

مطالعه اثرات میدان مغناطیسی و محیط متخلخل بر انتقال حرارت و جریان نانوسیال در یک کانال موجدار

نجات شیخ پور^۱، آرش میرعبداله لواسانی^{۲*}، غلامرضا صالحی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۱۴ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۰۶</p>	<p>در این مطالعه، انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال به صورت تک‌فاز، تراکم‌ناپذیر، آرام و دائم در یک کانال دوبعدی سینوسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی دارای محیط متخلخل بررسی شده است. شار حرارتی متناوب در دیوارهای کانال اعمال شده است. معادلات حاکم بر مسئله از طریق نرم‌افزار فلوننت و با رویکرد حجم محدود گسسته‌سازی شده و کولپینگ سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم سیمپل انجام شده است. محدوده عدد رینولدز جریان $200 \leq Re \leq 500$ است. آب به عنوان سیال پایه در نظر گرفته شده است و نانوذره اکسید منیزیم به آن افزوده شده است. درصد حجمی نانوسیال ۰/۰۴ است. جریان نانوسیال در ۴ عدد داریسی مختلف (۰/۰۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۰۱، ۰/۰۰۰۱، ۰/۰۱) و اعمال میدان مغناطیسی در ۴ عدد هارتمن (۰، ۴، ۷ و ۱۰) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در همه موارد با افزایش عدد هارتمن، حرارت منتقل شده بهبود و افت فشار افزایش می‌یابد. با افزایش عدد داریسی از ۰/۰۰۰۰۱ به ۰/۰۱ در شرایط یکسان (رینولدز ۵۰۰ و هارتمن ۱۰) عدد ناسلت ۴/۳۹۲ برابر می‌شود. همچنین با افزایش عدد داریسی مقاومت ویسکوز کاهش یافت و همواره افت فشار کمتر شد به نحوی که نسبت افت فشار عددی کوچک‌تر از ۱ به دست آمد.</p>
<p>واژگان کلیدی: انتقال حرارت جابه‌جایی، شبیه‌سازی عددی، روش حجم محدود، محیط متخلخل، میدان مغناطیسی.</p>	

۱- مقدمه

روشهای بهبود انتقال حرارت به دو گروه عمده روشهای فعال و غیرفعال طبقه‌بندی می‌شوند. در روشهای فعال از راهکارهایی همچون اختلاط مکانیکی، چرخش، لرزش و اعمال میدانهای مغناطیسی و الکترواستاتیکی استفاده می‌شود و در بخش غیرفعال از روشهایی همچون تغییر در مشخصه‌های سیال، تغییر شکل، افزایش سطح، ایجاد زبری و دگرگونی و آشفته‌گی جریان استفاده می‌شود. کانالهای موجدار به دلیل ساختار ساده و عملکرد بالای حرارتی در مبدل‌ها و دیگر تجهیزات گرمایشی و صنعتی کاربرد فراوانی دارند. با هدف بررسی عملکرد حرارتی، لیانگ

گونگ و همکاران [۱] یک کانال در مقطع میکرو با دیواره موجی را تحلیل و بهبود حرارتی ۲۶ درصدی را نسبت به حالت مسطح مشاهده کردند. صالحین و میرعبداله لواسانی [۲] به بررسی انتقال حرارت کانال موجی شکل پرداختند و از نتایج مهم آنها این بود که با افزایش زاویه موج تا ۳۵ درجه، عملکرد حرارتی هیدرولیکی کانال بهبود پیدا کرد. ساکانووا و همکاران [۳] عملکرد حرارتی نانوسیال در یک میکروکانال موجدار با هدف مقایسه با کانال صاف را بررسی کردند. بر اساس مشاهدات آنها، با استفاده از جداره‌های موجدار در میکروکانال، نرخ انتقال حرارت به طور چشمگیری نسبت به جداره‌های صاف بیشتر خواهد شد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: arashLavasani@iauctb.ac.ir

۱. گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳. گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

بررسی جریان و انتقال حرارت در دو حالت تک‌فاز و دوفاز در کانال متخلخل پرداخته. آنها مشاهده کردند که شار حرارتی بهبود پیدا کرد. شبیه‌سازی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در لوله نوار پیچ شده از محیط متخلخل در دو لوله مثلثی و لوله دایره‌ای توسط وانگ و همکاران [۱۲] انجام شد. آنها به این نتیجه رسیدند که لوله مثلثی به لحاظ ضریب عملکرد هیدرولیکی حرارتی بهتر از لوله دایره‌ای است. ایزدی و همکاران [۱۳] انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی یک محفظه متخلخل با دو میدان مغناطیسی متغیر را بررسی کردند. با افزایش نفوذپذیری محیط متخلخل، عدد ناسلت کاهش یافت. بیگ و همکاران [۱۴] به روش عددی انتقال حرارت مغناطیسی هیدرودینامیک طبیعی را در یک محفظه متخلخل را بررسی کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که با افزایش نفوذپذیری (عدد دارسی) ناسلت محلی در دیواره‌ها افزایش یافت. عاشوری‌نژاد و زرغامی [۱۵] جریان نانوسیال یک کانال نیمه متخلخل تحت میدان مغناطیسی را مدلسازی کردند. نتایج آنها نشان داد با افزایش کسر حجمی نانوذره و عددهای دارسی بالا نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. با توجه به مقالات بررسی شده تاکنون، در مطالعه حاضر انتقال حرارت جابه‌جایی جریان با اعمال میدان مغناطیسی یک نانوسیال در محیطی متخلخل و در کانال با دیواره موجدار به همراه شار حرارتی متناوب مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه، میدان مغناطیسی عمود بر هندسه فرض شده است. اثر میدان مغناطیسی و عدد دارسی محیط روی انتقال حرارت جابه‌جایی، پروفیل سرعت و افت فشار مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب، نوآوری پژوهش حاضر شامل وجود همزمان میدان مغناطیسی و محیط متخلخل در شرایط شار حرارتی متناوب در یک کانال موجدار می‌باشد [۱۶].

۲- تعریف مسئله

۲-۱- مدل فیزیکی

در مدل‌سازی حاضر، یک کانال موج‌دار اشباع شده از نانوسیال در حضور محیط متخلخل تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت، مورد بررسی قرار گرفته است. معادله موج کانال به صورت زیر می‌باشد [۱۶]:

$$y(x) = \alpha \cdot (\cos((2\pi/\lambda) \cdot L) - 1) \quad (1)$$

در معادله فوق λ و α ، به ترتیب دوره تناوب و دامنه موج می‌باشند. هندسه طراحی شده مسئله در شکل (۱) نشان

بی‌نام و همکاران [۴] انتقال حرارت و جریان مغشوش داخل یک لوله موجی داخل استوانه بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که عدد ناسلت یک تابع صعودی از عدد رینولدز است. اعمال میدان مغناطیسی باعث جهت‌گیری منظم ذرات نانوسیال شده و این موجب ارتباط بیشتر بین ذرات نانو می‌گردد. در نتیجه در جریان نانوسیال، اعمال میدان مغناطیسی مطلوب می‌تواند حرارت منتقل شده را افزایش دهد [۵]. استفاده از میدان مغناطیسی در جابه‌جایی آزاد، باعث کاهش سرعت در نزدیکی دیواره شده و انتقال حرارت را کاهش می‌دهد. در جابه‌جایی اجباری، میدان مغناطیسی باعث تخت شدن پروفیل سرعت می‌شود، این امر موجب افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌ها شده و به نوبه خود، ضریب انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. مطالعات متعددی به بررسی انتقال حرارت نانوسیالات با اعمال میدان مغناطیسی پرداخته‌اند. بنوس و سریس [۶] جابه‌جایی طبیعی نانوسیال یک کاویتی دارای میدان مغناطیسی را مطالعه کردند. در کار آنها افزایش تولید حرارت داخلی باعث شدت نرخ انتقال حرارت می‌شود. شیخ‌الاسلامی و شهزاد [۷] اثر میدان مغناطیسی یک حفره با اعمال نیروی لورنتز در معادلات اندازه حرکت و تشعشع در معادله انرژی بررسی کردند و نتیجه گرفتند افزایش عدد هارتمن باعث کاهش انتقال حرارت و سرعت جریان می‌شود. ابراهیم و همکاران [۸] انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری جریان نانوسیال، در یک میکروکانال با در حضور میدان مغناطیسی را بررسی کردند. طبق نتایج بدست آمده، در حضور میدان مغناطیسی، با افزایش عدد رینولدز افت فشار و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش عدد هارتمن، ضریب اصطکاک موضعی و عدد ناسلت روندی افزایشی دارد. بضاعت‌پور و گوهرخواه [۹] اثر میدان مغناطیسی بر انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری را در یک چاه حرارتی دارای میدان مغناطیسی بررسی کردند. در کار آنها با افزایش شدت میدان مغناطیسی، ضریب جابه‌جایی افزایش یافت. در ارتباط با انتقال حرارت جابه‌جایی درون یک لوله و کانال که ماده متخلخل درون آن قرار می‌گیرد، مطالعات متعددی انجام شده است. تقیلو و همکاران [۱۰] از محیط متخلخل با هدف بهبود انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری در یک کانال استفاده کردند و بر اساس مشاهدات آنها افزایش نفوذپذیری باعث بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار می‌شود. ارمغانی و همکاران [۱۱] به

