

حل عددی انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال درون میکروکانال تحت شار ثابت، تحت تأثیر میدان مغناطیسی با در نظر گرفتن سرعت لغزشی

عبدالمجید تقی پور^۱، آرش کریمی پور^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

mtpv007@gmail.com

خلاصه

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال FMWNT در یک میکروکانال دو بعدی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. این میکروکانال به دو قسمت تقسیم شده که، در دیواره ی پایینی به صورت کامل و در دیواره ی بالایی فقط در قسمت ورودی عایق حرارتی شده است. قسمت دوم میکروکانال تحت تاثیر شار حرارتی ثابت q_0 و همچنین یک میدان مغناطیسی با قدرت ثابت B_0 می باشد. شرط سرعت لغزشی در طول دیواره های میکروکانال نیز در نظر گرفته شده است. معادلات ناویر استوکس پس از بازنویسی (به منظور در نظر گرفتن اثرات میدان مغناطیسی)، گسسته سازی شدند و در محیط فرترن به صورت عددی حل شدند. نتایج به صورت پروفیل های سرعت، دما و عدد ناسلت ارائه شده است. سرعت لغزشی در دیواره ی میکروکانال و بررسی اثرات آن برای اولین بار در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: نانوسیال، میکروکانال، انتقال حرارت جابجایی اجباری، سرعت لغزشی

۱. مقدمه

در سالهای اخیر تحقیق بر روی روشهای متفاوت در خصوص افزایش انتقال حرارت سرعت بیشتری گرفته است. در همین راستا نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربرد های صنعتی مورد توجه قرار گرفت که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می شوند، این دسته از سیالات به نانو سیال معروف هستند.

ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی شان با توزیع در سیال پایه باعث افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال، که یکی از پارامترهای اساسی انتقال حرارت محسوب می شود، می گردند. نتایج تجربی نشان می دهد که افزودن نانوذرات به سیال پایه باعث افزایش چشمگیر ضریب انتقال حرارت در نانوسیال می شود. بنابراین نانوسیال های گزینه های مناسبی برای استفاده در کاربردهای انتقال حرارت به شمار می روند [۱،۲].

افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال خیلی فراتر از تصویری است که از یک رابطه مرسوم قابل پیش بینی باشد. به نظر می رسد که تعدادی فاکتور مخصوص در مخلوط نانوسیال در حال تغییر دادن مکانیزم های انتقال حرارت، مخصوصاً برای سیالات خاصی در دمای بالاتر دیواره هستند. با استفاده از تغییراتی در هندسه جریان، شرایط مرزی و یا افزایش رسانایی حرارتی سیال می توان انتقال حرارت جابه جایی را افزایش داد [۳]. در تعداد زیادی از پژوهش ها به بررسی انتقال حرارت در شکلهای هندسی متفاوت و بررسی اثرات عوامل خارجی بر این انتقال حرارت پرداخته شده است. به عنوان مثال تهیر و همکاران در پژوهشی به بررسی انتقال حرارت در کانال با مقطع دایره ای پرداخته اند. [۴] در این مقالات به بررسی انتقال حرارت در کانال با مقاطع هندسی گوناگون پرداخته شده است [۵،۶].

سیستم های خنک کننده، یکی از مهم ترین دغدغه های کارخانه ها و صنایع و هر جایی است که به نوعی با انتقال حرارت روبه رو می باشد. در این شرایط استفاده از سیستم های خنک کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب ناپذیر است. تولیس و همکاران [۷] در پژوهشی به بررسی اثرات خنک کنندگی میکروکانال ها در شکلهای مختلف و با سیالات متفاوت پرداختند. رایج ترین سیالات مورد استفاده در میکروکانال ها هوا و آب بودند، که میزان انتقال حرارت این سیالات بسیار ناچیز بود. این امر به دلیل خواص ترموفیزیکی این سیالات و انتقال حرارت پایین آنها بود.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد

^۲ استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی نجف آباد

بهینه سازی سیستم های انتقال حرارت موجود، در اکثر مواقع به وسیله افزایش سطح آنها صورت می گیرد که همواره باعث افزایش حجم و اندازه این دستگاه ها می شود؛ لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک کننده های جدید و مؤثر نیاز است و نانو سیالات به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شدند [۸]

