# تحلیل تأثیر تغییر موقعیت دیواره گرم و افزایش تعداد دیواره سرد و غیرصاف بر انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال دو بعدی در حضور میدان مغناطیسی

محمد نعمتی<sup>او\*</sup> و محمد سفید<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد <sup>۲</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد

دریافت: تابستان ۹۹ پذیرش: تابستان ۹۹

# چکیدہ

در کار حاضر، انتقال حرارت جابجایی اجباری درون کانال دوبعدی با شکل و تعداد دیوارههای غیرصاف مختلف در حضور میدان مغناطیسی در شرایطی که موقعیت دیواره گرم از ورودی کانال متغیر است، شبیهسازی شده است. دیوارههای غیرصاف کانال که در دمای ثابت سرد قرار دارند، در دو شکل منحنی و مورب بررسی شده است. نیمی از طول پایینی کانال با موقعیت متغیر در دمای ثابت گرم و سایر دیواره ها آدیاباتیک در نظر گرفته شدهاند. میدان مغناطیسی به صورت یکنواخت از پایین به بالا بر کانال اعمال میشود. تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز، عدد هارتمن، شکل و تعداد دیواره غیر صاف و موقعیت قرار گیری دیواره گرم در این مطالعه ارزیابی شده است. نتایج نشان میدهد در تمامی حالات، افزایش تعداد دیوارههای غیرصاف و موقعیت قرار گیری دیواره ناسلت متوسط می شود. همچنین با افزایش فاصله دیواره گرم از ورودی کانال، از میزان انتقال حرارت کاسته می شود. بعلاوه هراندازه دیواره گرم از ورودی کانال دورتر باشد، اثر میدان مغناطیسی بر افزایش میدان دیواره گرم از ورودی کانال، از میزان انتقال حرارت کاسته می شود. بعلاوه هراندازه دیواره گرم از ورودی کانال

\* عهدهدار مكاتبات: mohammadnemati@stu.yazd.ac.ir

كلمات كليدى: جابجايي اجبارى، تغيير محل قرارگيرى ديواره گرم، تغيير هندسه كانال، ميدان مغناطيسي.

### 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 هزينه و مصرف انرژی و کوچک و سبک کردن آنها برشمرد [۴-۱]. 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 می-شود. 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 می شود كه ضريب انتقال حرارت افزايش يابد. ميدان مغناطيسي باعث جهت گيري منظم ذرات نانوسیال می گردد و این موجب ارتباط بیشتر بین ذرات نانو می شود. بنابراین در جریان نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی مطلوب، می تواند انتقال حرارت را به طور چشمگیری افزایش دهد [۸–۵]. از جمله کاربردهای میدان مغناطیسی میتوان به استفاده در صنایع ریخته گری، پلیمر، متالورژی و صنایع حرارتی اشاره نمود [۹]. 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 می شود. در روش های غیرفعال، بدون استفاده از منبع خارجی و فقط با اقداماتی مانند تغییر در هندسه مجرای جریان نرخ انتقال حرارت را افزایش میدهند[۱۰]. کانال با صفحات غیر مسطح به دليل افزايش سطح انتقال حرارت، مورد استفاده قرار مى گيرند. كانال با دیواره منحنی از جمله کانالهایی هستند که علاوه بر افزایش نرخ انتقال حرارت، تأثیر کمتری بر گرادیان فشار نامطلوب در طول کانال دارند و بیشتر در جریانهایی با اعداد رینولدز پایین استفاده میشوند [۱۱]. به چند نمونه از تحقیقاتی که در این زمینه صورت گرفته است اشاره می-شود. نوری و همکاران [۱۲] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال در یک کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. نتيجه مطالعه مانكا و همكاران [١٣] نشان داد تغيير موقعيت محل قرار گیری دیواره گرم نقش بسیار مهمی بر میزان انتقال حرارت از کانال دارد. احمد و همکاران [۱۴] 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. امینالساداتی و همکاران [۱۵] نشان دادند که میزان انتقال حرارت از کانال با گرمایش مقطعی، با افزایش عدد هارتمن و عدد رینولدز بیشتر می شود. همچنین برای تمامی مقادیر اعدد رینولدز و هارتمن، افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب بیشتر شدن عدد ناسلت می شود. ثروتی و همکاران [۱۶] نشان دادند افزایش کسر حجمی ماده جامد سبب افزایش سرعت متوسط و دما در خروجی کانال می شود. همچنین عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن به تدریج زیاد می-شود. عاشورینژاد و ضرغامی [۱۷] تأثیر افزودن نانوذره مس به آب را بر انتقال حرارت جابجايى اجبارى درون كانال سينوسى شكل تحت تأثير میدان مغناطیسی در محیط متخلخل به روش شبکه بولتزمن بررسی كردند. نتايج كار آنها نشان داد افزايش كسر حجمي ماده جامد و افزايش قدرت میدان مغناطیسی، انتقال حرارت را افزایش میدهد. نتیجه مطالعه یانگ و همکاران [۱۸] برای بهینه سازی انتقال حرارت از کانال موجی شكل حاوى نانوسيال، نشان داد كه افزايش ميزان انتقال حرارت ، وابسته به عدد رینولدز، دامنه نوسان و کسر حجمی ماده جامد است. حیدری و کرمانی [۱۹] 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 [۲۰] 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 می شود که درصد این افزایش در رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. بعلاوه مشاهده شد که وجود سطوح گسترش یافته(موانع) موجب افزایش نرح انتقال حرارت می گردد. از جمله پژوهشهای دیگری که در این زمینه صورت گرفته است میتوان به موارد زیر اشاره کرد. گوهرخواه و همکاران [۲۱] به مطالعه و بهنهسازی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تحت اثر میدان مغناطیسی غیریکنواخت پرداختند. درمحمدی و فرزانه [۲۲] انتقال حرارت و تولید آنتروپی نانوسیال درون کانال سینوسی شکل را بررسی کردند. روغنی و همکاران [۲۳] به بررسی عددی جریان عبوری سیال از روی مانع مربعی شکل پرداختند. پروین و حسین [۲۴]