اعمال شده است؛ یک جمله چشمه جهت در نظر گرفتن نیروی لورنتس ناشی از میدان مغناطیسی، به معادله مومنوم اضافه شده است. علاوه بر این، یک جمله چشمه ناشی از محیط متخلخل، تحت عنوان جمله دارسی به معادله مومنوم نیز اضافه می‌گردد.

رابطه دارسی به صورت زیر می‌باشد: [۱۸]

$$\nabla P = -\frac{\mu}{K} \vec{V} \quad (3)$$

در این رابطه μ ، K ، P و V به ترتیب ویسکوزیته دینامیکی، نفوذپذیری محیط متخلخل، فشار و سرعت جریان می‌باشند. میدان مغناطیسی و چگالی جریان از روابط زیر به دست می‌آیند: [۱۷]

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

$$j = \sigma (E + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (5)$$

در این روابط B و j به ترتیب میدان مغناطیسی و چگالی جریان می‌باشند. همچنین σ و E به ترتیب رسانایی الکتریکی سیال و میدان الکتریکی هستند. با توجه به اینکه قسمتی از کانال موج‌دار، شامل محیط متخلخل می‌باشد؛ معادلات حاکم، به صورت زیر بیان می‌شود. شبیه‌سازی بر اساس تعادل حرارتی دمایی بین سیال و جامد انجام شده است و دمای سیال و محیط متخلخل یکسان در نظر گرفته شده است. معادلات پیوستگی، مومنوم در حالت دائم به ترتیب به شرح زیر می‌باشد. [۱۷ و ۱۸]

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\left[\frac{1}{\varphi} \nabla \left(\frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{\varphi} \right) \right] = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\vartheta}{\varphi} \Delta \vec{V} + \frac{1}{\rho} \vec{j} \times \vec{B} - \frac{\vartheta}{k} \vec{V} \quad (7)$$

در جریان‌های حاوی محیط متخلخل، یک معادله انرژی برای فاز جامد و یک معادله انرژی برای فاز سیال به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

برای فاز سیال:

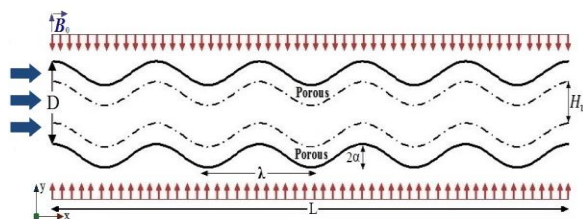
$$(\rho C_p)_f (+V \cdot \nabla T_f) = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) \quad (8)$$

برای فاز جامد:

$$(\rho C_p)_s = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) \quad (9)$$

با فرض تعادل حرارتی موضعی بین فاز جامد و سیال، دو معادله فوق با هم ادغام شده و به صورت معادله واحد زیر در می‌آید: [۱۸]

داده شده است. جریان با پروفیل سرعت یکنواخت وارد کانال به ارتفاع D می‌شود و دامنه حل تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت عرضی \vec{B} قرار دارد.



شکل ۱- طرح شماتیک جریان سیال در کانال موج‌دار شامل محیط متخلخل با پارامترهای هندسی مشخص شده

پارامترهای هندسی کانال طراحی شده مورد بررسی، در جدول ۱ بر حسب میلی‌متر مشخص شده است.

جدول ۱- پارامترهای هندسی کانال موج‌دار در مطالعه حاضر

D	۷۰ میلی‌متر
L	۹۷۵ میلی‌متر
λ	۱۹۵ میلی‌متر
2α	۲۰ میلی‌متر
H_v	۳۵ میلی‌متر
D_h	۱۴ میلی‌متر

۲-۲- شرایط مرزی هیدرولیکی و حرارتی

برای شرط مرزی جداره از شرط عدم لغزش استفاده شده است. به بیان دیگر تمامی مولفه‌های سرعت بر روی مرز دیواره صفر می‌باشد. جداره کانال تحت شار حرارتی متناوب (سینوسی) مطابق معادله زیر قرار دارد:

$$q'' = 50000 + 1000 \sin(x/0.1) \quad (2)$$

در ورودی کانال از شرط مرزی velocity inlet استفاده شده است. پروفیل سرعت در ورودی یکنواخت می‌باشد. دمای سیال ورودی ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شده است. در خروجی کانال از شرط مرزی pressure outlet استفاده شده است. در محل مرز مشترک بین ناحیه نانوسیال و ناحیه محیط متخلخل از شرط مرزی interface استفاده شده است. به بیان دیگر بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی در فصل مشترک بین دو ناحیه با استفاده از این شرط مرزی ارضا می‌شود.

۳- مدل ریاضی و روش حل عددی

۳-۱- معادلات حاکم بر مسله

از آنجایی که میدان مغناطیسی یکنواخت بر دامنه حل

در این رابطه B_0 و L به ترتیب شدت میدان مغناطیسی و طول مشخصه کانال می‌باشند. ضریب اصطکاک به صورت زیر محاسبه می‌شود. [۲۱]

$$f = \frac{2\Delta P D_h}{L \rho_{nf} V^2} \quad (17)$$

در این رابطه ΔP افت فشار بین ورودی و خروجی کانال است که به صورت زیر است:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out} \quad (18)$$

برای بررسی شاخص عملکرد حرارتی- هیدرولیکی از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود. با توجه به مطالعه کیم و وب [۲۲] نسبت عدد ناسلت به نسبت ضریب اصطکاک در توان مشابه پمپاژ به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$PEC = \frac{(Nu/Nu_0)}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (19)$$

در این رابطه Nu_0 و f_0 به ترتیب عدد ناسلت و ضریب اصطکاک حالت مرجع می‌باشند. در این محاسبات، شرایط مرجع برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مربوط به حالتی است که در کانال موج‌دار عوامل افزایش انتقال حرارتی مانند حضور میدان مغناطیسی و محیط متخلخل وجود ندارد.

۳-۲- خواص ترموفیزیکی نانوسیال

در پژوهش حاضر، جهت بهبود انتقال حرارت از نانوذرات اکسید منیزیم استفاده شده است. فرض شده است که پراکندگی یکنواخت ذرات نانو درون سیال پایه وجود دارد و بین نانوذرات و سیال پایه (آب) تعادل حرارتی برقرار است. در نتیجه می‌توان آن‌ها را مانند یک سیال تک‌فاز در نظر گرفت. از این رو تمام معادلات حاکم پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی برای نانوسیال نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. در محاسبات از خواص ترموفیزیکی نانوسیال استفاده شده است.

