مطالعه عددی اثر افزایش عدد هارتمن، دامنه و تعداد نوسان دیواره موجدار بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه دو بعدی متخلخل

محمد نعمتی^{او*}، هاجر محمدزاده^۲ و محمد سفید^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد ^۲دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران ۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

دریافت: زمستان ۹۸ پذیرش: :بهار ۹۹

چکیدہ

در این مطالعه، تأثیر افزایش دامنه و تعداد نوسان دیواره موجی شکل بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال آب درون محفظه دو بعدی متخلخل در حضور میدان مغناطیسی با استفاده از روش شبکه بولتزمن بررسی شده است. دیواره سمت چپ در دمای ثابت گرم قرار دارد در حالی که دیوارههای موجدار محفظه در دمای ثابت سرد قرار دارند. دیواره سمت راست دارای توزیع دمای سینوسی و سایر دیوارهها آدیاباتیک در نظر گرفته شدهاند. همچنین دو مانع دایره شکل رسانا در دو سمت محفظه تعبیه شده است. در شبیه سازی صورت گرفته میدان جریان و دما با حل همزمان توابع توزیع جریان و دما محاسبه شده است. تأثیر پارامترهای مختلفی چون عدد هارتمن، ضریب تخلخل، تعداد و دامنه موج دیواره، بررسی شده است. نتایج نشان میدهد با افزایش ضریب تخلخل عدد ناسلت متوسط افزایش مییابد و با افزایش عدد هارتمن، دامنه و تعداد موج دیواره از میزان انتقال حرارت کاسته میشود. تأثیر افزایش ضریب تخلخل در افزایش میزان انتقال حرارت با افزایش عدد هارتمن، کاهش مییابد. محفظه ها با دیواره های دیواره ای مناز کاسته می شود. تأثیر افزایش ضریب تخلخل در افزایش میزان کاربرد دارند.

* عهدهدار مکاتبات: mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

كلمات كليدى: روش شبكه بولتزمن، جابجايي طبيعي، ميدان مغناطيسي، ديواره موجدار، محيط متخلخل.

۱– مقدمه

مساله کلاسیک انتفال حرارت جابجایی طبیعی در یک محفظه بسته به دلیل کاربردهای فراوان آن در مهندسی مانند تهویه ساختمانها، کلکتورهای خورشیدی و رآکتورهای هستهای همیشه مورد توجه محققان بوده است[۳–۱]. اکثر این مطالعات به محفظههای دوبعدی با دیواره صاف مربوط میشود و مطالعه بر روی مرزهای منحنی برای شرایط مرزی متفاوت و حالات مختلف چندان صورت نگرفته است. پیشرفت فناوری و نیاز به نصب قطعات الکترونیکی در فضای محدود سبب شده است که مساله انتقال حرارت جابجایی آزاد در محفظههای شکلدار (غیر مربعی) مهم و ضروری تلقی شود. از طرفی همواره دستیابی به وسایلی با ابعاد کوچکتر، سبکتر و بازده بیشتر برای انتقال حرارت، مطلوب بوده است [۶–۴]. در حالت کلی جابجایی طبیعی به علت ساده بودن فرایند، صرفه اقتصادی، صدای کم و بازیابی مجدد، در شاخههای مختلف صنعت کاربرد فراوانی دارد.

یکی از روشهای کنترل انتقال حرارت جابجایی طبیعی میتوان استفاده از تاثیر میدان مغناطیسی بر روی جریان جابجایی را نام برد [۷ و ۸]. میدان مغناطیسی در بسیاری از جریانهای طبیعی و صنایع تاثیرگذار است. به شاخهای از از مطالعات که به اثر متقابل بین میدان مغناطیسی و سیال هادی در حال حرکت می پردازد، هیدرودینامیک مغناطیسی می-گویند. حق و همکاران[۹] جابجایی طبیعی درون محفظه موجدار متخلخل تحت اثر ميدان مغناطيسي را بررسي كردند. شرمت و همکاران[۱۰] انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظهای را بررسی گردند که تعداد موج دیواره متغیر و تحت اثر میدان مغناطیسی قرار داشت. نتایج نشان داد که افزایش عدد هارتمن و تعداد موج دیواره منجر به کاهش سرعت جریان و انتقال حرارت می شود. سالم و همکاران [۱۱] اثر میدان مغناطیسی بر جابجایی طبیعی درون محفظه باز متخلخل را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رایلی و عدد هارتمن به ترتيب منجر به افزايش و كاهش اثرات جابجايي و انتقال حرارت مي شود. از جمله این کاربردها می توان در صنایع ریخته گری و متالورژی اشاره كرد. بنابراين با استفاده از جريان طبيعي مگنتوهيدروديناميك به راحتي