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 توسط ویجایبابو و همکاران [۲۵] صورت گرفت. محمدی پیروز و همکاران [۲۶] به روش شبکه بولتزمن به بررسی انتقال حرارت درون کانال با موانعی در دیوارهها پرداختند. با بررسی کارهای انجام شده، مشاهده میشود که تاکنون مطالعات چندانی در رابطه با کانال با دیوارههای غیرصاف و اثر محل قرارگیری دیواره گرم تحت اثر میدان مغناطیسی صورت نگرفته است. در این مقاله سعی شده است که تأثیر تمامی پارامترهای مهم در انتقال حرارت کانال مورد بررسی قرار گیرد.

# ۲- هندسه، معادلات حاکم و شرایط مرزی

با توجه به شکل ۱ که هندسه مسأله مورد بررسی را نشان میدهد، کانالی دوبعدی با نسبت طول به ارتفاع ۵ برای بررسی در نظر گرفته شده است. سیال با سرعت ورودی و دمای سرد وارد کانال شده و میدان مغناطیسی یکنواخت بصورت عمودی از پایین به بالا اعمال می شود. دیوارههای غیرصاف (در دمای ثابت سرد) و دیواره گرم به طول ۲/۵ برابر عرض کانال مورب و منحنی برای تعداد ۱، ۲ و ۴ بررسی شدهاند. فاصله مرکز دیواره مورب و منحنی برای تعداد ۱، ۲ و ۴ بررسی شدهاند. فاصله مرکز دیواره تعریف می شود و سه مقدار ۲/۵، ۲/۵ و ۲/۵ را اختیار می کند. در کار تعریف می شود و سه مقدار ۲/۵، ۲/۵ و ۲۵/۵ را اختیار می کند. در کار حاضر عدد پرانتل برابر ۲/۷، عدد هارتمن ۰، ۵ و ۱۵ و عدد رینولدز ۸ تعریف ی بر اساس عدد رینولدز به صورت  $v = U_{in}$ . می شود. جریان مورد بررسی آرام، بدون واکنش شیمیایی، دو بعدی، پایا و می شود. جریان مورد بررسی آرام، بدون واکنش شیمیایی، دو بعدی، پایا و

معادلات (۱) تا (۴) به ترتیب بقای جرم، مومنتوم در جهت x و y و انرژی را نشان میدهد [۱۳]. اگر Ū بردار کلی سرعت باشد که مولفه افقی آن u و مولفه عمودی v باشد، آن گاه میتوان معادلات (۱) تـا (۴) را بـه فـرم بسته و به صورت رابطه (۵) و (۶) نوشت.