جدول ۲- خواص ترموفیزیکی سیال پایه و نانوذره [۲۷ و ۲۸]

ماده	خواص ترموفیزیکی		
	ظرفیت گرمایی $J/kg.K$	چگالی kg/m^3	رسانش حرارتی $W/m.K$
آب	۴۱۸۲	۹۹۸/۲	۰/۶
MgO	۸۷۴	۳۵۸۰	۵۵

$$\varphi(\rho C_p)_f V \cdot \nabla T_f = (1-\varphi) \nabla \cdot (K_s \cdot \nabla T_s) + \varphi \nabla \cdot (K_f \cdot \nabla T_f) \quad (10)$$

در این روابط ρ ، ν ، α ، k و T به ترتیب چگالی، ویسکوزیته سینماتیکی، ضریب پخش حرارتی، ضریب هدایت حرارتی و دما هستند. روابط و پارامترهای بی‌بعد مورد استفاده در این تجزیه و تحلیل با روابط زیر تعریف می‌شود. عدد رینولدز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Re = \frac{\rho_{nf} V_{in} D_h}{\mu_{nf}} \quad (11)$$

در این رابطه ρ_{nf} ، V_{in} ، D_h و μ_{nf} به ترتیب چگالی، سرعت ورودی، قطر هیدرولیکی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال می‌باشند. قطر هیدرولیکی در کانال دوطرفی به صورت $D_h = 2D$ محاسبه می‌شود. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محلی به کمک معادله (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$h_{local} = \frac{Q}{A(T_w - T_{bulk})} \quad (12)$$

در این رابطه T_w دمای دیواره کانال و T_{bulk} دمای بالک نانوسیال است. جهت بدست آوردن دمای دیواره از متوسط-گیری سطحی و برای به دست آوردن دمای بالک از متوسط‌گیری جرمی استفاده شده است. عدد ناسلت محلی از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$Nu_{local} = \frac{h_{local} D_h}{k_{nf}} \quad (13)$$

ضریب تخلخل برای یک محیط متخلخل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_T} \quad (14)$$

در این رابطه V_V حجم حفره و V_T حجم کل محیط متخلخل است. عدد دارسی به صورت نسبت نفوذپذیری به ناحیه سطح مقطع بیان می‌شود. [۱۸]

$$Da = \frac{K}{D_h^2} \quad (15)$$

عدد بی بعد مورد استفاده در جریان‌های تحت تاثیر میدان مغناطیسی، عدد هارتمن است. عدد هارتمن نسبت نیروی الکترومغناطیس به نیروی لزجت می‌باشد که شدت میدان مغناطیسی را بیان می‌کند و به صورت زیر تعریف می‌گردد. [۲۰]

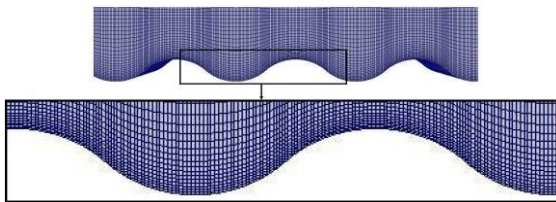
$$Ha = B_0 L \sqrt{\frac{\sigma_{nf}}{\mu_{nf}}} \quad (16)$$

مرتبۀ دوم و همچنین برای حل همزمان میدان فشار و سرعت، از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. به منظور بررسی اثر میدان مغناطیسی و محیط متخلخل جریان بر تغییرات دما و انتقال حرارت، معادله انرژی نیز حل شده است.

۴- بررسی صحت حل عددی

۴-۱- بررسی استقلال از شبکه محاسباتی

هندسه مسئله به صورت سازمان یافته و غیریکنواخت شبکه بندی شده است. در نواحی که گرادیانهای شدید مورد انتظار است، تراکم بیشتری نسبت به دیگر نواحی در نظر گرفته شده است. در شکل (۲) شبکه تولید شده ارائه شده است. برای بررسی استقلال شبکه، عدد ناسلت برای شبکه های مختلف و جهت کانال موج دار شامل محیط متخلخل برای عدد رینولدز ۳۰۰ و داریسی ۰/۰۰۰۱ تحت میدان مغناطیسی با عدد هارتمن ۴ محاسبه و در جدول ۳ مشخص گردیده است.



شکل ۲- قسمتی از شبکه با سازمان تولید شده

عدد ناسلت برای شبکه شماره ۴ نسبت به شبکه شماره ۳ تغییرات بسیار ناچیزی دارد. بنابراین شبکه شماره ۳ به عنوان شبکه بهینه انتخاب گردید.

جدول ۳- استقلال از شبکه برای کانال سینوسی متخلخل

تعداد بررسی ها	تعداد سلول ها	عدد ناسلت	درصد اختلاف عدد ناسلت
شبکه شماره ۱	۵۲۵۰	۳۲/۴۷۱	-
شبکه شماره ۲	۱۳۷۵۰	۳۱/۶۳۹	۲/۵۶۲
شبکه شماره ۳	۳۰۰۰۰	۳۱/۳۱۵	۱/۰۲۴
شبکه شماره ۴	۶۰۵۰۰	۳۱/۲۲۱	۰/۳۰۰

۴-۲- اعتبارسنجی نتایج

به منظور اعتبارسنجی، میدان مغناطیسی یکنواخت برای کانال صاف (بدون موج) در ۴ عدد هارتمن ۰، ۲، ۴ و ۱۰

چگالی موثر و ظرفیت گرمایی ویژه به کمک معادلات (۲۰) و (۲۱) محاسبه می شوند. [۲۳]

$$\rho_{nf} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_p \quad (20)$$

$$(\rho C_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho C_p)_f + \varphi(\rho C_p)_p \quad (21)$$

از مدل برینکمن [۲۴] برای محاسبه ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال استفاده شده است.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\varphi)^{2.5}} \quad (22)$$

با در نظر گرفتن شکل کروی و اندازه یکسان برای ذرات نانو، ضریب رسانش حرارتی نانوسیال با استفاده از تقریب ماکسول-گرانث از رابطه (۲۳) بدست می آید. [۲۵]

$$\frac{k_{nf}}{k_f} = \frac{k_p + (n-1)k_f + (n-1)(k_p - k_f)\varphi}{k_p + (n-1)k_f - (k_p - k_f)\varphi} \quad (23)$$

که در آن k_p رسانایی حرارتی ذرات، k_{nf} رسانایی حرارتی موثر نانوسیال، k_f رسانایی حرارتی سیال پایه، φ کسر حجمی ذرات است. در این رابطه n ضریب شکل ذرات است. همچنین فرض شده نانوذرات به صورت کروی شکل باشند بنابراین $n=3$ می باشد. برای به دست آوردن ضریب هدایت الکتریکی موثر نانوسیال از رابطه ماکسول استفاده شده است که به صورت زیر می باشد [۲۶]:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_f} = 1 + \frac{3\left(\frac{\sigma_p - 1}{\sigma_f}\right)\varphi}{\left(\frac{\sigma_p + 2}{\sigma_f}\right) - \left(\frac{\sigma_p - 1}{\sigma_f}\right)\varphi} \quad (24)$$

در معادلات فوق φ ، کسر حجمی نانو ذرات و اندیسه های nf و f و p به ترتیب مربوط به نانوسیال، سیال پایه و ذرات نانو است. خواص ترموفیزیکی سیال پایه (آب) و نانوذرات، در جدول ۲ مشخص شده است. [۲۷ و ۲۸]

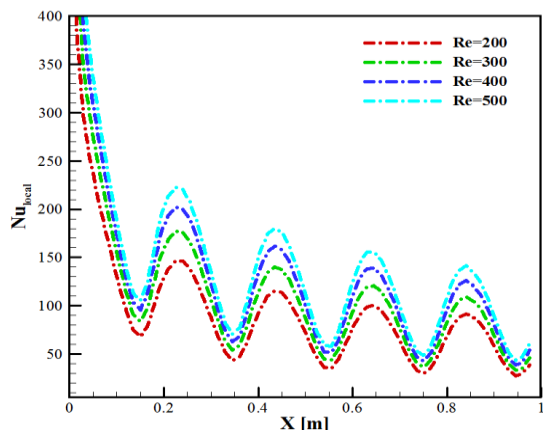
۳-۳- روش و روند حل عددی

در این مطالعه، به منظور حل عددی معادلات حاکم از نرم افزار فلونتت نسخه ۱۱۸/۲ استفاده شده است. در این نرم افزار برای گسسته سازی معادلات حاکم از روش حجم محدود استفاده شده است. معادلات با شرایط پایا، غیرقابل تراکم و دوبعدی حل شده اند. جهت گسسته سازی ترم فشار و سایر ترم های معادلات به ترتیب، روش استاندارد و تقریب

