‌باشد. فرضیاتی که در این شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند به صورت زیر است:

۱- جریان دوبعدی، آرام و پایاست، ۲- سیال نیوتنی است، ۳- از تقریب بوزینیسک استفاده شده است، ۴- رژیم جریان غیر قابل تراکم است و ۵- از اتلاف لزجی و انتقال حرارت تشعشعی صرفنظر شده است.



شکل ۱: هندسه مسأله مورد بررسی

۲-۱- روش شبکه بولتزمن

در کار حاضر از دو تابع توزیع برای میدان جریان و دما استفاده شده است که معادلات پیوستگی، مومنتوم ناویراستوکس و انرژی را در مقیاس ماکروسکوپیک ارضا می‌کنند و برای هر دو میدان آرایش شبکه D2Q9 به کار گرفته شده است. جزئیات و شکل این آرایش شبکه و مزیت‌های آن در مراجع مختلف ذکر شده است [۱۴]. معادله شبکه بولتزمن با استفاده از تقریب بی-جی-کی [۱۵] با وجود نیروی خارجی برای میدان جریان و دما بترتیب به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۴].

$$f_i(\mathbf{x}+\mathbf{c}_i\Delta t,t+\Delta t)=f_i(\mathbf{x},t)-\frac{\Delta t}{\tau_v}[(f_i(\mathbf{x},t)-f_i^{eq}(\mathbf{x},t)]+\Delta t\mathbf{c}_i\mathbf{F}_i \quad (۱)$$

$$g_i(\mathbf{x}+\mathbf{c}_i\Delta t,t+\Delta t)=g_i(\mathbf{x},t)-\frac{\Delta t}{\tau_c}[g_i(\mathbf{x},t)-g_i^{eq}(\mathbf{x},t)] \quad (۲)$$

که در آن Δt گام زمانی شبکه، $\mathbf{c}_i$ سرعت گسسته شبکه در جهت i، $\mathbf{F}$ نیروی خارجی، τ_v و τ_c بترتیب بیانگر زمان آسایش برای میدان جریان و دما می‌باشد [۱۳ و ۱۴]. f و g به ترتیب نشان‌دهنده‌ی توابع توزیع مربوط به میدان جریان و دما می‌باشد. کمیت‌های ماکروسکوپیک چگالی، سرعت و دما به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\rho=\sum_i f_i \ , \ \rho\mathbf{u}=\sum_i \mathbf{c}_i f_i \ , \ T=\sum_i g_i \quad (۳)$$

تابع توزیع تعادلی در مدل D2Q9 برای میدان جریان و دما به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$f_i^{eq}=\omega_i[1+\frac{(\mathbf{c}_i.\mathbf{u})}{c_s^2}-\frac{1}{2c_s^2}(\mathbf{u}.\mathbf{u})+\frac{1}{2}\frac{(\mathbf{c}_i.\mathbf{u})^2}{c_s^4}] \quad (۴)$$

$$g_i^{eq}=\omega_i T[1+\frac{(\mathbf{c}_i.\mathbf{u})}{c_s^2}] \quad (۵)$$

که در آن ω_i و c_s به ترتیب ضریب وزنی و سرعت صوت شبکه است که برابر است با $c_s=c/\sqrt{3}$. ضرایب وزنی و سرعت‌های گسسته به صورت زیر تعیین می‌شوند [۱۳].

$$\omega_0=4/9 \ , \ \omega_i=1/9 \quad i=1,2,3,4$$
$$\omega_i=1/36 \quad i=5,6,7,8 \quad (۶)$$

$$c_0=0 \quad (۷)$$
$$\mathbf{c}_i=c[\cos(\frac{(i-1)\pi}{2}),\sin(\frac{(i-1)\pi}{2})] \quad i=1,2,3,4$$
$$\mathbf{c}_i=\sqrt{2}[(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2}+\frac{\pi}{4}),\sin(\frac{(i-5)\pi}{2}+\frac{\pi}{4})] \quad i=5,6,7,8$$

تأثیر نیروی شناوری و نیروی مغناطیسی به صورت عبارت چشمه وارد رابطه (۱) می‌شود که به صورت زیر است [۶].