در معادله (۶)، j چگالی جریان الکتریکی است و از قانون اهم

محاسبه می گردد که در رابطه (۷) ارائه شده است.

 $(\vec{U}.\nabla)T = \alpha\Delta T$ 



$$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y}) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) - \sigma uB^2 \qquad (Y)$$

$$\rho(u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y}) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$
(7)

(6)

 $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B})$  (Y)

در این رابطه  $ar{E}$  میدان الکتریکی اعمالی،  $ar{B}$  میدان مغناطیسی اعمال شده و  $ar{U}$  میدان سرعت است. میدان مغناطیسی اعمالی یکنواخت بوده به همین دلیل از اثرات ایجاد میدان الکتریکی بخاطر تغییر در میدان مغناطیسی صرفنظر میشود. چون هیچ میدان الکتریکی خارجی اعمال نمیشود،  $ar{E}$  در معادله (۲) صفر است.

متغیرهای بی بعدی که در این مسأله و ارائه نتایج از آن استفاده میشود، در رابطه (۸) بیان شده است.

$$X = \frac{x}{H}, Y = \frac{y}{H}, U = \frac{u}{U_{in}}, V = \frac{v}{U_{in}},$$
  

$$\theta = \frac{T \cdot T_c}{T_h \cdot T_c}, P = \frac{p}{\rho U_{in}^2}, Re = \frac{U_{in}H}{\upsilon}, Pr = \frac{\upsilon}{\alpha},$$
  

$$U = \frac{DV}{\sigma} \sqrt{\sigma}, V = \frac{1}{\sigma} \frac{1}{U_c} \frac{\partial \theta}{\partial \theta}, V = \frac{V}{\sigma}$$
  
(A)

Ha=BH
$$\sqrt{\frac{\sigma}{\mu}}$$
, Nu= $\frac{1}{2.5H}\int_{0}^{1} -(\frac{\partial\theta}{\partial Y})_{Y=0}dX$ 

شرایط مرزی بیبعد برای حل مسأله به صورت روابط (۹) تا . (۱۳) میباشد.

$$\theta = 0, U = U_{in}, V = 0$$
 (9)  
 $\partial \theta = \partial U$ 

$$\frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{X}} = 0, \ \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{X}} = 0$$
 (1.)

$$\theta = 1, U = V = 0$$
 (11)  
 $\partial \theta$  of U.V. 0 (12)

$$\frac{\partial \mathbf{Y}}{\partial \mathbf{Y}} = 0, \ \mathbf{U} = \mathbf{V} = 0 \tag{11}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{n}} = 0, \ \mathbf{U} = \mathbf{V} = 0$$
 (17)

۳- نتايج

معادلات حاکم به کمک روش حجم محدود و الگـوریتم سـیمپلر به صورت عددی حل میشوند. معادلات تا زمانی حل مـیشـوند که که باقی مانده تمامی متغیرها کمتر از <sup>۶-</sup>۱۰ شود.

برای کار حاضر، همانطور که در جدول ۱ ارائه شده است، پس از بررسی استقلال حل از شبکه برای Ha=5، دیواره دوتایی مـورب، عدد رینولدز ۴۸و S=2.5، شـبکه ۸۰×۴۰۰ بـرای حـل انتخـاب شد.

به منظور اعتبارسنجی، کار حاضر در مواجهه با میدان مغناطیسی با مرجع [۲۷] در جدول ۲ و راستی آزمایی کد نوشته شده به زبان فرترن روی مرزهای منحنی با مرجع [۲۸] در شکل ۲ مقایسه شده است. همانطور که دیده می شود تطابق خوبی بین کار حاضر و نتایج مراجع وجود دارد.