¹ ANSYS FLUENT 18.2, Theory Guide. Ansys Inc, 2018

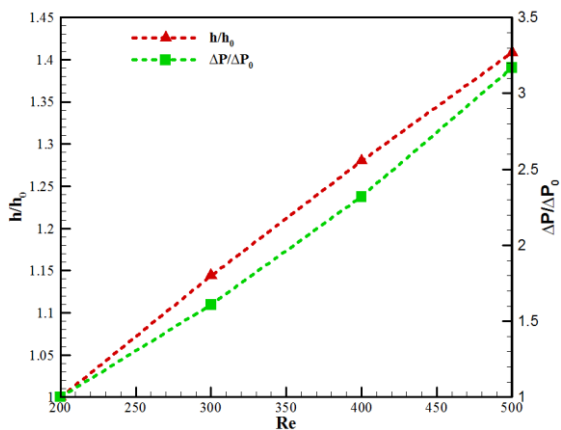
۵- نتایج و بحث

برای ارزیابی تاثیر عدد رینولدز بر انتقال حرارت کانال موجدار، عدد ناسلت محلی کانال موجدار به ازای رینولدزهای مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است.



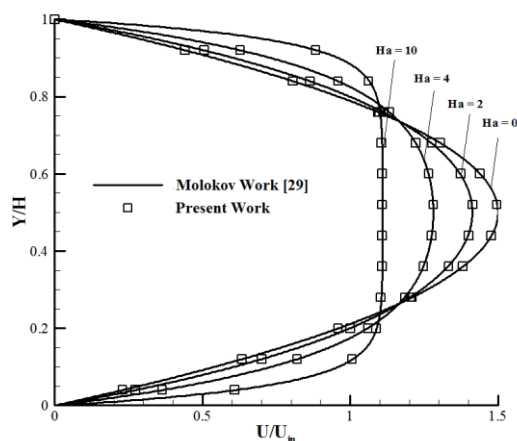
شکل ۵- ناسلت محلی در رینولدزهای مختلف در شرایط (Ha=10, Da=0.001)

همانطور که در شکل (۵) مشخص است، با افزایش عدد رینولدز، به دلیل کاهش ضخامت لایه مرزی و افزایش گرادیان سرعت و دما، انتقال حرارت جابجایی افزایش می یابد. در ابتدای کانال عدد ناسلت بیشترین مقدار را دارد. با افزایش فاصله محوری دامنه تغییرات عدد ناسلت با کاهش گرادیان دما در دیواره کاهش می یابد که به دلیل رشد لایه مرزی حرارتی در طول کانال است. شکل (۶) نسبت افت فشار و ضریب انتقال حرارت جریان برحسب رینولدزهای مختلف را نشان می دهد. همانطور که مشخص است با افزایش عدد رینولدز از مقدار ۲۰۰ تا ۵۰۰ مقدار افت فشار و انتقال حرارت به ترتیب به مقدار ۲۲۰ و ۴۰ درصد بیشتر شده است.



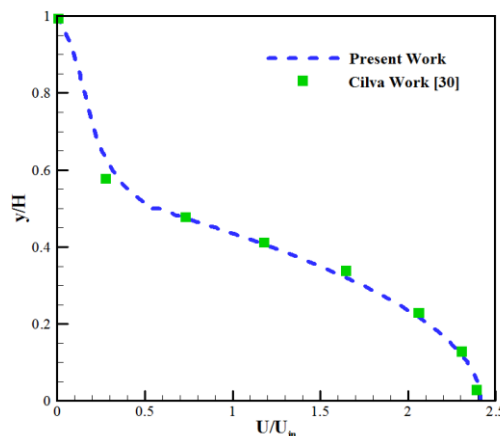
شکل ۶- نسبت افت فشار و ضریب انتقال حرارت جریان به ازای تغییرات عدد رینولدز (Ha=4, Da=0.0001)

از مطالعه مولوکو [۲۹] استفاده شده است. اعتبارسنجی انجام شده تحت میدان مغناطیسی یکنواخت در شکل (۳) رسم شده است. شکل فوق نشان می دهد پروفیل سرعت توسعه یافته بی بعد استخراج شده از حل حاضر و پروفیل سرعت به دست آمده از حل تحلیلی در عددهای هارتمن مختلف، بر یکدیگر منطبق هستند. جهت بررسی و اطمینان بیشتر صحت نتایج به دست آمده، شبیه سازی محیط متخلخل کار حاضر را با کار سیلوا و دلموس [۳۰] مقایسه می شود.



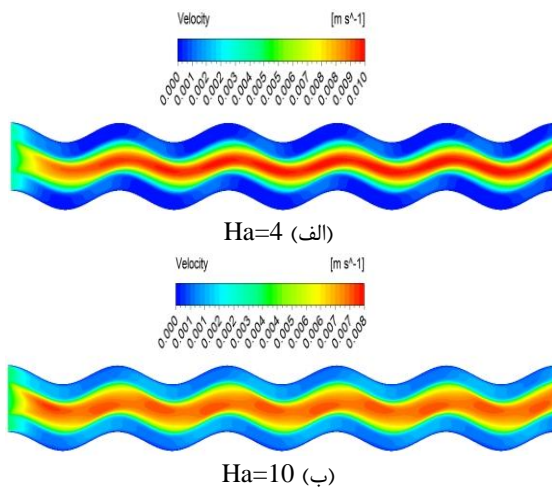
شکل ۳- پروفیل سرعت توسعه یافته و مقایسه آن با مطالعه مولوکو [۲۹]

ضریب تخلخل و عدد دارسی در مطالعه سیلوا و دلموس به ترتیب برابر ۰/۶ و ۰/۰۰۰۴ است. آنها نتایج خود را به صورت پروفیل سرعت توسعه یافته برای یک کانال که نصف عرض آن از محیط متخلخل پر شده است، ارائه دادند. شکل (۴) اعتبارسنجی انجام شده را نشان می دهد. عدد دارسی میزان توانایی انتقال سیال از محیط متخلخل است. عدد دارسی از رابطه (۱۵) به دست می آید.



شکل ۴- مقایسه پروفیل سرعت توسعه یافته برای کانال نیمه متخلخل با مطالعه سیلوا و دالموس [۳۰]

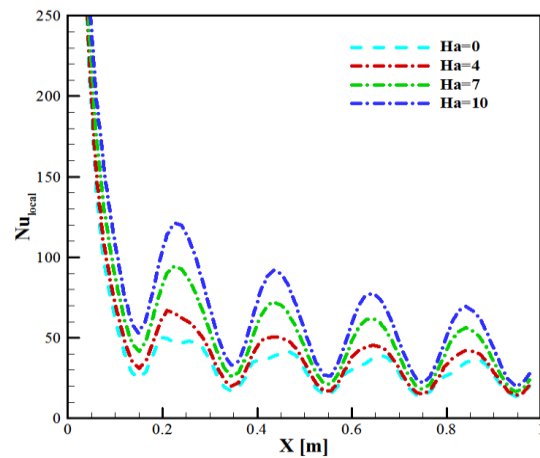
در برابر جریان نانوسیال مقاومت می‌کند و باعث کاهش سرعت جریان می‌شود. با توجه به ثابت بودن دبی جریان و بقای جرم، کاهش سرعت در خط مرکزی کانال، باعث افزایش سرعت در مجاورت سطوح می‌شود. در واقع با افزایش عدد هارتمن، مقدار بیشینه سرعت در مرکز کانال کاهش پیدا می‌کند و همزمان در نزدیکی دیواره کانال افزایش می‌یابد. در مقادیر بالای عدد هارتمن، حداکثر سرعت در نزدیکی قله موج سینوسی اتفاق می‌افتد. با افزایش قدرت میدان مغناطیسی احتمال ایجاد گردابه‌ها کم می‌شود و این به خاطر افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌ها است.