اثرات سطحی در مقیاس میکرو تاثیرات بسیار چشمگیر تری نسبت به مقیاس های متریک دارد. به عنوان مثال شرط عدم لغزش که در مقیاس متریک به وفور به کار می رود، در میکرو کانال ها شرط مناسبی نخواهد بود و باید شرط لغزش در دیواره ها مورد توجه قرار گیرد. در این مقیاس باید روشهای خاصی مثل روش شبکه بولتزمن یا دینامیک مولکولی مورد استفاده قرار گیرد. [۹-۱۳]

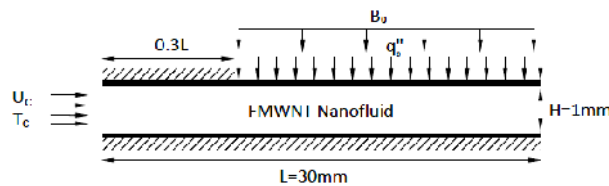
لازم به ذکر است تا کنون پژوهش های بسیار زیادی در زمینه انتقال حرارت در میکرو کانالها و نانو سیالات ارائه شده است، که بعضا شرایط سرعت لغزشی، اثرات میدان های مغناطیسی، انتقال حرارت اجباری تحت اثر دمای ثابت یا شار ثابت به طور پراکنده در آنها مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. [۱۴-۱۶]

امین الساداتی و همکاران [۱۷] در پژوهشی اثرات میدان مغناطیسی بر روی یک میکرو کانال تحت یک شار ثابت را مورد مطالعه قرار دادند، ولی از اثرات سرعت لغزشی در مقیاس ماکرو صرف نظر کردند و در مطالعه خود به آن نپرداختند.

نهایتا با دقت در مطالعات انجام شده و بررسی تمام آنها به این نتیجه دست یافتیم که در زمینه انتقال حرارت در میکرو کانالها تحت تاثیر میدان مغناطیسی (MHD) پژوهش ها به نحوی انجام گرفته که در تمامی آنها شرط مرزی مهم سرعت لغزشی نادیده گرفته شده است و پژوهش جامعی که در آن به اثرات میدان مغناطیسی، شرط سرعت لغزشی و انتقال حرارت اجباری به طور همزمان پرداخته شود وجود ندارد. این مسله ما را بر آن داشت که مقاله حاضر را با هدف نزدیک تر شدن به شرایط کاربرد صنعتی، با توجه به در نظر گرفتن مجموعه پارامترهای تاثیر گذار واقعی و به صورت همزمان در میکرو کانالها بنویسیم. لازم به ذکر است که از نانو سیال جدید FMWNT نیز که خواص آن به صورت تجربی توسط امرالهی و همکاران [۱۸] مورد مطالعه قرار گرفته استفاده نمودیم.

۲. بیان مسئله

شکل ۱ مدل فیزیکی یک میکرو کانال دو بعدی که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است را نشان می دهد. ارتفاع و طول میکرو کانال به ترتیب $h=1\text{mm}$ و $l=30\text{mm}$ هستند. بنابراین ارتفاع و طول بدون بعد نیز به ترتیب $H=h/h=1$ و $L=l/h=30$ خواهند بود. نسبت طول به عرض در میکرو کانال ($l/h=30$) به نحوی در نظر گرفته شده است که در خروجی میکرو کانال به جریان کاملا توسعه یافته دست یابیم. این میکرو کانال به دو قسمت تقسیم شده است، که به ترتیب دارای طولهای l_1 و l_2 می باشند. میکرو کانال در دیواره ی پایینی به صورت کامل (I) و در دیواره ی بالایی فقط در قسمت ورودی ($l_1=0.3l$) عایق حرارتی شده است. قسمت دوم میکرو کانال با طول $l_2=0.7l$ تحت تاثیر شار حرارتی ثابت به قدرت $q_0''=30\text{kW/m}^2$ و همچنین یک میدان مغناطیسی با قدرت ثابت B_0 می باشد. همچنین شرط سرعت لغزشی در طول دیواره های میکرو کانال نیز در نظر گرفته شده است. دمای نانو سیال FMWNT در ورودی میکرو کانال $T_c=298\text{k}$ در نظر گرفته شده است. نانو سیال به عنوان یک سیال نیوتنی و غیر قابل تراکم فرض شده است. جریان نیز در میکرو کانال به صورت آرام و غیر قابل تراکم فرض می شود.