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_x+\mathbf{F}_y$$
$$\mathbf{F}_x=3\omega_i\rho_f\chi(v\sin\zeta\cos\zeta-u\sin^2\zeta) \quad (۸)$$
$$\mathbf{F}_y=3\omega_i\rho_f\chi(u\sin\zeta\cos\zeta-v\cos^2\zeta)+3\omega_i g(\rho\beta)_{nf}\theta$$
$$\chi=Ha^2(\frac{\mu_{nf}}{H^2})$$

که در آن Ha عدد هارتمن، θ دمای بی بعد سیستم و ξ زاویه اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد. زمان آسایش مربوط به میدان جریان و دما بوسیله روابط زیر از طریق لزجت سینماتیکی υ و ضریب پخش حرارتی α حاصل می‌شوند.

$$\tau_v=\frac{\upsilon}{c_s^2\Delta t}+0.5 \ , \ \tau_c=\frac{\alpha}{c_s^2\Delta t}+0.5 \quad (۹)$$

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

به منظور اطمینان از صحت عملکرد کد حاضر در بازه رژیم غیر قابل تراکم ($Ma<0.3$)، مشخصه سرعت جریان برای جابجایی طبیعی ($V_{natural}=\sqrt{\beta \mathbf{g}(T_h-T_c)H}$) و جابجایی اجباری ($V_{force}=Re\,\upsilon/L$) باید بسیار کوچکتر از سرعت صوت در سیال باشد. در کار حاضر، سرعت مشخصه برابر ۰/۱ سرعت صوت در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است با ثابت بودن اعداد رینولدز، پرانتل و ماخ، لزجت سینماتیکی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\upsilon=\frac{1}{\sqrt{Gr}}Mac_sH \qquad (۱۰)$$

همچنین سرعت حرکت دیواره طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$v=\frac{Re\,\upsilon}{L} \qquad (۱۱)$$

متغیرهای بی بعدی که در معادلات و ارائه نتایج مورد استفاده قرار گرفته‌اند به صورت زیر است.

$$X=\frac{x}{L},\ Y=\frac{y}{H},\ U=\frac{u}{V_p},\ V=\frac{v}{V_p},\ \theta=\frac{T-T_c}{T_h-T_c},\ Pr=\frac{\upsilon}{\alpha}$$
$$Ha=B_oH\sqrt{\frac{\sigma}{\rho\upsilon}},\ Gr=\sqrt{\frac{\beta g(T_h-T_c)H^3}{\upsilon^2}},\ Re=\frac{V_pL}{\upsilon} \qquad (۱۲)$$

همچنین عدد ناسلت متوسط که یکی از مهمترین اعداد بی بعد در تعیین میزان انتقال حرارت است به صورت زیر بترتیب برای بخش پایینی و بالایی محفظه، روی دیواره سرد تعریف می‌شود.

$$Nu_{av}^{up}=[\frac{1}{\overline{AB}}\int_0^1(\frac{\partial\theta}{\partial X})_{X=0}dY+\frac{1}{\overline{DE}}\int_0^1(\frac{\partial\theta}{\partial X})_{X=1}dY]$$
$$Nu_{av}^{bottom}=[\frac{1}{\overline{BC}}\int_0^1(\frac{\partial\theta}{\partial X})_{X=0}dY+\frac{1}{\overline{EF}}\int_0^1(\frac{\partial\theta}{\partial X})_{X=1}dY] \qquad (۱۳)$$
$$Nu_{av}=Nu_{av}^{up}+Nu_{av}^{bottom}$$