شکل ۳ خطوط جریان و همدما را در حالتی که S= 2.5 و Ha=5 است، نشان میدهد. همانطور که مشاهده میشود، افزایش تعداد دیواره سبب ایجاد جریان برگشتی بیشتر و به تبع آن تشکیل گردابههای کوچک در اطراف دیوارهها میشود. زیرا در این حالت تعداد موانع قرار گرفته در برابر جریان افزایش می-یابد. همچنین با توجه به خطوط همدما، افزایش تعداد دیواره سبب افزایش انحنای خطوط همدما و متراکم شدن بیشتر خطوط در نزدیکی دیواره گرم میشود که این عامل سبب بیشتر شدن گرادیان دمایی و در نتیجه افزایش بیشتر انتقال حرارت میشود.

	جدول ۱- مقایسه عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم بین کار حاضر و مرجع [۲۷] برای عدد رایلی <sup>۱</sup> ۰ <sup>۵</sup>							
	کار حاضر	مرجع [۲۷]	درصد اختلاف					
Ha=0	17/117	17/788	•/٩٩٩					
Ha=50	17/492	17/107	۲/• ۸ ۱					
Ha=100	N T/YYT	17/187	٣/• ٩٣					
	مرجع [14] در عدد رایلی ۱۰۵	شکل ۲ - مقایسه خطوط همدما بین کار حاضر و	ù					
	١	٢	۴					
			$\mathcal{N}$					
	855 875							
	وم) به ازای تعداد مختلف دیواره مورب	- ۲- خطوط جریان (ردیف اول) و همدما (ردیف د	شکل ۳					

برای عدد رینولدز ۴۸ در Ha=5 و S=2.5

شکل ۴ خطوط همدما را برای مقادیر مختلف S و عدد هارتمن برای دیواره دوتایی منحنی نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود، افزایش عدد هارتمن سبب کم شدن انحنای خطوط م-شود به نحوی که خطوط همدما بیشتر به موازات دیواره گرم قرار می گیرند و منجر به تراکم در نزدیکی دیواره گرم می شود. این اثر در حالتی که دیواره نزدیک به خروجی کانال است بیشتر

است. شکل ۵ سرعت افقی به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن برای دیواره مورب واحد را نشان میدهد. همانطور که ملاحظه میشود افزایش قدرت میدان مغناطیسی سبب تخت شدن پروفیل سرعت شده که سرعت در نزدیکی دیوار را افزایش می-دهد که همین عامل سبب افزایش میزان انتقال حرارت از دیوار به سیال میشود.



شکل ۴- خطوط همدما به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و S برای دیواره دوتایی منحنی و عدد رینولدز ۴۸



شکل ۶- سرعت افقی در X=3 برای Re=48، S=2.5 و Ha=5 به ازای تعداد مختلف دیواره منحنی

سرعت افقی به ازای تعداد مختلف دیواره در شکل ۶ نشان داده شده است. مشاهده میشود که افزایش تعداد دیواره غیرصاف به دلیل اینکه به نوعی موانع بیشتری را در سر راه جریان قرار می-دهد، سبب میشود که جریان برگشتی افزایش یابد. این افزایش تعداد دیواره غیرصاف موجب میشود زمانی که سیال در حال عبور از کانال است، سطح مقطع کمتری را تجربه کند و چون بر طبق پایستاری جرم باید دبی جریان ثابت بماند، پس سرعت در پایین کانال افزایش و در بالای کانال سرعت منفی و برگشتی خواهیم داشت. شکل ۷ خطوط همدما را برای ۳ مقدار عدد رینولدز نشان میدهد. با افزایش عدد رینولدز، سرعت جریان داخل کانال افزایش میابد و این افزایش سبب میشود از پراکندگی خطوط همدما کاسته شده و خطوط در مجاورت دیواره گرم متراکم شوند. این عامل منجر به افزایش گرادیان



شکل ۵- سرعت افقی در 3=X برای Re=48 و دیواره مورب واحد و S=2.5 به ازای تغییرات عدد هار تمن

دمایی شده مقدار انتقال حرارت را افزایش میدهد. همچنین افزایش سرعت با افزایش عدد رینولدز در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که دید میشود در عدد رینولدز ۸ و ۲۴ به دلیل کم بودن سرعت جریان، نیروی لزجی بر نیروی اینرسی غالب است و جریان برگشتی و جدایی جریان وجود ندارد ولی در عدد رینولدز ۴۸ شاهد سرعت منفی خواهیم بود که نشان از بالسلت متوسط روی دیواره گرم را به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن و عدد رینولدز نشان میدهد. مشاهده میشود که با افزایش سرعت جریان (افزایش عدد رینولدز) همانطور که اشاره شد، عدد ناسلت متوسط افزایش مییابد ولی اثر عدد هارتمن بستگی به عدد رینولدز داد به نحوی که افزایش عدد هارتمن در عدد رینولدز ۸ سبب کاهش و با افزایش عدد رینولدز منجر