شکل ۱. دیاگرام شماتیک مدل فیزیکی

۳. معادلات حاکم

فرم دو بعدی معادلات بی بعد شده ی ناویر استوکس (بیوستگی، مومنتوم و انرژی) برای نانو سیالات به صورت زیر می باشد [۱۹]

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{\text{Ha}^2}{\text{Re}} U \quad (1)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (2)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr.Re}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (3)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Pr.Re}} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (4)$$

در این معادلات U, V, P, θ به ترتیب بیانگر سرعت افقی بی بعد، سرعت عمودی بی بعد، دمای بی بعد و فشار بی بعد می باشند.

$$Pr, Re, Ha \text{ و } \sigma_f, \mu_f, \vartheta_f, U_c \text{ در این روابط}$$

$$Ha = B_0 h \left(\frac{\sigma_f}{\mu_f} \right)^{0.5} \text{ و } Pr = \frac{\vartheta_f}{\alpha_f}, Re = \frac{U_c h}{\nu_f}$$

در این روابط $U_c, \vartheta_f, \mu_f, \sigma_f$ معرف سرعت نانو سیال در ورودی میکرو کانال، ویسکوزیته سینماتیکی ذرات جامد معلق، ویسکوزیته دینامیکی ذرات جامد معلق و رسانایی الکتریکی ذرات جامد معلق در سیال هستند.

در معادلات بالا پارامترهای بدون بعد زیر مورد استفاده قرار گرفته اند:

$$X = \frac{x}{h}, Y = \frac{y}{h}, U = \frac{u}{u_c}, U_s = \frac{u_s}{u_c}, V = \frac{v}{u_c}, P = \frac{\bar{P}}{\rho_n f u_c^2}, \theta = \frac{T - T_c}{\Delta T}, \Delta T = \frac{q_0 h}{k_f} \quad (5)$$

در معادله (5)، X و Y اندازه های بدون بعد شده در جهات مختصات کارترین هستند. U_s سرعت لغزشی، \bar{P} فشار متوسط، T دما و k_f ضریب رسانایی حرارتی ذرات جامد معلق در سیال هستند.

خواص ترموفیزیکی نانو سیال FMWNT، جدول 1، به صورت تجربی توسط امرالهی و همکاران [18] به دست آمده است.

جدول 1. نتایج تجربی برای خواص ترموفیزیکی نانو سیال FMWNT در دمای 33°C

wt% FMWNT/water	ρ (Kg/m ³)	K (W/mK)	μ (Pas)
0.1 %	1003 [23.4 °C]	0.66	7.81×10^{-4}
0.2 %	1006 [23.1 °C]	0.71	7.90×10^{-4}

لازم به ذکر است که ظرفیت گرمایی این نانو سیال با ظرفیت گرمایی آب برابر است

۱-۳ شرایط مرزی

در سطح ماکروسکوپی شرط عدم لغزش یکی از ساده ترین شرایط مرزی است که بیان می کند مایعی که مجاور سطح جامد است همان سرعت سطح را دارد. اخیراً محققان نشان داده اند [15] که شرط مرزی عدم لغزش ممکن است برای جریان در سطح میکرو مناسب نباشد چرا که جریان یک مایع در مقیاس میکرو با جریان در مقیاس ماکرو متفاوت است. برای این منظور سرعت لغزشی نانو سیال روی دیواره های ثابت را به صورت زیر در نظر میگیریم

$$u_s = \pm \beta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{y=0,h} \right) \quad (6)$$

که β نشان دهنده ضریب لغزش می باشد. فرم بدون بعد معادله (6) بر روی دیواره به صورت زیر قابل بیان می باشد

$$U_s = \pm \beta^* \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \Big|_{Y=0,1} \right) \quad (7)$$