۲-۲- شرایط مرزی

با در نظر گرفتن ثابت بودن دیواره‌های محفظه و شرط عدم لغزش بر روی این دیواره‌ها، از مدل کمانه کردن در روش شبکه بولتزمن استفاده شده است [۱۴]. این مدل، ساده‌ترین الگوئی است که شرط عدم لغزش را بیان می‌کند و در آن ذره برخورد کننده به دیواره جامد، در جهت مخالف، به داخل میدان منعکس می‌شود. برای جزئیات بیشتر در مورد محاسبه توابع توزیع مجهول روی هر دیواره، می‌توان به مراجع مختلف [۱۴] مراجعه نمود . به عنوان نمونه در شکل ۲ دیواره مایل محفظه نشان داده شده است. با مشخص بودن f_3 ، f_6 و f_2 و با توجه به ساکن بودن مرزهای جامد برای تابع توزیع جریان رابطه زیر برقرار است [۱۴]:

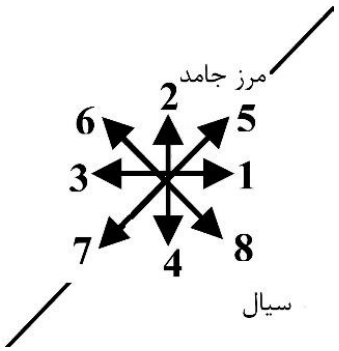
$$\begin{aligned} f_2&=f_4\\ f_3&=f_1\\ f_6&=f_8 \end{aligned} \qquad (۱۴)$$

۳- استقلال حل از شبکه حل

به منظور اطمینان از مستقل بودن نتایج از شبکه انتخابی، عدد ناسلت متوسط روی دیواره‌های سرد محفظه با استفاده از شبکه‌هایی با ابعاد مختلف در حضور تمامی پارامترهای تأثیرگذار بررسی می‌شود. به این منظور عدد هارتمن برابر ۱۰۰، عدد رینولدز ۲۰۰ و S=۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود اختلاف ناچیزی بین شبکه ۱۲۰×۸۰ و ۱۵۰×۱۰۰ وجود دارد و از همین رو شبکه ۱۲۰×۸۰ انتخاب مناسبی است. همچنین لازم به ذکر است که معیار همگرایی برای مطالعه حاضر بصورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است.

$$\max\frac{\left|\Gamma^{n+1}-\Gamma^n\right|}{\left|\Gamma^n\right|}\le 10^{-7} \qquad (۱۵)$$

که در آن n نشان‌دهنده تعداد تکرار و Γ متغیر عمومی (U,V,θ) می‌باشد.



شکل ۲: نحوه اعمال شرایط مرزی

جدول ۱: عدد ناسلت متوسط به ازای ابعاد مختلف شبکه

ابعاد شبکه	Nu_{av}
۴۰×۶۰	۱۲/۵۸
۶۰×۹۰	۱۳/۱۹
۸۰×۱۲۰	۱۳/۶۹
۱۰۰×۱۵۰	۱۳/۹۵

۳- صحت‌سنجی

یکی از الزامات شبیه‌سازی‌های عددی، تأیید صحت و اعتبار آن است. در جدول ۲ نحوه عملکرد شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی ترکیبی بوسیله کد حاضر با مطالعه تیواری و داس [۱۶] به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اطلاعات بدست آمده از برنامه کار حاضر تطابق مناسبی با کار انجام شده دارد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

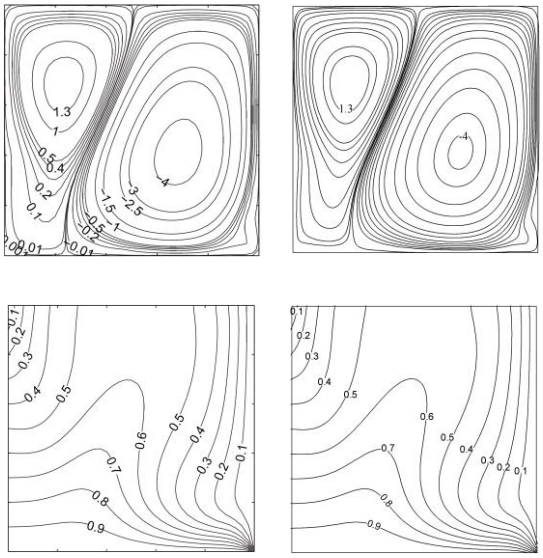
جدول ۲: مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و تیواری و داس [۱۶]