میتوان بر ویژگیهای انتقال حرارت و جریان تاثیر گذاشت و آن را تحت کنترل درآورد. روشهای تجربی، بررسیهای تئوری و شبیهسازیهای عددی بسیاری در زمینههایی از جمله مهندسی مکانیک، مهندسی شیمی، زمین شناسی و غیره صورت گرفته است، مهر تصدیقی بر این ادعا می-باشد.

در سالیان اخیر به علت کاربرد وسیع و روزافزون محیط متخلخل نیاز به مطالعات اساسی درباره چگونگی انتقال جرم و حرارت در محیط متخلخل وجود داشته است، چرا که این بررسیهای دقیق، به منظور بهبود بخشیدن به سیستمهای مهندسی حاوی مواد متخلخل و بالا بردن کیفیت و کارایی آنها میباشد[۱۲ و ۱۳]. عاشورینژاد و همکاران[۱۴] جابجایی طبیعی درون محفظه مستطیلی شکل تحت اثر میدان مغناطیسی را به روش شبکه بولتزمن بررسی کردند. نتایج نشان داد افزایش قدرت میدان مغناطیسی و ضریب تخلخل به ترتیب منجر به کاهش و افزایش میزان انتقال حرارت میشود. احمد و راشد[۱۵] انتقال حرارت جابجایی طبیعی مغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش میدان مغناطیسی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد افزایش عدد زوموارد کاربرد فوق می توان به عایقهای حرارتی ساختمانها، مبدلهای از موارد کاربرد فوق می توان به عایقهای حرارتی ساختمانها، مبدلهای زیرزمینی برای ذخیره انرژی، بازیابی و کنترل دمای رآکتورها، خنککاری قطعات الکترونیکی اشاره نمود.

روش شبکه بولتزمن به دلیل مزایایی که نسبت به سایر روشهای دینامیک سیالات محاسباتی دارد، در سالیان اخیر بسیار مورد توجه پژوهش گران بوده است[۱۸–۱۶]. از جمله این مزایا میتوان به صریح بودن معادلات حاکم، سادگی در اعمال شرایط مرزی و قابلیت پردازش موازی مستقل از نوع مسأله اشاره کرد. این روش جایگزین مناسبی برای روشهای معمول دینامیک سیالات محاسباتی همچون روش تفاضل محدود و روش حجم محدود برای حل مسائلی با هندسه پبچیده و چند فاز است [۱۹].

کاربرد همزمان میدان مغناطیسی، محیط متخلخل و مرز منحنی به دلیل کاربردهای بی شمار مانند تحلیل مبدلهای حرارتی، علت اصلی مطالعه اخیر است. لازم به ذکر است که چنین هندسهای برای اولین بار به روش شبکه بولتزمن شبیهسازی شده است.

۲- شرح و نحوه حل مسأله

مطابق شکل ۱، هندسه مسأله شامل محفظهای دوبعدی است که دیواره سمت چپ و دیوارههای منحنی به ترتیب در دمای ثابت گرم ((T_h) و سرد ($_c$) قرار دارند. دیواره سمت راست دارای توزیع دمای سینوسی بوده و سایر دیوارهها آدیاباتیک در نظر گرفته شدهاند. میدان مغناطیسی یکنواخت به صورت افقی از چپ به راست و نیروی گرانش از بالا به پایین به محفظه اعمال میشود. قطر و فاصله مرکز دو مانع دایروی رسانا از هر طرف محفظه برابر ۲۵/۰ ارتفاع محفظه است. نسبت طول به ارتفاع محفظه برابر ۲ و نسبت طول دیواره منحنی به ارتفاع محفظه مقدار ثابت



پروفیل قسمت موجدار دیواره بالایی (مشابه دیواره پایینی) به صورت رابطه زیر در نظر گرفته شده است که در آن A دامنه نوسان و K تعداد موج نوسان است.