به افزایش عدد ناسلت متوسط میگردد. مثلا افزایش عدد هارتمن از صفر به ۱۵ موجب کاهش ۱/۵ درصدی برای عدد رینولدز ۸ و افزایش ۳۷ درصدی در عدد رینولدز ۴۸ میشود. عدد ناسلت متوسط به ازای شکل و تعداد دیواره برای مقادیر مختلف S و عدد هارتمن در Re=48 در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده میشود در تمامی حالات با افزایش عدد هارتمن، عدد ناسلت متوسط افزایش میابد که این تأثیر در حالتی که دیواره گرم به خروجی نزدیکتر باشد، بیشتر است. مثلا در جدول ۳-ب در حالت دیواره مورب، افزایش عدد هارتمن از ۰ تا

۱۵ سبب افزایش ۸/۳، ۶/۵ و ۴۳ درصدی عدد ناسلت متوسط به ترتیب برای S=2.5 و S=2.5 می شود. همچنین با توجه به جداول دیده می شود بجز در حالت دیواره غیرصاف واحد، زمانی که دیواره ها مورب باشد عدد ناسلت متوسط بیشتر خواهد بود. بعلاوه با ثابت ماندن تمامی پارامترها، نزدیک تر شدن دیواره گرم به خروجی سبب کم شدت مقدار انتقال حرارت از دیوار به سیال می شود زیرا در این حالت فرصت کافی برای گرم شدن سیال وجود ندارد.



شکل ۷- خطوط همدما به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز برای دیواره چهارتایی منحنی در Ha=5 و Ba=3.75



شکل ۸- سرعت افقی در X=3 برای دیواره چهار تایی منحنی در Ha=5 و S=3.14 به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز

در کار حاضر اثر افزایش عدد هارتمن و تعداد دیوارههای غیرصاف در دو شکل مختلف با تغییر موقعیت قرارگیری دیواره گرم کانال بررسی شد. خلاصه نتایج حاصله عبارتند از:

 با ثابت بودن تمامی پارامترها، افزایش عدد هارتمن و تعداد دیوارههای غیرصاف کانال، عدد ناسلت متوسط را افزایش می-دهد. اثر میدان مغناطیسی زمانی که دیواره به خروجی نزدیکتر باشد، بیشتر است.

 با دور شدن موقعیت دیواره گرم از ورودی کانال، عدد ناسلت متوسط کاهش مییابد. زیرا دیواره گرم از دیوارههای سرد فاصله میگیرند. همچنین بجز در حالت دیواره واحد در هر دو شکل دیواره، دیواره مورب سبب بیشتر شدن میزان انتقال حرارت میشود.

#### ۴- جمعبندی

جدول ۲- عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای مقادیر مختلف Re در 3.75-S و دیواره منحنی چهارتایی

_	Re=8	Re =24	Re =48
Ha=0	4/811	٨/•۵١	۸/۴۹۵
Ha=5	4014	$\Lambda/\Delta\Delta$ )	٨/٩۶٣
Ha=15	4/490	1 • / ۲ 1 1	11/880

رم به ازای دیواره واحد	متوسط روی دیواره گ	جدول ٣-الف: عدد ناسلت
------------------------	--------------------	-----------------------

		Ha=0			Ha=5			Ha=15	
شکل دیوارہ	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75
مورب	10/040	۱۱/۸۲۵	٨/٤١١	10/070	17/410	٩/٨٩ ١	18/240	13/471	۱۱/۷۹۵
منحنى	10/991	۱۲/۰۸۵	٨/۴۱۵	18/411	۱۲/۸۸۵	٩/٩٠١	17/871	14/200	۱۱/۸۸۸