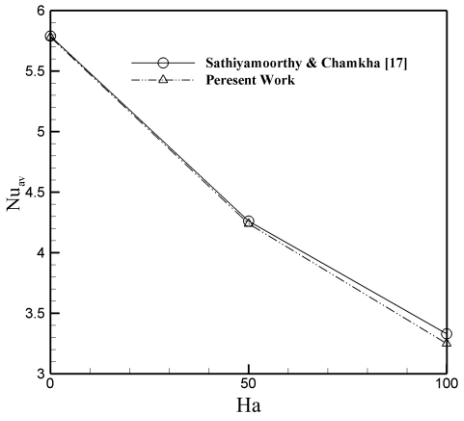
درصد اختلاف	کار حاضر	تیواری و داس [۱۶]	Re
۳/۱۳	۳۱/۶۲	۳۰/۶۷	۳۱۶/۲۳
۲/۱۸	۱۸/۳۵	۱۷/۹۶	۱۰۰
۱/۱۸	۱۰/۳۱	۱۰/۱۹	۳۱/۶۲۳

همچنین به منظور اطمینان از عملکرد برنامه حاضر تحت اثر میدان مغناطیسی، کار حاضر با کار ساتیامورتی و چامخا [۱۷] در شکل ۹ و ۱۰ مقایسه شده است. تطابق مناسب نتایج نشان‌دهنده دقت شبیه‌سازی است.

(الف) (ب)



شکل ۴: مقایسه بین خطوط جریان و همدما برای عدد رایلی 10^5 به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن بین (الف) کار حاضر و (ب) ساتیامورتی و چامخا [۱۷]

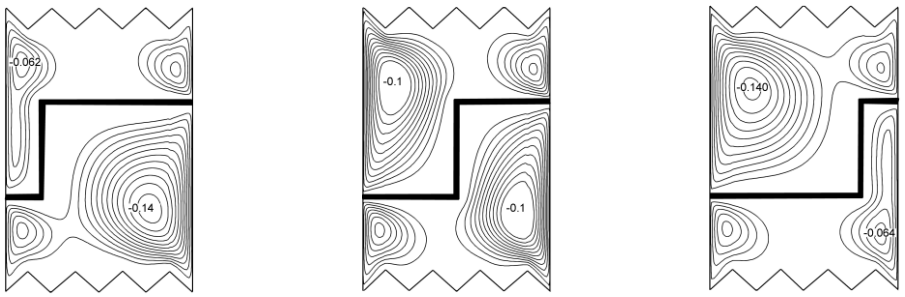


شکل ۵: مقایسه بین عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم برای عدد رایلی 10^5 به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن بین کار حاضر و ساتیامورتی و چامخا [۱۷]