$$y = H - A \left[1 - \cos(2\kappa\pi \frac{x}{1.5H}) \right] \tag{1}$$

دامنه بی بعد نوسان به صورت $A/H = \lambda$ تعریف می شود. در کار حاضر عدد رایلی برابر ^۵،۱۰ عدد پرانتل برابر ۶ و عدد دارسی ۲۰۱۱ انتخاب شده است. هدف بررسی تأثیر پارامترهایی چون تعداد نوسان (۱، ۲ و ۴)، عدد هارتمن(۰، ۴۰ و ۸۰)، ضریب تخلخل(۲/۰، ۶/۰ و ۸/۱) و دامنـه نوسان (۲۱۲۵ و ۲/۳۵) بر روی مشخصات جریان و انتقـال حرارت جابجـایی طبیعی است. در این شبیهسازی جریان دو بعـدی، آرام و تـراکم ناپـذیر است و سیال نیوتنی فرض شده است. همچنین از اتـلاف لزجـی و انتقـال حرارت تشعشعی صرفنظر شده و از تقریب بوزینسک استفاده شده است.

$$Pr = \frac{v}{\alpha}, U = \frac{uL}{\epsilon\alpha}, \theta = T - T_c/T_h - T_c$$

$$Ra = g\beta(T_h - T_c)L^3/v\alpha, P = pL^2/\rho\alpha^2$$
(Y)

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 و مزیتهای آن کار گرفته شده است. جزئیات و شکل این آرایش شبکه و مزیتهای آن در مراجع مختلف ذکر شده است [۲۰]. معادلات مربوط به حل با استفاده از روش شبکه بولتزمن برای میدان جریان و دما به صورت زیر نوشته می-شود:

$$\begin{aligned} f_i(\mathbf{x} + c_i\Delta t, t + \Delta t) &= f_i(\mathbf{x}, t) - \\ \frac{\Delta t}{\tau_v} [(f_i(\mathbf{x}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{x}, t)] + \Delta tc_i F_i, \\ \mathbf{F}_i &= \rho \omega_i (1 - 1/2\tau_v) \begin{bmatrix} 3(\mathbf{c}_i \cdot F) + \\ 9/\varepsilon(\mathbf{u}F : \mathbf{c}_i \mathbf{c}_i) - 3/\varepsilon(\mathbf{u} \cdot F) \end{bmatrix}, \\ F &= -\varepsilon PrU/Da - 1.75 |U|U/\sqrt{150\varepsilon Da} \\ +\varepsilon Ra Prg\theta + \varepsilon Ha^2 Prv_j, \\ f_i^{eq} &= \rho \omega_i [1 + \frac{(c_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2} - \frac{1}{2\varepsilon c_s^2}(\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2}\frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2}{\varepsilon c_s^4}], \\ g_i(\mathbf{x} + \mathbf{c}_i\Delta t, t + \Delta t) &= g_i(\mathbf{x}, t) - \\ \frac{\Delta t}{\tau_c} \Big[g_i(\mathbf{x}, t) - g_i^{eq}(\mathbf{x}, t)\Big], \\ g_i^{eq} &= \omega_i T[1 + \frac{(\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})}{c_s^2}] \end{aligned}$$



شکل۲: مرز دیواره منحنی و گرهها

جهت مدل نمودن سایر دیوارهها مدل کمانه کردن استفاده شده است کـه به عنوان نمونه شرایط مرزی سـرعت و شـرایط مـرزی دمـا بـرای دیـواره عمودی سمت راست محفظه به صورت زیر است:

$$f_{3} = f_{1}, f_{6} = f_{8}, f_{7} = f_{8}$$

$$g_{3} = [sin\pi(\omega(3) + \omega(1))] - g_{1}$$

$$g_{6} = [sin\pi(\omega(6) + \omega(8))] - g_{8}$$

$$g_{7} = [sin\pi(\omega(7) + \omega(5))] - g_{5}$$
(A)

۳- نتايج

برای بدست آوردن استقلال جوابها از تعداد نقاط شبکه، شبیهسازی بر روی هندسههای مورد بررسی با در نظر گرفتن تمامی پارامترها در شبکه-های ۴۰×۸۰ ۴۰× ۲۰۰، ۲۰۰×۲۰۰ و ۲۰۰×۲۰۰ صورت گرفت و در مورد عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم سمت چپ محفظه با خطای کمتر از ۲/۳ درصد، شبکه ۴۰×۲۰۰ برای شبیهسازی مسأله حاضر انتخاب شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. به منظور صحتسنجی کد نوشته شده در محیط متخلخل، کار حاضر با مرجع [۶] در شکل ۳ و برای اطمینان از دقت برنامه رایانهای نوشته شده به زبان فرترن در مواجهه شده است. همچنین برای راستیآزمایی کد نوشته شده در مواجهه با مرز منحنی، کار حاضر با مرجع [۲۲] مقایسه شده است و در شکل ۴ ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می شود، نتایج کار حاضر تطابق قابل شده است. همان طور که ملاحظه می شود، نتایج کار حاضر تطابق قابل کرد.