جدول ۳-ب: عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای دیواره دوتایی

1 10 1		Ha=0		Ha=5 S=1.25 S=2.5 S=3.75			Ha=15		
شكل ديواره	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75
مورب	۱۷/۰۵۱	13/417	٨/۶١٢	17/873	14/141	1./447	18/222	۱۵/۰۵۱	17/340
منحنى	18/•98	17/480	٨/٢٩١	۱۶/۹۸۵	13/222	1./.12	۱۸/۰۰۱	14/880	11/817

جدول ۳-ج: عدد ناسلت متوسط روی دیواره گرم به ازای دیواره چهارتایی									
		Ha=0			Ha=5			Ha=15	
شکل دیوارہ	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75	S=1.25	S=2.5	S=3.75
مورب	۱۸/۸۸۹	14/104	۹/۱۵۴	۱۹/۵۷۱	۱۵/۶۸۵	۱۰/۹۸۵	22/120	۱۸/۹۳۵	14/140
منحنى	18/148	17/071	٨/۴۹۵	14/114	۱۳/۸۸۵	1./211	18/220	۱۵/۰۰۵	11/880

			۵- فهرست علائم
В	قدرت ميدان مغناطيسي	U,V	سرعت بىبعد
Н	عرض كانال	U <sub>in</sub>	سرعت ورودى
На	عدد هارتمن	X,Y	مختصات بيبعد
Nu	عدد ناسلت	α	ضريب پخش حرارتي
Pr	عدد پرانتل	μ	لزجت ديناميكي
Re	عدد رينولدز	θ	دمای بیبعد
S	فاصله بیبعد دیواره گرم از ورودی کانال	ρ	چگالی
Т	دما	υ	لزجت سينماتيكى

[5] H. Vaidya, R. Choudhari, M. Gudekote, K. V. Prasad, O. D. Makinde, and K. Vajravel, "Heat and mass transfer analysis of MHD peristaltic flow through a complaint porous channel with variable thermal conductivity," *Physica Scripta*, vol. 55, pp. 311-324, 2020.

[6] M. Aleem, M. I. Asjad, A. Ahmadian, M. Salimi, and M. Ferrara, "Heat transfer analysis of channel flow of MHD Jeffrey fluid subject to generalized boundary conditions," The European Physical Journal Plus, vol. 135, pp. 1-15, 2020.

[7] C. Soto, S. Smolentsev, and C. García-Rosales, "Mitigation of MHD phenomena in DCLL blankets by Flow Channel Inserts based on a SiC-sandwich material concept," *Fusion Engineering and Design*, vol. 151, pp. 111-121, 2020.

[8] S. U. Haq, M. A. Khan, Z. A. Khan, and F. Ali, "MHD Effects on the Channel Flow of a Fractional Viscous Fluid Through a Porous Medium; An Application of the Caputo-Fabrizio Time-Fractional Derivative," *Chinese Journal of Physics*, vol. 55, pp. 247-258, 2020.

[9] K.-A. Yih and C.-J. Huang, "Non-Linear Radiation, Chemical Reaction, and Soret/Dufour Effects on Magnetohydrodynamic Natural

#### 8- مراجع

[1] N. Kurtulmuş, "Experimental investigation of pulsating flow structures and heat transfer characteristics in sinusoidal channels," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 167, Pp. 105-118, 2020.

[۲] نعمتی محمد، رحمتی احمدرضا، " اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابجایی ترکیبی آب درون محفظه مستطیلی شکل با دو دیواره غیر صاف به روش شبکه بولتزمن"، مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، شماره ۵، دوره ۲، صفحه ۵۴-۲۹، ۱۳۹۷.

[۳] نعمتی محمد، محمدزاده هاجر، سفید محمد، "مطالعه عددی اثر افزایش عدد هارتمن، دامنه و تعداد نوسان دیواره موجدار بر انتقال حرارت جابجایی طبیعی درون محفظه دو بعدی متخلخل،" *مجله علمی تخصصی مهندسی مکانیک تبدیل* /*نرژی*، شماره ۷، دوره ۱، صفحه ۲۲–۱۵، ۱۳۹۹.

[۴] رحمتی احمدرضا، نعمتی محمد، (۱۳۹۸). "کاربرد روش شبکه بولتزمن در شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال درون یک محفظه متوازی الاضلاع شکل در حضور میدان مغناطیسی،" *نشریه علمی-پژوهشی مهندسی مکانیک* /یر/ن، شماره ۱۰، دوره ۲، صفحه ۱۳۳–۹۲، ۱۳۹۸. Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 37, pp. 1520-1527, 2010.