۴- نتایج

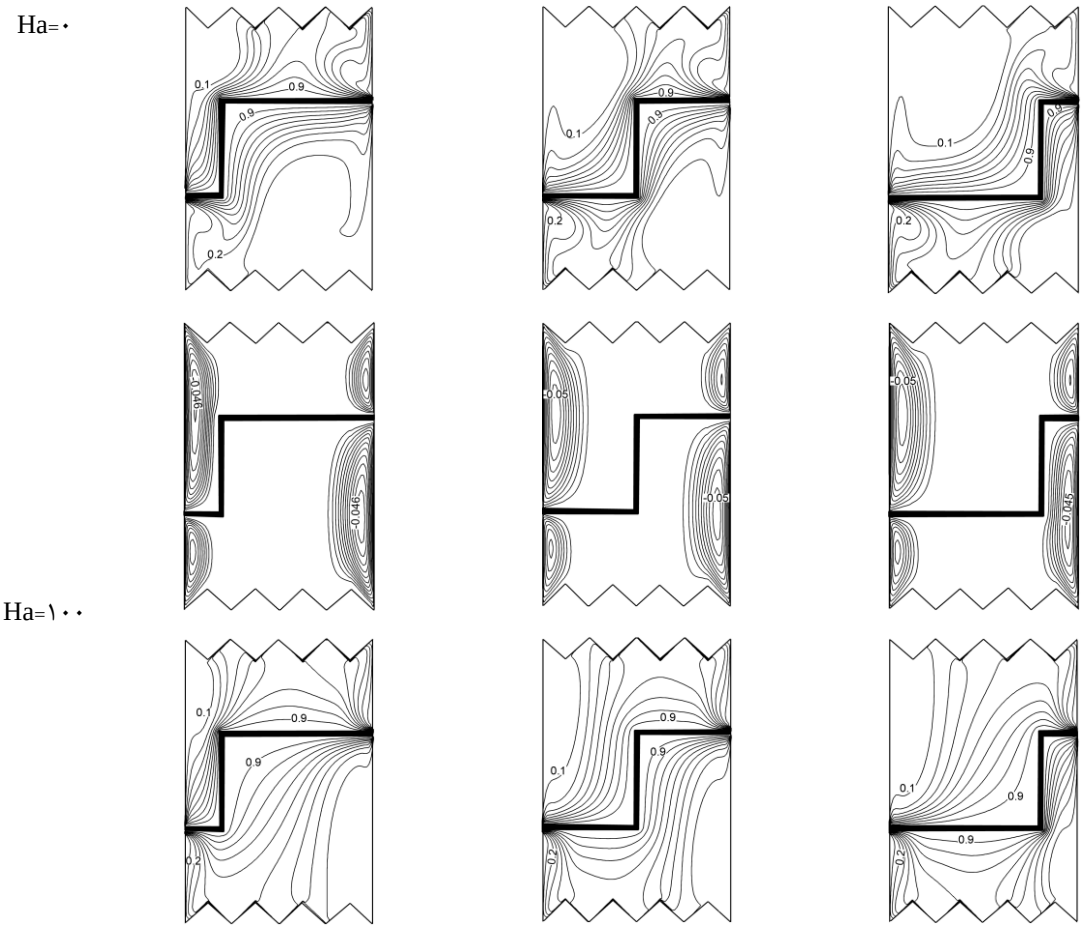
با توجه به اعتبارسنجی برنامه کامپیوتری و اطمینان از دقت نتایج بدست آمده، در این بخش نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های صورت گرفته ارائه و بیان می‌شود. در شکل ۳ خطوط جریان و همدما به ازای مقادیر مختلف S برای دو مقدار عدد هارتمن در عدد رینولدز ۲۰۰ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود بسته به مقدار S، خطوط جریان شکل هندسه را به خود می‌گیرد و سراسر محفظه را پر می‌کند. دو گردابه قسمت بالایی و دو گردابه در قسمت پایین محفظه تشکیل می‌گردد. در تمامی مقادیر S، زمانی که Ha=۱۰۰ است خطوط جریان نزدیک دیواره‌های عمودی محفظه متراکم می‌شوند. همچنین افزایش عدد هارتمن به ازای تمامی مقادیر S، منجر به کاهش قدرت گردابه‌ها می‌گردد. زیرا افزایش قدرت میدان مغناطیسی به دلیل افزایش نیروی مقاوم بیشتر در برابر حرکت سیال منجر به سرکوبی جریان می‌شود. بعلاوه افزایش عدد هارتمن سبب کاهش انحنای خطوط همدما شده و این نشان‌دهنده کاسته شدن اثرات جابجایی است و پدیده انتقال حرارت بسمت هدایت پیش می‌رود.