مختلف	ابعاد	با	شبكه	ازای	بە	متوسط	ناسلت	: عدد	جدول ۱:	
-------	-------	----	------	------	----	-------	-------	-------	---------	--

ابعاد شبكه	۸۰×۴۰	17•×8•	۱۶۰×۸۰	۲۰۰×۱۰۰	
Nu _{av}	11/84	١٢/•٧	17/30	17/08	

که در رابطه فوق vj اشاره به سرعت در جهت y دارد. ضریب نفوذپذیری به صورت زیر با عدد دارسی رابطه دارد.

$$K = Da \times L^2 \tag{(f)}$$

در روابط ذکر شده **u** بردار سرعت بوده که که با استفاده از سرعت زمانی v برای در نظر گرفتن تأثیر محیط متخلخل به صورت زیر محاسبه می-گردد:

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \sum_{i=0}^{o} c_i f_i / [\rho + 0.5\varepsilon g \beta (T - T_m)], \\ \mathbf{u} &= v / [c_0 + \sqrt{c_0^2 + c_1 |v|}], \\ c_0 &= 0.5 (1 + 0.5\varepsilon v / K), \\ c_1 &= 1.75\varepsilon / 2 \sqrt{150K\varepsilon^2} \end{aligned}$$
 (Δ)

ویسکوزیته و ضریب پخش حرارتی از روابط زیر بر حسب زمان آسایش مربوط به میدان جریان و میدان دما به دست می آید:

$$\tau_v = \frac{v}{c_s^2 \Delta t} + 0.5, \ \tau_c = \frac{\alpha}{c_s^2 \Delta t} + 0.5 \tag{(6)}$$

به منظور اطمینان از کار کردن برنامه نوشته شده در رژیم جریان غیرقابل تراکم، سرعت مشخصه به صورت $V_{natural} = \sqrt{\beta g(T_h - T_c)H}$ تعریف میشود که باید خیلی کوچکتر از سرعت صوت در سیال باشد. در این بررسی، سرعت مشخصه، ۰/۱ سرعت صوت انتخاب شده است. همچنین عدد ناسلت متوسط روی دیواره عمودی و گرم سمت چپ محفظه به صورت زیر محاسبه شده است:

$$Nu_{av} = \frac{1}{H} \int_{0}^{l} -(\frac{\partial \theta}{\partial X})_{X=0} dY$$
 (Y)

برای محاسبه سرعت و دما بر روی مرزهای منحنی از روش های ارائه شده که جزئیات آن در مراجعی چون [۲۲] ذکر شده است، استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از مرز منحنی استفاده شده و شبکه گرهها آورده شده گرهکل ۲ نمایی از مرز منحنی استفاده شده و شبکه گرهها آورده شده گرهایی وارد حوزه محاسباتی میشوند که در مجاورت مرز منحنی قرار است. گرههایی وارد حوزه محاسباتی میشوند که در مجاورت مرز منحنی قرار دارد. این گرهها با زیرنویس d مشخص شدهاند. محل تقاطع راستاهای دارد. این و دومین گره با زیرنویس w نشان داده شده است. اولین و دومین گره با مرز منحنی با زیرنویس w نشان داده شده است. اولین و دومین گره در هر یک از راستاهای مذکور درون ناحیه محاسباتی نیز محرحای به ترتیب با زیرنویسهای f و ff نامگذاری شده است. در این روش بعد از مرحله برخورد، با استفاده از تقریب برونیایی توابع توزیع چگالی و انرژی مربوط به تقاط مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و مربوط به تقاط مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و مربوس محاسبه شده در گرههای مرز جامد به گرههای درون حوزه حل منتی محاسبه میشوند. مربوط به تقاط مجاور مرز درون حوزه حول و با کمک شرایط دمایی و مربونی مربوش های آورای محاسبه میشوند. محل و با کمک شرایط دمایی و مربونی مربول در این مرزه می می و می درون حوزه حول و با کمک شرایط دمایی و مربوط به تقاط مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و مربوط به تقاط مجاور مرز درون حوزه حل و با کمک شرایط دمایی و محاسبه شده در گرههای مرز جامد به گره می درون حوزه حل و با ممک شرایط در مایی منقیل محاسبه شده در گرمهای مرز جامد به گره می درون حوزه حل م منته می میشوند. تقریب برونیایی با توجه به محل تقاطع مرز منحنی و راستاهای می شرعان از مرتبه اول یا دوم خواهد بود. برای این منظور پارامتر Λ به