شکل ۹- کانتور سرعت برای مقادیر مختلف عدد هارتمن، در حالت (Re=500, Da=0.0001)

پروفیل سرعت بی بعد شده در خروجی کانال، برای هارتمن‌های مختلف در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش میدان مغناطیسی، سرعت در مرکز کانال کاهش و در نزدیکی دیواره کانال افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش سرعت در نزدیکی دیواره‌ها و کاهش در مرکز انتقال حرارت جابه‌جایی افزایش می‌یابد. تغییرات ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و عدد هارتمن در شکل (۱۱) رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد در یک رینولدز ثابت با افزایش شدت میدان مغناطیسی، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. بطوریکه در هارتمن‌های ۴، ۷ و ۱۰ با افزایش عدد رینولدز از ۲۰۰ به ۵۰۰، عدد ناسلت متوسط کانال به ترتیب به میزان ۴۱/۰۹، ۵۰/۸۲ و ۵۴/۶۸ درصد افزایش می‌یابد. این افزایش بدلیل این است که با افزایش میدان مغناطیسی، سرعت در مرکز کانال کاهش و در نزدیکی

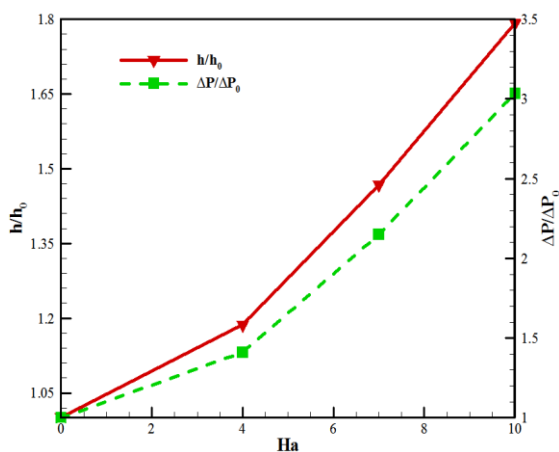
تغییرات عدد ناسلت محلی در ۴ عدد هارتمن برای رینولدز ۵۰۰ و کسر حجمی نانوذرات ۴ درصد در شکل (۷) رسم شده است. با افزایش شدت میدان مغناطیسی از عدد هارتمن ۴ به ۷ و ۷ به ۱۰، عدد ناسلت متوسط کانال به ترتیب به میزان ۲۹/۱۳ و ۲۳/۴۳ درصد افزایش یافته است. علت این تغییرات این است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، سرعت در جداره‌ها افزایش می‌یابد و همزمان از سرعت بیشینه در وسط کانال کاسته خواهد شد. این تمایل جریان به جداره باعث افزایش انتقال حرارت جابه‌جایی می‌شود.



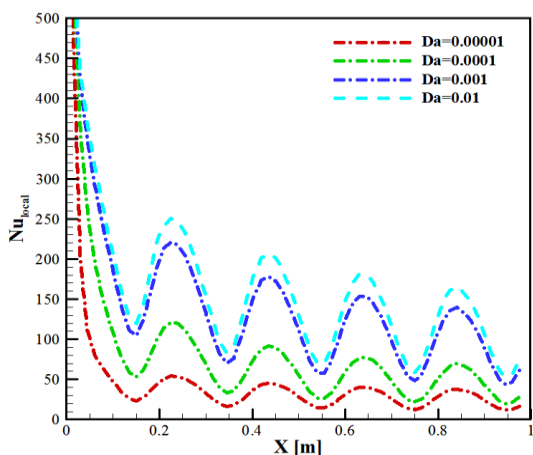
شکل ۷- عدد ناسلت محلی به ازای تغییرات عدد هارتمن (Da=0.0001, Re=500)

کانتور دما برای هارتمن‌های مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است با افزایش عدد هارتمن، خطوط همدمای تمایل دارند به هم نزدیک‌تر شوند. همچنین با افزایش عدد هارتمن، در نزدیکی دیواره مقدار گرادیان دما نیز افزایش می‌یابد. این افزایش گرادیان دما موجب افزایش عدد ناسلت به میزان حدود ۱/۵ برابر شده و در نتیجه انتقال حرارت بهبود یافته است. بیشینه دما در موج آخر کانال رخ می‌دهد و این دمای بیشینه با افزایش شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد. به گونه‌ای که با افزایش عدد هارتمن از ۴ به ۷ و از ۷ به ۱۰، ماکزیمم دمای دیواره کانال به ترتیب به میزان ۱۷۰ و ۹۰ درجه کاهش می‌یابد. این کاهش دمای دیواره کانال، باعث افزایش عدد ناسلت خواهد شد. کانتور سرعت برای مقادیر مختلف عدد هارتمن و در حالت (Re=500, Da=0.0001) در شکل (۹) نشان داده شده است. مشخص است با اعمال میدان مغناطیسی، نیروی درگ مانندی به نام نیروی لورنتس ایجاد می‌شود. این نیرو عاملی است که

نتیجه افت فشار (اختلاف فشار بین ابتدا و انتهای کانال) بیشتری ایجاد می‌کند. به نحوی که نسبت افت فشار در هارتمن ۱۰ نسبت به هارتمن ۴ به میزان ۲/۱۴ برابر شده است. ضریب انتقال حرارت جریان در هارتمن ۱۰ نسبت به هارتمن ۴ به میزان ۱/۵ برابر شده است. مبنای استخراج این نمودار، کانال موجدار در رینولدز ۳۰۰ بدون اعمال میدان مغناطیسی می‌باشد. عدد ناسلت محلی به ازای تغییرات عدد دارسی در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عدد دارسی عدد ناسلت محلی افزایش یافته است. در حقیقت با افزایش عدد دارسی، نفوذپذیری سیال درون محیط متخلخل افزایش و انتقال حرارت جابجایی تقویت می‌شود. با افزایش عدد دارسی از ۰/۰۰۰۰۱ به ۰/۰۰۰۰۱ و از ۰/۰۰۰۰۱ به ۰/۰۰۰۰۱، ناسلت متوسط کانال به ترتیب به میزان ۹۱/۴٪ و ۹۸٪ بهبود می‌یابد.

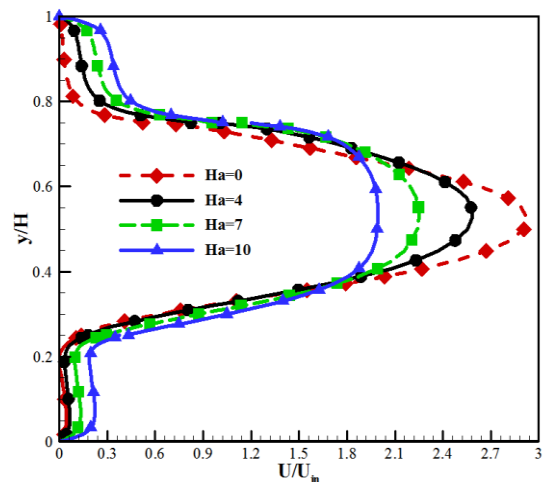


شکل ۱۲- نسبت افت فشار ضریب انتقال حرارت جریان بر حسب هارتمن‌های مختلف (Da=0.0001, Re=300)



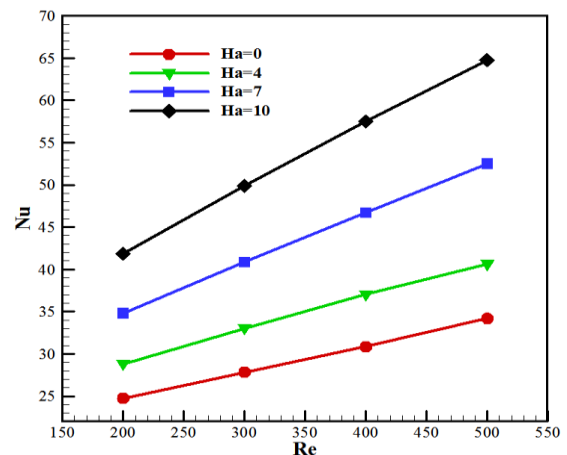
شکل ۱۳- عدد ناسلت محلی به ازای تغییرات عدد دارسی در حالت (Ha=10, Re=500)

دیواره کانال افزایش می‌یابد. این عامل باعث گرادیان شدید سرعت در کنار دیواره‌ها شده و عامل افزایش حرارت مبادله شده میان نانوسیال و جداره کانال می‌شود.