که $\beta^* = \frac{\beta}{h}$ ضریب لغزشی بدون بعد خواهد بود. شرایط مرزی بدون بعد نیز به صورت زیر می باشد

$$\begin{aligned} U = 1, V = 0, \theta = 0 & \quad X = 0, \quad 0 \leq Y \leq 1 \\ V = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 & \quad X = 30, \quad 0 \leq Y \leq 1 \\ V = 0, \quad U = U_s, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 & \quad Y = 0, \quad 0 \leq X \leq 30 \\ V = 0, \quad U = U_s, \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \text{ یا } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{k_f}{k_{nf}} & \quad Y = 1, \quad 0 \leq X \leq 30 \end{aligned} \quad (8)$$

معادلات بدون بعد (1) تا (4) تحت شرایط مرزی (7) و (8) با استفاده از الگوریتم SIMPLE حل شدند. تمامی این معادلات پس از گسسته سازی به صورت عددی در فرتن شبیه سازی شدند. شبکه ی یکنواخت مستطیلی برای شبکه بندی مورد استفاده قرار گرفت. پس از حل معادلات حاکم برای U, V, θ ، پارامترهای مفید دیگری مثل Nu_x نیز به دست آمد. عدد ناسلت محلی عبارتست از

$$Nu_x = \frac{\lambda h}{k_f} \quad (9)$$

که λ ضریب انتقال حرارت جابجایی می باشد. فرم بدون بعد معادله (9) به صورت زیر خواهد بود

$$Nu_x(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \quad (10)$$

عدد ناسلت متوسط هم با انتگرال گیری در طول دیواره به صورت زیر قابل بیان می باشد

$$Nu_m = \frac{1}{L_2} \int_{L_1}^{L_1+L_2} Nu_x(X) dx \quad (11)$$

۴. نتایج و بحث

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال FMWNT در یک میکرو کانال دو بعدی به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. این میکرو کانال تحت تاثیر یک میدان مغناطیسی یکنواخت به قدرت B_0 و شار حرارتی ثابت q_0'' که در شکل ۱ نشان داده شده است قرار دارد. همچنین مقادیر خواص ترموفیزیکی این نانوسیال در جدول ۱ ارائه شده است. سرعت لغزشی به عنوان شرط مرزی در طول دیواره میکرو کانال برای مقادیر مختلف ضریب لغزش $\beta^* = 0, 0.04, 0.08$ مورد استفاده قرار گرفته است.

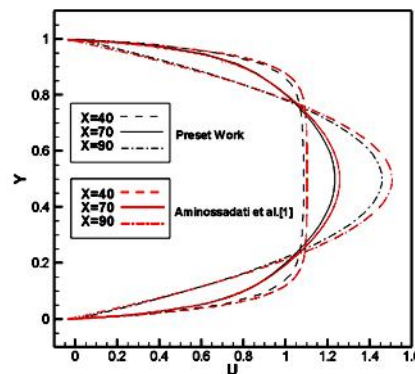
۴-۱ استقلال شبکه و اعتبار سنجی

جدول ۲، مقادیر عدد ناسلت متوسط برای نانوسیال در میکرو کانال در ۳ شبکه بندی مختلف، 900×30 ، 1200×40 و 1500×50 را برای 0.2% ، $0.1\% \phi$ و $Re=10$ نشان می دهد. مشاهده شد که تفاوت ناچیز و قابل چشم پوشی بین شبکه های 1200×40 و 1500×50 وجود دارد، بنابراین شبکه 1200×40 را انتخاب کردیم.

جدول ۲. مقادیر عدد ناسلت متوسط در شبکه بندی های مختلف برای 0.2% ، $0.1\% \phi$ ، $Ha=0$ ، $Re=10$ و $\beta^*=0.04$

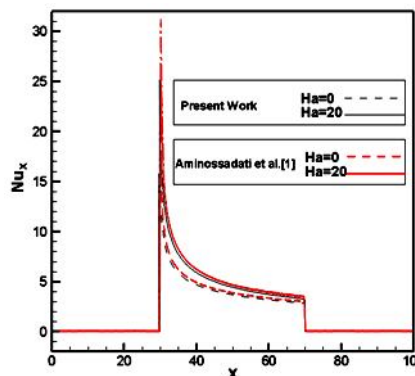
	900×30	1200×40	1500×50
$\phi=0.1\%$	2.359547	2.355205	2.353466
$\phi=0.2\%$	2.469918	2.466628	2.464892

برای اعتبار سنجی کد، نتایج حاصل از این پژوهش را همانطور که در شکل ۲-a ارائه شده است، با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار دادیم. در این شکل پروفیل سرعت افقی در مقاطع مختلف میکرو کانال را مقایسه کردیم.