S=۰/۸ S=۰/۵ S=۰/۲



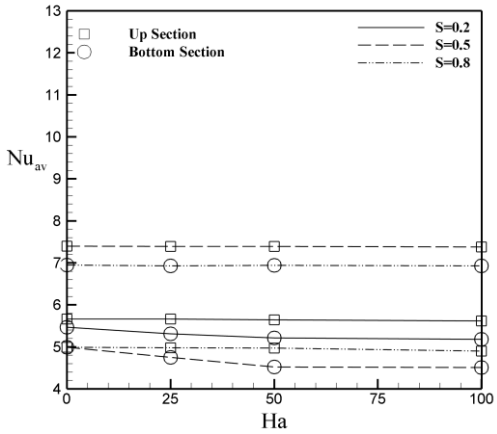
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]



شکل ۳: خطوط جریان (ردیف بالا) و همدما (ردیف پایین) به ازای مقادیر مختلف S و عدد هارتمن در Re=۲۰۰

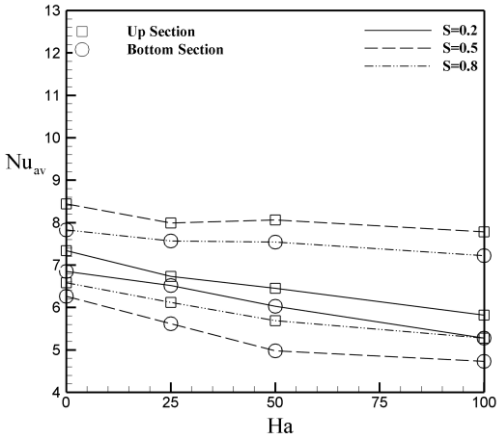
در شکل ۴ تا ۷ عدد ناسلت متوسط روی دیواره‌های سرد به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز، عدد هارتمن و S نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، افزایش قدرت میدان مغناطیسی به سبب افزایش عدد هارتمن، منجر به کاهش عدد ناسلت برای تمامی اعداد رینولدز و مقادیر S می‌شود که این تأثیر با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه به ازای S=۰/۵، با افزایش عدد هارتمن از صفر تا ۱۰۰، کاهشی به میزان ۲ ، ۱۶ ، ۲۴ و ۲۹ درصدی عدد ناسلت برای قسمت بالایی محفظه و ۵ ، ۱۸ ، ۲۸ و ۳۲ درصدی برای قسمت پایینی محفظه بترتیب برای اعدد رینولدز ۱۰، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ را شاهد خواهیم بود. زیرا با افزایش عدد رینولدز، اثرات جابجایی ناشی از نیروی برشی اعمال شده به دیواره‌ها بیشتر شده و میدان مغناطیسی مقاومت بیشتری در برابر حرکت سیال می‌کند.



شکل ۴: عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S در Re=۱۰

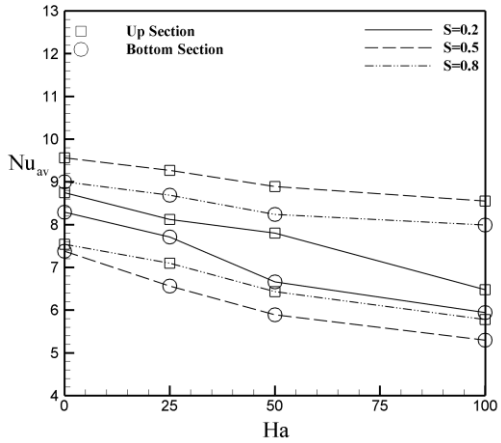
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