صورت $\Delta = \frac{|x_f - x_w|}{|x_f - x_b|}$ تعریف شده است که برای محاسبه توابع تمنیع حکال و ان ثنی استفاده و شود.

می گیرند که نشان از غالب شدن هدایت حرارتی دارد که این امر سبب کاهش میزان انتقال حرارت می شود. همچنین با افزایش عدد هارتمن از تراکم خطوط همدما کاسته می شود که سبب کاهش گرادیان دمایی روی دیوارههای محفظه می گردد. بعلاوه مشاهده می شود که تراکم خطوط همدما در نزدیکی دیواره سمت چپ به مراتب بیشتر از دیواره سمت راست که نشان از بیشتر بودن عدد ناسلت متوسط دارد. شکل ۶ خطوط جریان و همدما را به ازای دو مقدار دامنه نوسان نشان میدهد. ديده مى شود كه افزايش دامنه نوسان سبب كاهش بيشينه مقدار تابع جریان می شود. زیرا در این حالت سرعت سیال به دلیل کم بون فضای حرکت کم میشود. افزایش دامنه نوسان به مثابه افزایش مانع در برابر حرکت جریان است که سبب کند شدن حرکت سیال می گردد. بعلاوه دیده می شود که خطوط همدما نیز با کاهش دامنه، در طول محفظه کشیده تر می شوند که این نشان دهنده افزایش اثرات جابجایی است. به منظور داشتن دیدی بهتر نسبت به جریان و انتقال حرارت داخل محفظه متخلخل، شکل ۷ پروفیل سرعت را به ازای مقادیر مختلف ضریب تخلخل نشان مىدهد. همان گونه كه ملاحظه مىشود، با افزايش ضريب تخلخل، سرعت بیشتر شده و سیال راحت تر داخل محفظه به حرکت درمی آید. زيرا افزايش ضريب تخلخل به معناى افزايش فضاى خالى نسبت به فضاى جامد است. این افزایش سرعت در نزدیکی دیواره سبب افزایش گرادیان دمایی روی دیواره گرم و به تبع آن افزایش انتقال حرارت می گردد. شکل ۸ تغییرات سرعت را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و دامنه نوسان نشان میدهد. همان طور که دیده می شود، افزایش عدد هارتمن سبب تخت شدن پروفیل سرعت و کاهش سرعت به خصوص در نزدیک دیواره-ها شده که سبب کاهش گرادیان دمایی در نزدیکی دیوارهها میشود. همچنین افزایش دامنه نوسان به دلیل بیشتر شدن سطح مانع در برابر حرکت جریان، سرعت را کاهش میدهد. شکل ۹ تغییرات سرعت افقی به ازای مقادیر مختلف تعداد نوسان را نشان میدهد. واضح و قابل پیشبینی است که افزایش تعداد نوسان به سبب بیشتر شدن مانع قرار گرفته در برابر جریان، سرعت حرکت جریان را کاهش میدهد. این امر سبب کاهش مقدار انتقال حرارت می شود. در جدول ۳ و ۴ عدد ناسلت متوسط روی ديواره گرم سمت چپ محفظه به ازای مقادير مختلف عدد هارتمن، تعداد نوسان و ضریب تخلخل برای دو مقدار دامنه نوسان دیواره ارائه شده است.