شکل ۱۰- پروفیل سرعت به ازای هارتمن‌های مختلف در (Re=500, Da=0.0001)

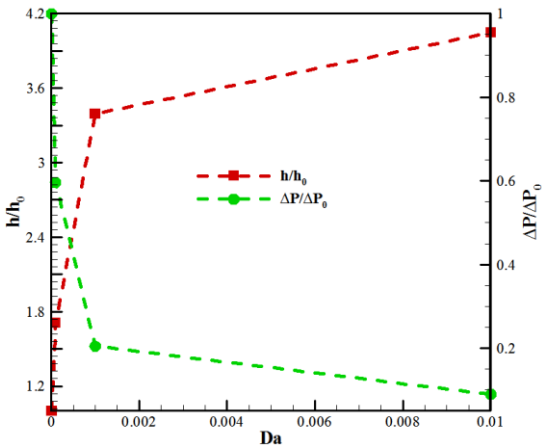
نسبت ضریب انتقال حرارت و افت فشار در کانال موجدار برای هارتمن‌های مختلف در شکل (۱۲) مشخص شده است.



شکل ۱۱- تغییرات ناسلت میانگین برای مقادیر مختلف عدد رینولدز و عدد هارتمن در Da=0.0001

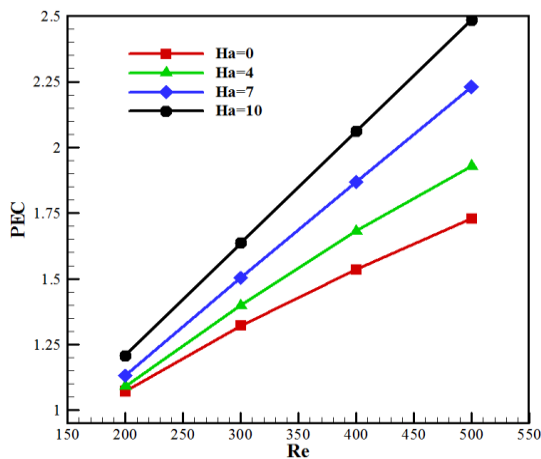
با افزایش عدد هارتمن، شدت میدان مغناطیسی اعمال شده افزایش می‌یابد. افزایش عدد هارتمن باعث افزایش ضریب انتقال حرارت خواهد شد؛ و نسبت این ضریب عددی بزرگ تر از ۱ خواهد بود و با افزایش عدد هارتمن این نسبت بزرگ تر می‌شود. در بررسی تاثیر نیروی مغناطیسی بر افت فشار مشاهده شد که با افزایش عدد هارتمن نیروی الکترومغناطیس افزایش یافته و در نتیجه نیروی بیشتری در جهت عکس حرکت سیال به جریان وارد می‌شود و در

نسبت ضریب انتقال حرارت و افت فشار در کانال موج‌دار، در رینولدز ۳۰۰ برای داری‌های مختلف در شکل (۱۶) ارائه شده است.



شکل ۱۶- نسبت افت فشار و ضریب انتقال حرارت جریان برحسب داری‌های مختلف در حالت (Ha=10)

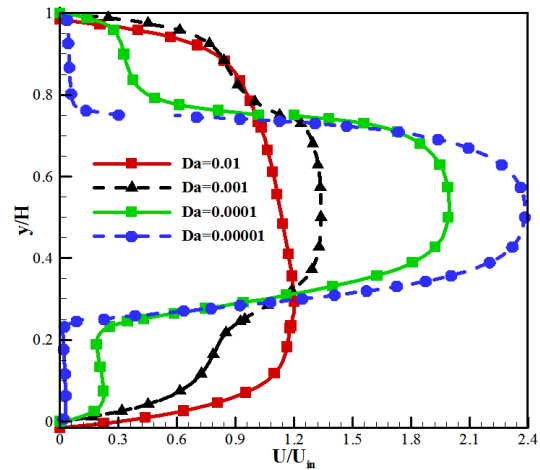
مبنای محاسبات در این شکل داری ۰/۰۰۰۰۱ می‌باشد. با کاهش عدد داری، میزان نفوذپذیری محیط متخلخل کاهش یافته و مقاومت این محیط در برابر عبور جریان زیاد شده و این امر باعث می‌شود ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش یابد. همچنین افزایش نفوذپذیری به معنای کاهش مقاومت ویسکوز بوده و افت فشار کاهش خواهد یافت. به همین دلیل با افزایش عدد داری تا ۰/۰۱، نسبت افت فشار عددی کوچک‌تر از ۱ خواهد بود. به نحوی که نسبت افت فشار در عدد داری ۰/۰۰۱ نسبت به عدد داری ۰/۰۱ از مقدار ۰/۲ تا ۰/۰۹۵ شده است.



شکل ۱۷- تغییرات عملکرد هیدرولیکی-حرارتی

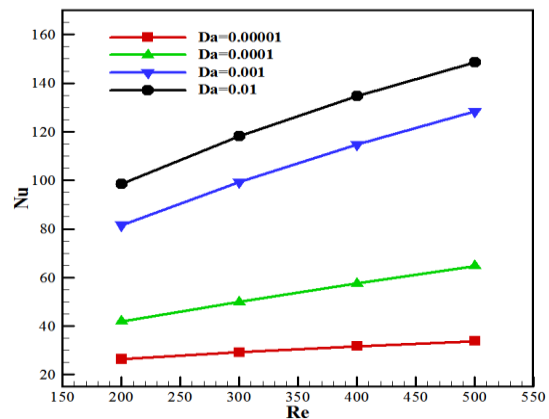
برای بررسی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی کانال سینوسی، این معیار با استفاده از معادله PEC برای حالت‌های فوق محاسبه شده و در شکل (۱۷) ارائه شده است. در این

شکل (۱۴) پروفیل سرعت در داری‌های مختلف برای (Re=500, Ha=10) را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه از محیط متخلخل در جداره کانال استفاده شده است، با افزایش عدد داری، نفوذپذیری جریان در جداره‌ها شدیدتر شده و گرادیان سرعت نزدیک جداره بیشتر شده و در نتیجه باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و بهبود انتقال حرارت می‌شود. شکل (۱۵) بیانگر آن است که با افزایش عدد رینولدز و همچنین عدد داری مقدار عدد ناسلت افزایش می‌یابد. البته با افزایش داری این افزایش بیشتر می‌شود بطوریکه در رینولدز ۲۰۰ و ۵۰۰ با افزایش عدد داری از ۰/۰۰۰۰۱ تا ۰/۰۱ عداد ناسلت به ترتیب ۴ و ۴/۳۹ برابر افزایش یافته است.



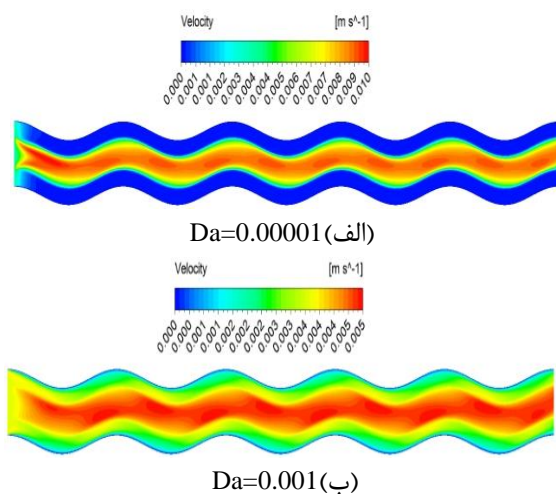
شکل ۱۴- پروفیل سرعت در داری‌های مختلف (Re=500) (Ha=10)

مطابق تعریف عدد داری تناسب مستقیمی بین عدد داری با نفوذپذیری در محیط متخلخل برقرار است. بنابراین، با افزایش عدد داری بطور حتم نفوذپذیری و جابه‌جایی جریان در محیط متخلخل تقویت خواهد شد.