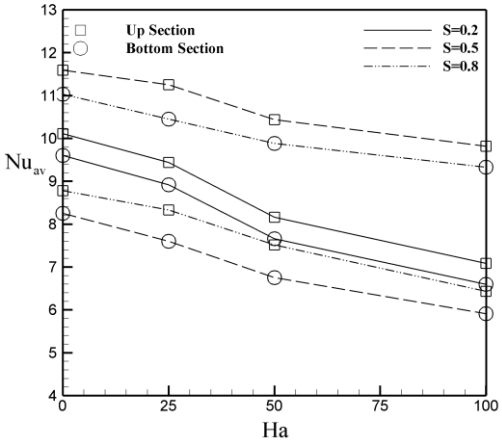


شکل ۵: عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S در Re=۵۰

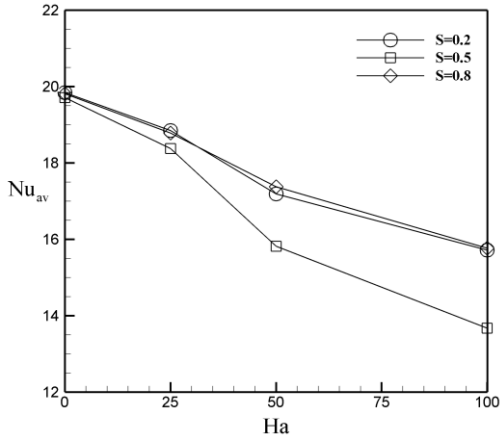
در شکل ۸ مجموع اعداد ناسلت متوسط روی دیواره‌های محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن در عدد رینولدز ۲۰۰ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، افزایش عدد هارتمن در کاهش عدد ناسلت متوسط برای حالتی که S=۰/۵ باشد، بیشتر از دو حالت دیگر است به نحوی که افزایش عدد هارتمن از ۰ به ۱۰۰ منجر به کاهش عدد ناسلت به میزان ۱۸ ، ۳۰ و ۲۰ درصد بترتیب برای S=۰/۲ ، S=۰/۵ و S=۰/۸ می‌شود.



شکل ۶: عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S در Re=۱۰۰



شکل ۷: عدد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S در Re=۲۰۰



شکل ۸: مجموع اعداد ناسلت متوسط به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S در Re=۲۰۰

۵-جمع‌بندی

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی سیال آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره زیگزاگی با مانعی گرم در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیه‌سازی شد. خلاصه نتایج بدست آمده را می‌توان در چند مورد زیر ارائه نمود:

- روش شبکه بولتزمن، روشی قدرتمند در شبیه‌سازی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی است.
- با ثابت بودن سایر پارامترها، افزایش عدد رینولدز به جهت تقویت اثرات جابجایی سبب افزایش انتقال حرارت می‌شود.
- افزایش عدد هارتمن به سبب کاستن سرعت جریان داخل محفظه باعث کاهش انتقال حرارت می‌شود که درصد این کاهش در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است.
- موقعیت قرارگیری مانع، پارامتر مهمی در میزان انتقال حرارت و مشخصات جریان است و بیشترین تأثیر میدان مغناطیسی در S=۰/۵ اتفاق می‌افتد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

فهرست علائم

	علائم انگلیسی
$\mathbf{B}_o$	اندازه میدان مغناطیسی
$\mathbf{c}_i$	سرعت گسسته شبکه
$\mathbf{F}$	نیروی خارجی
f	تابع توزیع جریان
g	تابع توزیع دما
Ha	عدد هارتمن
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پرانتل
Re	عدد رینولدز
S	فاصله مانع از دیواره
T	دما
$\mathbf{u}(u,v)$	سرعت در جهات شبکه
$\mathbf{x}(x,y)$	مختصات شبکه
	علائم یونانی
τ_c	زمان آسایش میدان دما
τ_v	زمان آسایش میدان جریان
υ	لزجت سینماتیکی
α	ضریب پخش حرارتی
θ	دمای بی‌بعد
ω	ضریب وزنی
	بالانویس
up	بالایی
bottom	پایینی
	زیرنویس‌ها
av	متوسط
c	سرد
h	گرم
i	شماره لینک مدل شبکه

مراجع

[1] Y. Taamneh and K. Bataineh, 2017. "Mixed Convection Heat Transfer in a Square Lid-Driven Cavity Filled with Al2O3-Water Nanofluid". Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 63, 383-393.