شکل۳: مقایسه عدد ناسلت متوسط بین کار حاضر و مرجع <mark>[۲۱]</mark> در عدد رایلی ۱۰^۵ و عدد دارسی ۰/۰۱ برای مقادیر مختلف ضریب تخلخل در غیاب میدان مغناطیسی

جدول ۲: مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاض و مرجع [71] در عدد را بل

بين فار حاصر وللرجع أأأأأ فأرعلنا رأيتني منا					
درصد اختلاف	کار حاضر	مرجع [۲۱]	На		
٠/٩٨	17/11	17/78	•		
۲/۱۲	17/47	١٢/٧۵	۵۰		
٣/۵	N T/V N	١٣/١٨	۱		



مکل ۱. مفایسه خطوط همده برای عدد رایلی ۲۰ و در عیاب میدان معناطیس بین کار حاضر (سمت راست) و مرجع [۲۲] (سمت چپ)

شکل ۵ خطوط جریان و همدما را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن نشان میدهد. ملاحظه میشود که افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن از سرعت جریان داخل محفظه سبب کاهش مقدار تابع جریان میشود. همچنین دیده میشود افزایش قدرت میدان مغناطیسی باعث کم شدن انحنا خطوط همدما میشود و خطوط به موازات دیوارههای عمودی قرار





در نزدیکی دیواره، گرادیان دمایی را کاهش داده که این عامل سبب کاهش میزان انتقال حرارت می شود. همچنین دیده می شود که با ثابت ماندن سایر پارامترها، افزایش ضریب تخلخل منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط می شود. زیرا در این حالت سیال فضای بیشتری برای حرکت دارد و میتواند راحت تر و با سرعت بیشتری داخل محفظه به گردش درآید و به همین دلیل انتقال حرارت نیز افزایش می یابد.مثلا در جدول ۴-الف مشاهده می شود که برای ۲=۱، افزایش ضریب تخلخل از ۰/۴ به ۰/۸ سبب افزایش ۲۱ درصدی میزان انتقال حرارت می شود.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-09-02]

у

0.2

-0.00

0.0006

شکل ۸: تغییرات سرعت افقی در قسمت میانی محفظه به ازای

مقادیر محتلف عدد هارتمن برای K=۴ و ۸/۳۷۵ در ۶/۸ E=۰/۸ در

0.0012

		110		
(الف)	κ	e=•/۴	8=•/8	<i>ε</i> =•/λ
	١	۹/۷۷۸	11/• 51	۱ ۱/۸۳۷
	٢	٩/٢۵١	۱۰/۲۸۷	۱۱/۰۳۸
	۴	۸/۱۱۳	٩/١۶٢	٩/٩٧۵
		Ha=۴	•	
(ب)	κ	۴/۰=ع	e=•/9	۸/ • = <i>3</i>
	١	۶/۸۲۳	Υ/Αιγ	٨/٨١٢
	٢	۶/۴۷۵	V/TV	٨/١۵۴
	۴	۵/۵۱۱	8/417	۷/۳۷۵
		На=А	•	
	κ	۴/ ۰=3	8=•/9	ε=•/λ
(ج)	١	۵/۴۸۱	۵/۶۲۵	8/188
	٢	$\Delta/T\Delta$)	۵/۵۵ ۱	Δ/AAY
	۴	0/TV0	0/015	۵/۷۲۵

جدول ۳- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم سمت چپ محفظه به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن، ضریب تخلخل و تعداد نوسان برای *۱*=۰/۳۷۵

 H_{a-}

بعلاوه دیده می شود که افزایش تعداد نوسان دیواره ها منجر به کاهش مقدار انتقال حرارت می شود زیرا در این حالت تعداد موانع قرار گرفته در برابر حرکت سیال بیشتر شده و از سرعت جریان کاسته می شود. افزایش دامنه نوسان نیز به دلیل کاستن از سرعت جریان، سبب کاهش میزان انتقال حرارت می شود. ملاحظه می شود که تأثیر افزایش ضریب تخلخل در افزایش عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هار تمن کاهش می یابد. مثلا در جدول ۳-الف، افزایش ضریب تخلخل از ۲/۰ تا ۱/۰ در عدد هار تمن صفر سبب افزایش ۲۰ درصدی عدد ناسلت متوسط می شود که این تأثیر در عدد هار تمن ۸۰ حدود ۱۵ درصد است. زیرا افزایش عدد هار تمن سبب می شود مکانیزم انتقال حرارت از جابجایی به سمت هدایت برود به همین دلیل تأثیر افزایش ضریب تخلخل کاهش می یابد.