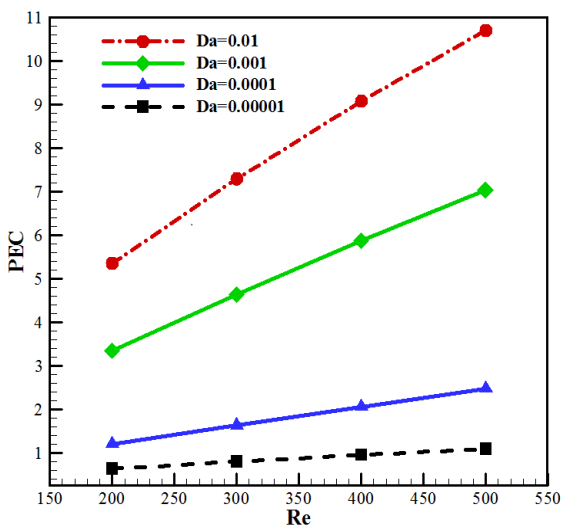


شکل ۱۵- تغییرات ناسلت میانگین برای مقادیر مختلف رینولدز و عدد داری در حالت Ha=10

کانال افزایش یافته که باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی و عدد ناسلت می‌شود.



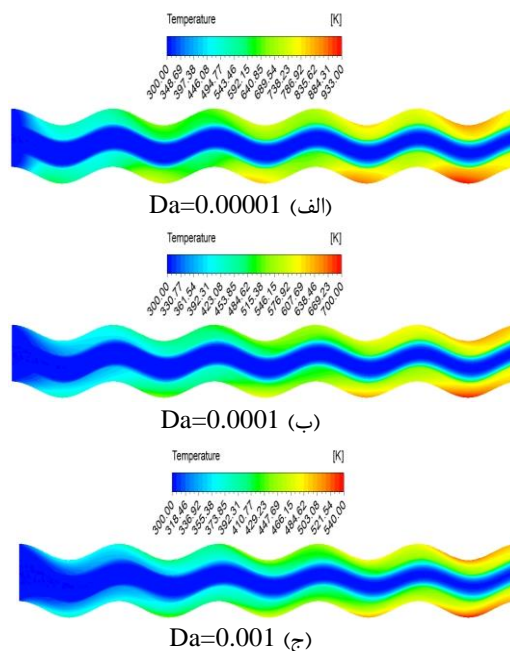
شکل ۱۹- کانتور سرعت برای مقادیر دو عدد دارسی، در حالت $Re=500, Ha=10$



شکل ۲۰- تغییرات ضریب عملکرد هیدرولیکی-حرارتی

با توجه به شکل (۲۰) عملکرد حرارتی- هیدرولیکی کانال موجدار با رینولدز و عدد دارسی رابطه مستقیم دارد. در واقع با افزایش عدد دارسی، مکانیزم‌های حرارتی نسبت به اصطکاکی قدرتمندتر عمل می‌کنند. افزایش عدد دارسی منجر به بهبود نسبت عدد ناسلت و کاهش نسبت ضریب اصطکاک می‌شود، که در مجموع بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد و بازدهی سیستم ایجاد می‌کند. کمترین ضریب عملکرد حرارتی هیدرولیکی در عدد دارسی 0.00001 با مقدار 0.5 و بیشترین در عدد دارسی 0.01 با مقدار 10.7 مشاهده می‌شود. در رینولدزهای بالا با تقویت عدد دارسی، PEC روند چشمگیرتری دارد.

محاسبات، شرایط مرجع برای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک مربوط به حالتی است که در کانال موجدار هیچ عامل افزایش انتقال حرارتی مانند حضور نانوذرات، میدان مغناطیسی و محیط متخلخل وجود ندارد. در رینولدز 500 ، با افزایش عدد هارتمن از 0 به 10 ، عملکرد هیدرولیکی-حرارتی حدود 43% درصد افزایش یافته است. کانتورهای دما برای دارسی‌های مختلف در شکل (۱۸) آورده شده است. با افزایش عدد دارسی، نفوذپذیری سیال درون محیط متخلخل افزایش و حرارت بیشتری از دیواره جذب می‌شود. کانتورهای دمای ارائه شده بیانگر آن است که ماکزیمم دمای دیواره کانال در موج آخر رخ می‌دهد. علاوه بر این با افزایش عدد دارسی ماکزیمم دمای دیواره کاهش می‌یابد به گونه‌ای که با افزایش عدد دارسی از 0.00001 به 0.0001 و از 0.0001 به 0.001 ، ماکزیمم دمای دیواره کانال به ترتیب به میزان 233 و 160 درجه کلون کاهش می‌یابد.



شکل ۱۸- کانتور دما برای مقادیر مختلف عدد دارسی، در حالت $Re=500, Ha=10$

کانتورهای سرعت برای دارسی‌های مختلف در شکل (۱۹) آورده شده است.

با مقایسه کانتور سرعت، در دارسی 0.00001 نسبت به دارسی 0.0001 این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش عدد دارسی ماکزیمم سرعت کاهش می‌یابد که بیانگر تخت شدن پروفیل سرعت می‌باشد و همانطور که گفته شد با تخت شدن پروفیل سرعت، گرادیان سرعت مجاور دیواره

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی عددی جریان نانوسیال به صورت تک‌فاز، آرام، تراکم‌ناپذیر و دائم در یک کانال دو بُعدی سینوسی تحت تاثیر میدان مغناطیسی در حضور محیط متخلخل بررسی شده است. اثر اعداد بی‌بعد رینولدز، هارتمن و دارسی بر انتقال حرارت و افت فشار مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است.

۱- با ارزیابی انتقال حرارت جریان بر حسب رینولدزهای مختلف در شرایط $(Ha=4)$ و $(Da=0/001)$ این نتیجه حاصل شد که با افزایش عدد رینولدز از مقدار ۲۰۰ تا ۵۰۰ میزان حرارت منتقل شده ۴۰ درصد بیشتر گزارش شد. با افزایش عدد رینولدز حرارت مبادله شده و افت فشار هر دو روندی افزایشی داشتند به نحوی که با افزایش رینولدز از مقدار ۲۰۰ تا ۵۰۰ مقدار ضریب انتقال حرارت و نسبت افت فشار و انتقال حرارت به ترتیب به مقدار ۴۰ و ۲۲۰ درصد بیشتر شده است.

۲- در تمامی موارد، استفاده از میدان مغناطیسی باعث بهبود انتقال حرارت می‌شود. با شدت میدان مغناطیسی (عدد هارتمن از ۰ به ۱۰) در شرایط یکسان (رینولدز ۵۰۰ و دارسی $0/001$) عدد ناسلت متوسط و انتقال حرارت ۲ برابر بهبود پیدا می‌کند.

۳- در بررسی تاثیر نیروی مغناطیسی بر افت فشار، مشاهده شد که با افزایش عدد هارتمن نیروی الکترومغناطیسی افزایش یافته و در نتیجه نیروی بیشتری در جهت عکس حرکت سیال به جریان وارد می‌شود و در نتیجه افت فشار (اختلاف فشار بین ابتدا و انتهای کانال) بیشتری ایجاد می‌کند. به نحوی که نسبت افت فشار در هارتمن ۱۰ نسبت به هارتمن ۴ به میزان $2/14$ برابر شده است. ضریب انتقال

جریان در هارتمن ۱۰ نسبت به هارتمن ۴ به میزان $1/5$ برابر شده است.

۴- با مشاهده توزیع سرعت، می‌توان نتیجه گرفت که با شدت چگالی میدان مغناطیسی پروفیل سرعت تخت‌تر شد. این امر موجب افزایش سرعت در نزدیکی جداره‌های کانال شده و باعث افزایش گرادیان سرعت در کنار جداره‌ها می‌شود. به نوبه خود، ضریب انتقال حرارت جابجایی را افزایش می‌دهد.

۵- با وجود محیط متخلخل و افزایش عدد دارسی (افزایش نفوذپذیری لایه متخلخل و کاهش مقاومت ویسکوز) همواره انتقال حرارت بهبود پیدا کرد و افت فشار روندی کاهشی داشت. به نحوی که در یک شرایط ثابت، با افزایش عدد دارسی از $0/001$ تا $0/01$ ضریب انتقال حرارت جابجایی ۲۰ درصد افزایش پیدا کرد و همزمان افت فشار ۱۱۰ درصد کاهش پیدا کرد. پس استفاده از محیط متخلخل دارای نتایج مطلوب‌تری نسبت به استفاده میدان مغناطیسی بود.