شکل ۲-a. پروفیل سرعت افقی پژوهش حاضر در مقایسه با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۱۷]، در مقاطع مختلف میکرو کانال در $Ha=20$ ، $Re=100$ و $\phi=0.02$

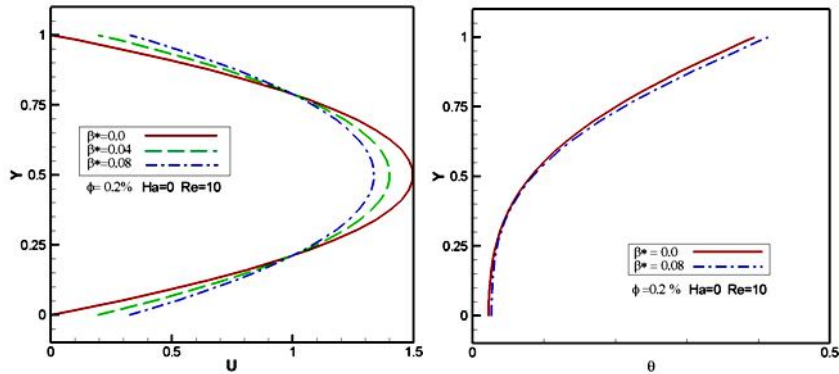
عدد ناسلت متوسط را نیز در شکل ۲-b مقایسه نمودیم. در هر دو شکل مذکور به تطابق زیادی در نتایج دست پیدا کردیم.



شکل ۲-b. مقایسه تغییرات عدد ناسلت پژوهش حاضر در مقایسه با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۱۷]، در طول دیواره ی میکرو کانال در اعداد هارتمن مختلف برای $Re=100$ و $\phi=0.02$

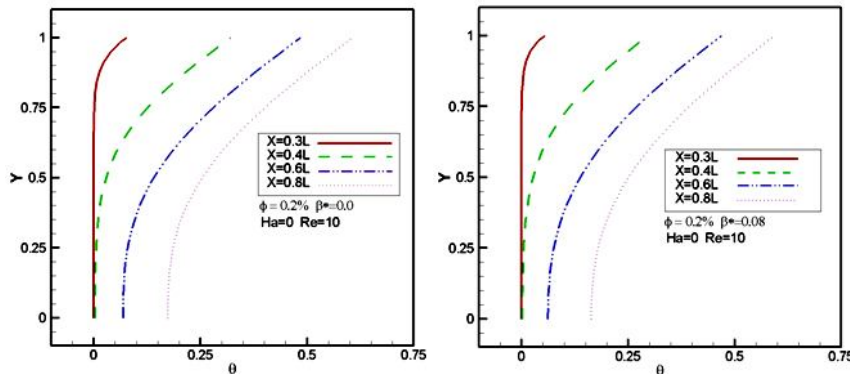
۴-۲ بررسی اثرات ضریب لغزشی بدون بعد (β^*)

شکل ۳، پروفیل سرعت و دمای نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی میکرو کانال ($x = \frac{L}{2}$) در $0.2\% \phi$ و $Ha=0$ و $Re=10$ برای مقادیر مختلف β^* را نشان می دهد.



شکل ۳، پروفیل سرعت و دمای نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی میکروکانال ($x = \frac{L}{2}$) در $\phi = 0.2\%$ و $Ha = 0$ و $Re = 10$ برای مقادیر مختلف β^*

در این شکل مشاهده می‌شود که ضریب لغزش اثرات قابل توجهی روی پروفیل سرعت می‌گذارد. همانطور که از شکل پیداست اختلاف بین مقادیر سرعت از $\beta^* = 0.0$ تا $\beta^* = 0.04$ نسبت به اختلاف از $\beta^* = 0.04$ تا $\beta^* = 0.08$ بیشتر می‌باشد. این موضوع بیانگر این واقعیت است که با افزایش ضریب لغزش اختلاف بین مقادیر سرعت کاهش می‌یابد. این واقعیت در مورد پروفیل دما هم قابل مشاهده است. پروفیل دمای بدون بعد در مقاطع مختلف میکروکانال در $\phi = 0.2\%$ و $Ha = 0$ و $Re = 10$ برای مقادیر مختلف β^* در شکل ۴ نشان داده شده است.