[20] R. Mohebbi, M. Rashidi, M. Izadi, N. A. C. Sidik, and H. W. Xian, "Forced convection of nanofluids in an extended surfaces channel using lattice Boltzmann method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 1291-1303, 2018.

[21] M. Goharkhah, M. Esmaeili, and M. Ashjaee, "Numerical Simulation and Optimization of Forced Convection Heat Transfer of Magnetic Nanofluid in a Channel in the Presence of a Non-Uniform Magnetic Field," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 118, pp. 1281-1293, 2019.

[22] R. Dormohammadi, M. Farzaneh-Gord, A. Ebrahimi-Moghadam, and M. H. Ahmadi, "Heat transfer and entropy generation of the nanofluid flow inside sinusoidal wavy channels," *Journal of Molecular Liquids*, vol. 269, pp. 229-240, 2018.

[23] S. Rowghani, M. Mirzaei, and R. Kamali, "Numerical Simulation of Fluid Flow Past a Square Cylinder Using a Lattice Boltzmann Method," *Journal of Aerospace Science and Technology (JAST)*, vol. 7, pp. 9-17, 2010.

[24] S. Parvin and N. Hossain, "Finite element simulation of MHD combined convection through a triangular wavy channel," *International communications in heat and mass transfer*, vol. 39, pp. 811-817, 2012.

[25] T. Vijaybabu, K. Anirudh, and S. Dhinakaran, "Lattice Boltzmann simulations of flow and heat transfer from a permeable triangular cylinder under the influence of aiding buoyancy," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp. 799-817, 2018.

[26] M. M. Pirouz, M. Farhadi, K. Sedighi, H. Nemati, and E. Fattahi, "Lattice Boltzmann simulation of conjugate heat transfer in a rectangular channel with wall-mounted obstacles," *Scientia Iranica*, vol. 18, pp. 213-221, 2011.

[27] M. Sathiyamoorthy and A. Chamkha, "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*, vol. 49, pp. 1856-1865, 2010.

[28] 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. Convection About a Permeable Horizontal Circular Cylinder in Non-Darcy Porous Media With Heat Source/Sink," *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, vol. 12, pp. 11-23, 2020.

[10] M. Nemati, M. Sefid, A. R. Rahmati, "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," Journal of Solid and Fluid Mechanics, vol. 10, pp. 219-236, 2020.

[11] A. Joodaki, "Numerical Analysis of Fully Developed Flow and Heat Transfer in Channels with Periodically Grooved Parts," *International Journal of Engineering-Transactions A: Basics*, vol. 31, pp. 1129-1138, 2018.

[12] R. Nouri, M. Gorji-Bandpy, and D. Domiri Ganji, "Numerical investigation of magnetic field effect on forced convection heat transfer of nanofluid in a sinusoidal channel," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 13, pp. 43-55, 2014.

[13] O. Manca, S. Nardini, K. Khanafer, and K. Vafai, "Effect of heated wall position on mixed convection in a channel with an open cavity," *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, vol. 43, pp. 259-282, 2003.

[14] M. Ahmed, N. Shuaib, and M. Z. Yusoff, "Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 5891-5898, 2012.
[15] S. Aminossadati, A. Raisi, and B. Ghasemi, "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 46, pp. 1373-1382, 2011.

[16] K. Javaherdeh and H. R. Ashorynejad, "Magnetic field effects on force convection flow of a nanofluid in a channel partially filled with porous media using Lattice Boltzmann Method," *Advanced Powder Technology*, vol. 25, pp. 666-675, 2016.

[17] H. R. Ashorynejad and A. Zarghami, "Magnetohydrodynamics flow and heat transfer of Cu-water nanofluid through a partially porous wavy channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 119, pp. 247-258, 2019.

[18] Y.T. Yang, Y.H. Wang, P.K. Tseng, "A micro convection model for thermal conductivity of nanofluids" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 110, pp. 207-228, 2015.

[19] H. Heidary and M. Kermani, "Effect of nano-particles on forced convection in sinusoidal-wall channel," *International*