۶- با افزایش عدد دارسی، مکانیزم‌های حرارتی نسبت به اصطکاکی قدرتمندتر عمل می‌کنند. افزایش عدد دارسی منجر به بهبود نسبت عدد ناسلت و کاهش نسبت ضریب اصطکاک می‌شود، که در مجموع استفاده از محیط متخلخل، بهبود قابل ملاحظه‌ای در عملکرد و بازدهی سیستم ایجاد می‌کند. بیشترین ضریب عملکرد حرارتی هیدرولیکی در عدد دارسی $0/01$ با مقدار $10/7$ و کمترین ضریب عملکرد حرارتی- هیدرولیکی در عدد دارسی $0/0001$ با مقدار $0/5$ است.

۷- نتایج نشان می‌دهد که در یک جریان نانوسیال، استفاده و طراحی صحیح محیط متخلخل می‌تواند انتقال حرارت جابجایی را به طور چشمگیری بهبود داده و تا حدود زیادی افت فشار را کنترل کند.

مراجع

[1] L. Gong, K. Kota, W. Tao, and Y. Joshi, "Thermal Performance of Microchannel with Wavy Walls for Electronics Cooling", Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions, Vol. 1, 2011, pp. 1029-1035.

[۲] علی صالحین و آرش میرعبداله لواسانی، "تاثیر هندسه و سیال داخل جداره بر عملکرد حرارتی- هیدرولیکی یک کانال موجی- شکل در جریان مغشوش"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، صفحه ۲۷۳-۲۸۳.

[3] A. Sakanova, CC. Keian, and Z.Jiyun, "Performance improvements of microchannel heat sink using wavy channel and nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 89, 2015, pp. 59-74.

- [4] E.W. Bitam, Y. Demagh, A. Hachicha, H. Benmoussa, and Y.AKabar, " Numerical Investigation of a Novel Sinusoidal Tube Receiver for Parabolic Trough Technology", *Applied Energy*, Vol. 218, 2018, pp. 494–510.
- [5] A. E. Kabeel, E. M. S. El-Said, and S. A. Dafea, "A Review of Magnetic Field Effects on Flow and Heat Transfer in Liquids: Present Status and Future Potential for Studies and Applications", *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 45, 2015, pp. 830–837.
- [6] L. Benos, and I.E. Sarris, " Analytical Study of the Magnetohydrodynamic Natural Convection of a Nanofluid Filled Horizontal Shallow Cavity with Internal Heat Generation", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 130, 2019, pp. 862–873.
- [7] M. Sheikholeslami, and S. Shehzad, "Numerical Analysis of Fe₃O₄-H₂O Nanofluid Flow in Permeable Media Under the Effect of External Magnetic Source", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 118, 2018, pp. 182-192.
- [8] M. Ibrahim, T. Saeed, M. Bane, SN. Sedeh, YM. Chu, and D. Toghraie, "Two-phase Analysis of Heat Transfer and Entropy Generation of Water-based Magnetite Nanofluid Flow in a Circular Microtube with Twisted Porous Blocks under a Uniform Magnetic Field", *Powder Technology*, Vol. 384, 2021, pp. 522–541.
- [9] M. Bezaatpour, and M. Goharkhah, "Effect of Magnetic Field on the Hydrodynamic and Heat Transfer of Magnetite Ferrofluid Flow in a Porous Fin Heat Sink", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 476, 2019, pp. 506–515.
- [۱۰] محمد تقی‌لو، جلال قاسمی و محمد نوروزی، " استفاده از محیط متخلخل برای بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی اجباری در کانال و تحلیل عددی آن به روش بولتزمن شبکه‌ای"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۸، پاییز ۱۳۹۸، صفحه ۲۷–۳۹.
- [۱۱] طاهر ارمغانی، محمدجواد مغربی و محسن نظری، " مقایسه انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری تکفازی و دوفازی نانوسیالات در کانال متخلخل"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۰، بهار ۱۳۹۴، صفحه ۱۰۳–۱۱۴.
- [12] Y. Wang, C.Q.Z. Ding, J. Tu, and R. Zhao, " Numerical Simulation of Flow and Heat Transfer Characteristics of Nanofluids in Built in Porous Twisted Tape Tube", *Powder Technology*, Vol. 392, 2021, pp. 570–586.
- [13] M. Izadi, R. Mohebbi, A.A. Delouei, and H. Sajjadi, "Natural Convection of a Magnetizable Hybrid Nanofluid Inside a Porous Enclosure Subjected to Two Variable Magnetic Fields", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 151, 2019, pp. 154–169.
- [14] OA. Beg, K. Venkatadri, and VA. Prasad, " Numerical study of magnetohydrodynamic natural convection in a nonDarcian porous enclosure filled with electrically conducting helium gas" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 236, 2022, pp. 1989–1996..
- [15] 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, 2018, pp. 247–258.
- [16] Y. Demagh, I. Bordja, Y. Kabar, and H. Benmoussa, "A design method of an S-curved parabolic trough collector absorber with a three-dimensional heat flux density distribution", *Solar Energy*, Vol. 122, 2015, pp. 873–884.
- [17] S. Valiallah Mousavi, M. Barzegar Gerdroodbary, M. Sheikholeslami and D. D. Ganji, "The influence of a magnetic field on the heat transfer of a magnetic nanofluid in a sinusoidal channel", *The European Physical Journal Plus*, Vol. 131, 2016, pp. 1–12.
- [18] S. Nazari, D. Toghraie, " Numerical simulation of heat transfer and fluid flow of Water-CuO Nanofluid in a sinusoidal channel with a porous medium", *Physica E*, Vol. 87, 2017, pp. 134–140.
- [19] C.C. Wang, C.K. Chen, " Forced convection in a wavy-wall channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, 2002, pp. 2587–2595.
- [20] R. Nouri, M. Gurji and D. D. Ganji, "Numerical investigation of magnetic field effect on nanofluid forced heat transfer in a sinusoidal channel", *Modares Mechanical Engineering Journal*, Vol. 14, 2014, pp. 43–55.
- [21] Kays WM, London AL. Compact heat exchangers. 3rd ed. Melbourne: Kreiger Publishing; 1984.
- [22] Webb RL, Kim NH. Principles of enhanced heat transfer. 2nd ed. New York, NY: Taylor & Francis Group; 2006.
- [23] G. Kefayati, "Lattice Boltzmann simulation of MHD natural convection in a nanofluid-filled cavity with sinusoidal temperature distribution", *Powder Technology*, Vol. 243, 2013, pp. 171–183.

- [24] H.C. Brinkman., "The viscosity of concentrated suspensions and solutions", *Journal of Chemical Physics*, Vol. 20, 1952, pp. 571–581.
- [25] K. Khanafer, K. Vafai M. Lightstone "Buoyancydriven heat transfer enhancement in a two dimensional enclosure utilizing nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 2003, pp. 3639–3653.
- [26] Maxwell J.C., *A Treatise on Electricity and Magnetism*, second ed. Oxford University Press, Cambridge, 1904, pp. 435-441.
- [27] A. A. Permanasari, B. S. Kuncara, and P. Puspitasari, "Convective heat transfer characteristics of TiO₂-EG nanofluid as coolant fluid in heat exchanger", *AIP Conference Proceedings*, 03 July, Avita Ayu, State University of Malang, Vol. 1220, 2019, pp. 451–468.
- [28] A. A. Minea, and W. M. El-Maghlany, "Influence of hybrid nanofluids on the performance of parabolic trough collectors in solar thermal systems: recent findings and numerical comparison", *Renew Energy*, Vol. 120, 2018, pp. 350–364.
- [29] S. S. Molokov, R. Moreau, and H. K. Moffatt, "Magnetohydrodynamics: Historical Evolution and Trends", Vol. 80. Springer Science & Business Media, 2007.
- [30] R.A. Silva, and M.J de Lemos, "Turbulent flow in a channel occupied by a porous layer considering the stress jump at the interface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, 2003, pp. 5113–5121.