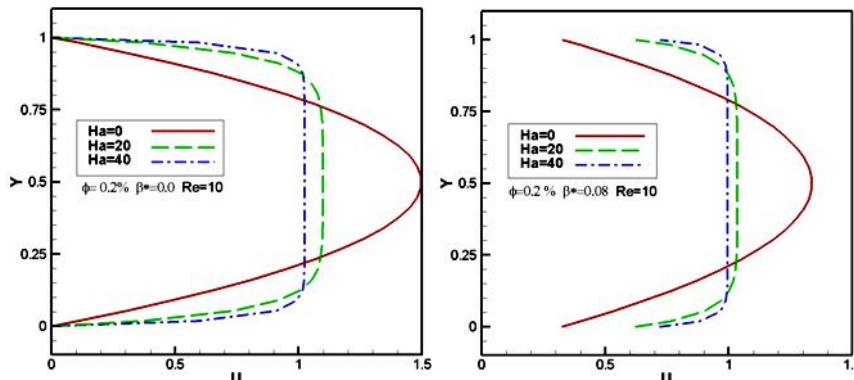


شکل ۴. پروفیل دمای بدون بعد در مقاطع مختلف میکروکانال در $\phi = 0.2\%$ و $Ha = 0$ و $Re = 10$ برای مقادیر مختلف β^*

دمای نانوسیال در طول میکروکانال در حال افزایش می‌باشد. به نحوی که در $X = 0.8L$ این دما تقریباً به دمای دیواره نزدیک می‌شود. همانطور که از شکل پیداست با افزایش ضریب لغزش تغییر ناچیزی در دمای نانوسیال ایجاد می‌شود که این تغییر منجر به کاهش دما خواهد بود.

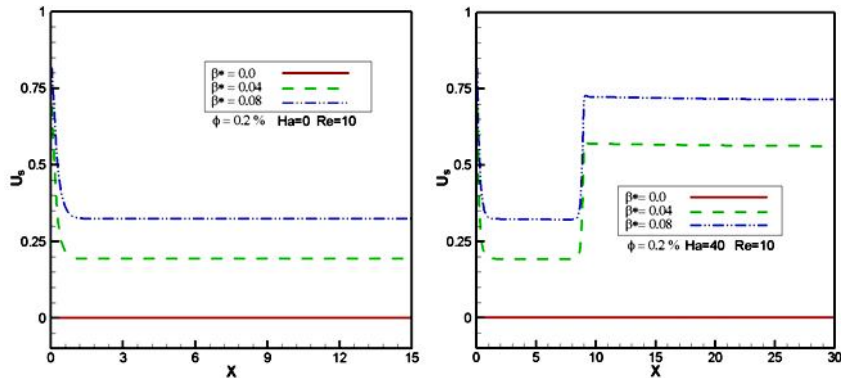
۳-۴ بررسی اثرات عدد هارتمن (Ha)

شکل ۵ نشان دهنده پروفیل سرعت افقی بی بعد روی خط مرکزی عمودی میکروکانال در $Ha = 0$ ، $Ha = 20$ و $Ha = 40$ و $\phi = 0.2\%$ و $Re = 10$ برای ضریب لغزشهای $\beta^* = 0.0$ و $\beta^* = 0.08$ می‌باشد.