۴- نتیجهگیری

در کار حاضر انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال آب درون محفظه دو بعدی متخلخل با دو دیواره منحنی در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت با استفاده از روش شبکه بولتزمن شبیهسازی شد. در این مطالعه عددی، تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله عدد هارتمن، ضریب تخلخل، دامنه و تعداد نوسان دیواره موجدار محفظه بررسی شد. خلاصه نتایج بدست آمده را میتوان در چند مورد زیر ارائه نمود:

روش شبکه بولتزمن، روشی قدرتمند در شبیهسازی مسائل دینامیک
 سیالات محاسباتی با هندسه و شرایط مرزی گوناگون است.
 با ثابت بودن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن به دلیل کاستن از

ک با بابک بودن نهامی پراسترنه، اغرایش عمد هارهما به دنیل کاسش از سرعت جریان به خصوص در نزدیک دیوارهها، میزان انتقال حرارت را کاهش میدهد.

ازای مقادیر مختلف عدد هار تمن، ضریب تخلخل و تعداد نوسان برای						
		λ=•/14	2			
		Ha=∙				
	κ	۴/۰=ع	e=•/9	<i>ε</i> =•/λ		
	١	۱ • / • ۲۵	11/884	18/301		
(الف)	٢	٩/٨٨٧	11/147	17/177		
	۴	۹/۷۲۵	11/081	17/•47		
		Ha=۴	•			
	κ	<i>۴\</i> •=3	E=•/9	$\mathcal{E}=\cdot/\lambda$		
()	١	۶/۸۳۷	V/9V1	٨/٩٣٣		
(ب)	٢	۶/۷۵۱	V/V) T	٨/٧۶٢		
	۴	۶/۶۷۵	٧/٦٣١	٨/۶٣٧		
$Ha=h \cdot$						
	κ	E=•/۴	8=•/9	κ=٠/٨		
(-)	١	5/415	Δ/VTV	8/518		
(ج)	٢	۵/۳۸۷	۵/۶۶۲	8/111		
	۴	۵/۳۶۷	۵/۶۱۲	۶/•۸۵		

جدول۴- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم سمت چپ محفظه به

 ضریب تخلخل پارامتر بسیار مهمی در تعیین میزان انتقال حرارت است به نحوی که افزایش آن، به سبب افزایش سرعت سیال منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط میشود به نحوی که درصد این تأثیر با افزایش عدد هارتمن کاهش مییابد.

 افزایش دامنه و تعداد نوسان دیواره موجدار به دلیل کاستن از میزان سرعت جریان، انتقال حرارت را کاهش میدهد.

 درصد تأثیر افزایش ضریب تخلخل در افزایش عدد ناسلت متوسط عموماً با افزایش دامنه و تعداد نوسان، کاهش می ابد.

فهرست علائم

دامنه نوسان	А
اندازه ميدان مغناطيسي	В
سرعت گسسته شبکه	с
سرعت صوت	C _s
نیروی خارجی	F
تابع توزيع جريان	f
تابع توزيع دما	g
عرض محفظه	Н
عدد هارتمن	На
عدد ناسلت	Nu
عدد پرانتل	Pr
عدد رایلی	Ra
دما	Т
سرعت در جهات شبکه	u (u,v)

[7] F. A. Alwawi, H. T. Alkasasbeh, A. Rashad, and R. Idris, "MHD natural convection of Sodium Alginate Casson nanofluid over a solid sphere," *Results in Physics*, vol. 16, pp. 818-831, 2020.

[8] T. Anwar, I. Khan, P. Kumam, and W. Watthayu, "Impacts of Thermal Radiation and Heat Consumption/Generation on Unsteady MHD Convection Flow of an Oldroyd-B Fluid with Ramped Velocity and Temperature in a Generalized Darcy Medium," *Mathematics*, vol. 8, pp. 130-141, 2020.

[9] R. U. Haq, F. A. Soomro, T. Mekkaoui, and Q. M. Al-Mdallal, "MHD natural convection flow enclosure in a corrugated cavity filled with a porous medium," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 121, pp. 1168-1178, 2018.

[10] M. A. Sheremet, H. Oztop, and I. Pop, "MHD natural convection in an inclined wavy cavity with corner heater filled with a nanofluid," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 416, pp. 37-47, 2016.

[11] K. Al-Salem ,M. A. Sheremet, H. Oztop and I. Pop, "MHD free convection in a wavy open porous tall cavity filled with nanofluids under an effect of corner heater," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 103, pp. 955-964, 2016.

[12] A. Alhashash, "Natural convection of Nanoliquid from a Cylinder in Square Porous Enclosure using Buongiorno's Two-phase Model," *Scientific Reports*, vol. 10, pp. 1-12, 2020.