[2] A. J. Chamkha and M. A. Ismael, 2016. "Magnetic field effect on mixed convection in lid-driven trapezoidal cavities filled with a Cu–water nanofluid with an aiding or opposing side wall". Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 8, 310-319.

[3] M. Nouri, R. Hamila, S. Ben Nasrallah, and P. Perré, 2017. "A three-dimensional enthalpic lattice Boltzmann formulation for convection–diffusion heat transfer problems in heterogeneous media". Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 72, 330-343.

[4] E. Aslan, I. Taymaz, and A. C. Benim, 2015. "Investigation of LBM curved boundary treatments for unsteady flows". European Journal of Mechanics-B/Fluids, 51, 68-74.

[5] B. Ghasemi and S. Aminossadati, 2010. "Mixed convection in a lid-driven triangular enclosure filled with nanofluids". International Communications in Heat and Mass Transfer, 37, 1142-1148.

[6] G. R. Kefayati, M. Gorji-Bandpy, H. Sajjadi, and D. Ganji, 2012. "Lattice Boltzmann simulation of MHD mixed convection in a lid-driven square cavity with linearly heated wall " . Scientia Iranica, 19, 1053-1065.

[7] M. N. Uddin, A. Farhana, and M. A. Alim, 2015. "Numerical study of magneto-hydrodynamic (MHD) mixed convection flow in a lid-driven triangular cavity". Journal of Naval Architecture and Marine Engineering, 12, 21-32.

[8] M. A. Ismael and A. J. Chamkha, 2015. "Mixed convection in lid-driven trapezoidal cavities with an aiding or opposing side wall". Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 68, 312-335.

[9] I. Mejri, A. Mahmoudi, M. A. Abbassi, and A. Omri, 2016. "LBM simulation of natural convection in an inclined triangular cavity filled with water". Alexandria Engineering Journal, 55, 1385-1394.

[10] T. Javed, Z. Mehmood, and M. A. Siddiqui, 2017. "Mixed convection in a triangular cavity permeated with micropolar nanofluid-saturated porous medium under the impact of MHD". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 39, 3897-3909.

[۱۱] شهریاری، علیرضا، ۱۳۹۵. "شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی آزاد نانوسیال در محفظه با دیواره‌های موجی و توزیع دمای سینوسی به روش شبکه بولتزمن" ، مجله مهندسی مکانیک مدرس، ۱۶(۹)، ۱۵۴-۱۴۳.

[۱۲] حسینی‌آباد شاپوری، مهدی، سعیدی، محمدحسن، ۱۳۹۶. "مدلسازی جابجایی آزاد نانوسیال اکسید-آلومینیوم آب درون محفظه مربعی منحنی با استفاده از روش شبکه‌ای بولتزمن". نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، ۴۹(۳)، ۵۸۰-۵۶۷.

[۱۳] یزدان پرست، سیده کوثر ، دبیرپور، وحید. ۱۳۹۰. " بررسی تاثیر حضور دیوار های عمودی داخلی متخلخل در کاهش انتقال حرارت همرفت طبیعی درحفره مربعی با استفاده از روش شبکه لتیس بولتزمن". مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، (۳و۴) ۳، ۱۹-۲۶.

[14] A. A. Mohamad, 2011. Lattice Boltzmann method: fundamentals and engineering applications with computer codes. Springer Science & Business Media.

[15] P. L. Bhatnagar, E. P. Gross, and M. Krook, 1954. "A model for collision processes in gases. I. Small amplitude processes in charged and neutral one-component systems". Physical review, 94, 511-525.

[16] R. K. Tiwari and M. K. Das, 2007. "Heat transfer augmentation in a two-sided lid-driven differentially

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]

heated square cavity utilizing nanofluids". International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 2002-2018.
[17] M. Sathiyamoorthy and A. Chamkha. (2010)," Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium filled square cavity for linearly heated side wall (s)," International Journal of Thermal Sciences, 49, 1856-1865.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.2.1.6]