شکل ۵. پروفیل سرعت افقی بی بعد روی خط مرکزی عمودی میکروکانال در هارتمن‌های مختلف، $\phi = 0.2\%$ و $Re = 10$ برای ضریب لغزشهای $\beta^* = 0.0$ و $\beta^* = 0.08$

میدان مغناطیسی B_0 اعمالی روی میکروکانال باعث ایجاد نیروی لورنتس در جهت خلاف محور X میگردد. از این رو افزایش عدد هارتمن باعث کاهش سرعت بدون بعد در مقادیر بیشینه و افزایش سرعت در نزدیکی جداره ها می شود. این واقیعت ها به خوبی در شکل ۵ در ضریب لغزش $\beta^* = 0.0$ قابل رویت می باشد. تغییرات ضریب لغزش با عدد هارتمن نتیجه جالب و قابل توجه دیگریست که در این شکل قابل مشاهده است. بر اساس این شکل میدان مغناطیسی، اثرات قابل توجهی بر روی سرعت لغزشی در دیواره ها می گذارد به نحوی که اعداد هارتمن بیشتر منتج به سرعت لغزشی زیادتر در دیواره ها می شود. این افزایش با مقایسه این شکل و شکل ۳ به وضوح قابل رویت است. شکل ۶ نشان دهنده سرعت لغزش U_s در طول دیواره میکروکانال در مقادیر مختلف β^* برای $\phi = 0.2\%$ و $Re = 10$ در هارتمن 0 و 40 می باشد.

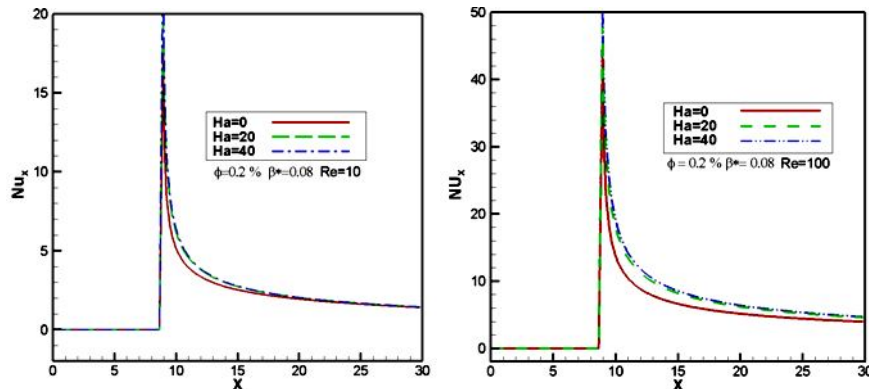


شکل ۶. سرعت لغزشی، U_s ، در امتداد دیواره ی بالایی میکروکانال در مقادیر مختلف β^* برای $\phi = 0.2\%$ و $Re = 10$ و $Ha = 0, 40$.

سرعت لغزشی از مقدار بیشینه خود در ورودی آغاز و شروع به کاهش می کند و نهایتاً به مقدار ثابتی در طول دیواره می رسد. علاوه بر این، ضریب لغزش اثرات چشمگیر خود در افزایش سرعت لغزشی را به خوبی در این شکل نشان داده است. اما این واقیعت، در اعداد هارتمن بالاتر به خوبی و وضوح می تواند مشاهده شود به نحوی که افزایش عدد هارتمن سرعت لغزشی را به طرز معنی داری افزایش می دهد و یک پرش در نمودار ایجاد می کند. این امر تاییدی بر نتایج حاصل در شکل های قبل می باشد.

۴-۴ اثرات عدد رینولدز و ϕ

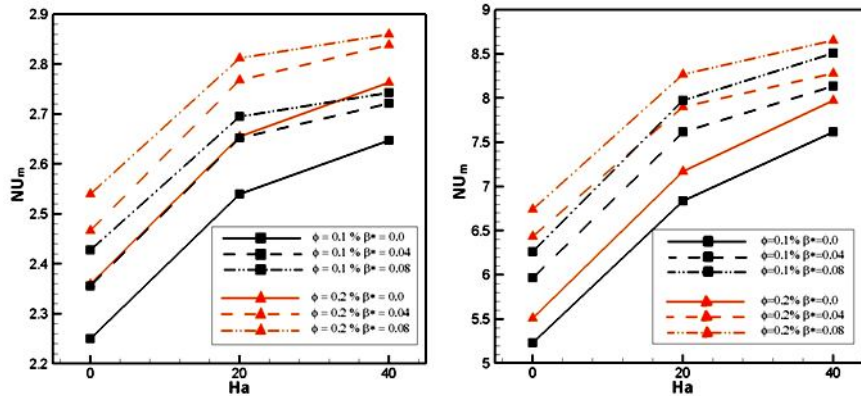
برای مطالعه بیشتر مکانیزم انتقال حرارت در میکروکانال تغییرات عدد ناسلت موضعی را نیز مورد بررسی قرار دادیم. شکل ۷ نشان دهنده تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول دیواره میکروکانال در مقادیر مختلف عدد رینولدز و هارتمن برای $\phi = 0.2\%$ و $\beta^* = 0.08$ می باشد.