[13] J. Belabid and K. Allali, "Effect of temperature modulation on natural convection in a horizontal porous annulus," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 151, pp. 127-143, 2020.

[14] H. R. Ashorynejad, A. A. Mohamad, and M. Sheikholeslami, "Magnetic field effects on natural convection flow of a nanofluid in a horizontal cylindrical annulus using Lattice Boltzmann method," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 64, pp. 240-250, 2013.

[15] S. E. Ahmed and Z. Rashed, "MHD natural convection in a heat generating porous medium-filled wavy enclosures using Buongiorno's nanofluid model," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 14, pp. 104-121, 2019.

[16] K. Ghasemi and M. Siavashi, "Three-dimensional analysis of magnetohydrodynamic transverse mixed convection of nanofluid inside a lid-driven enclosure using MRT-LBM," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 165, pp. 105-119, 2020.

[17] B. He, S. Lu, D. Gao, W. Chen, and F. Lin, "Lattice Boltzmann simulation of double diffusive natural convection in heterogeneously porous media of a fluid with temperature-dependent viscosity," *Chinese Journal of Physics*, vol. 63, pp. 186-200, 2020.

[18 J. McCullough, S. Aminossadati, and C. Leonardi, "Transport of particles suspended within a temperaturedependent viscosity fluid using coupled LBM–DEM," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 149, pp. 119-129, 2020.

[19] A. Khan, X.-D. Niu, Q.-Z. Li, Y. Li, D. Li, and H. Yamaguchi, "Dynamic study of ferrodroplet and bubbles merging in ferrofluid by a simplified multiphase lattice Boltzmann method," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 495, pp. 286-309, 2020.

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

[21] M. Sathiyamoorthy and A. Chamkha, "Effect of magnetic field on natural convection flow in a liquid gallium

مختصات شبكه	x (x,y)
مختصات بىبعد شبكه	$\begin{aligned} \mathbf{X} &= \mathbf{x}/\mathbf{L} \\ \mathbf{Y} &= \mathbf{y}/\mathbf{L} \end{aligned}$
علايم يونانى	
ضريب پخش حرارتي	α
تعداد نوسان	κ
دامنه بيبعد نوسان	λ
ضريب تخلخل	3
دمای بیبعد	θ
چگالی	ρ
زمان آسایش	τ
لزجت سينماتيكي	υ
ضريب وزنى	ω
بالانويس	
تعادلى	eq
زيرنويسها	
متوسط	av
سرد	с
سيال	f
گرم	h
شماره لینک مدل شبکه	i

مراجع

[1] A. Samadzadeh, S. Z. Heris, I. Hashim, and O. Mahian, "An experimental investigation on natural convection of non-covalently functionalized MWCNTs nanofluids: Effects of aspect ratio and inclination angle," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 111, pp. 104-121, 2020.

[2] S. Busto, M. Tavelli, W. Boscheri, and M. Dumbser, "Efficient high order accurate staggered semi-implicit discontinuous Galerkin methods for natural convection problems," *Computers & Fluids*, vol. 198, pp. 139-149, 2020.

[3] A. I. Alsabery, M. A. Ismael, A. J. Chamkha, and I. Hashim, "Effect of nonhomogeneous nanofluid model on transient natural convection in a non-Darcy porous cavity containing an inner solid body," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 442-456, 2020.

[4 S. H. Zadeh, M. Sabour, S. Sazgara, and M. Ghalambaz, "Free convection flow and heat transfer of nanofluids in a cavity with conjugate solid triangular blocks: Employing Buongiorno's mathematical model," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 538, pp. 801-826, 2020.

[5] N. C. Roy, M. A. Hossain, and R. S. R. Gorla, "Natural convection in a cavity with trapezoidal heat sources mounted on a square cylinder," *SN Applied Sciences*, vol. 2, pp. 1-11, 2020.

[6] K. Javaherdeh and A. Najjarnezami, "Lattice Boltzmann simulation of MHD natural convection in a cavity with porous media and sinusoidal temperature distribution," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 39, pp. 1187-1200, 2018.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2025-09-02]

filled square cavity for linearly heated side wall (s)". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.

[22] A. Shahriari and H. R. Ashorynejad, "Numerical study of heat transfer and entropy generation of Rayleigh– Bóenard convection nanofluid in wavy cavity with magnetic field". *Modares Mechanical Engineering*, vol. 17, pp. 385-396, 2017.