شکل ۷. تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول دیواره میکروکانال در مقادیر مختلف عدد رینولدز و هارتمن برای $\phi = 0.2\%$ و $\beta^* = 0.08$ افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت از دیواره ها می شود. بنابراین در این قسمت برای عدد رینولدز علاوه بر مقدار 10، مقدار 100 نیز انتخاب شد تا نتایج مذکور را به صورت کاملاً واضح نشان دهد.

این مسئله کاملاً واضح است که عدد ناسلت در دیواره های عایق برابر صفر می باشد چون هیچگونه انتقال حرارتی در این دیواره ها وجود ندارد. بنابراین عدد ناسلت از بیشینه مقدار خود در $X=9$ شروع و سپس با شیب ملایمی شروع به کاهش می کند. این کاهش عدد ناسلت تا خروجی میکروکانال در $X=30$ ادامه دارد.

عدد ناسلت متوسط Nu_m مهمترین پارامتر موجود برای نشان دادن نرخ انتقال حرارت کلی می باشد به همین علت مقادیر Nu_m روی دیواره میکروکانال در مقادیر مختلف عدد هارتمن ϕ و β^* برای $Re=10$ و $Re=100$ در شکل ۸ ارائه شده است.



شکل ۸. مقادیر NU_m بر روی دیواره بالایی میکروکانال در مقادیر مختلف عدد هارتمن ϕ و β^* برای $Re=10$ (چپ) و $Re=100$ (راست) اثرات متفاوت عدد رینولدز β^* ، هارتمن و ϕ بر روی NU_m در شکل قابل مشاهده است. با افزایش ضریب لغزش β^* در $Ha=0$ می توان تغییرات شدیدتری را نسبت به هارتمن های بالاتر مشاهده کرد. این بدین معنی است که با افزایش عدد هارتمن افزایش ضریب لغزش تاثیر چندان زیادی روی NU_m ندارد. به بیان دیگر اثر عدد هارتمن نسبت به ضریب لغزش در NU_m چشمگیرتر و شدیدتر می باشد. همچنین تاثیر مثبت اثرات عدد Re و ϕ بر روی NU_m به راحتی در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

۵. نتیجه گیری

هر انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال FMWNT تحت اثر میدان مغناطیسی و شار حرارتی ثابت عمودی بررسی شده سرعت لغزشی به عنوان شرط مرزی بر روی دیواره ی میکروکانال استفاده خواهد شد. در پژوهش حاضر عدد هارتمن بر اساس خواص سیال تعریف شد تا با تعریف Pr و Re همبستگی داشته باشد بنابراین آخرین عبارت در سمت راست معادله ی (۲) اضافه شده است.

میدان مغناطیسی موجود منجر به تولید نیروی لورنتس در خلاف جهت محور X می گردد از این رو افزایش عدد هارتمن منجر به کاهش مقدار بیشینه سرعت در خط مرکزی میکروکانال و افزایش سرعت در نزدیکی دیواره می شود. در نتیجه پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته با عدد هارتمن تغییر می کند. علاوه بر این دمای نانوسیال نیز در طول میکروکانال افزایش می یابد تا در $X=0.8L$ تقریباً به دمای دیواره نزدیک می شود. اثرات عدد هارتمن بر روی سرعت لغزشی نانوسیال در طول میکروکانال برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که سرعت لغزشی از مقدار بیشینه ی خود در ورودی میکروکانال شروع به کاهش می کند و نهایتاً به مقدار ثابتی در روی دیواره می رسد. همچنین مشاهده شده که اعداد هارتمن بالاتر اثر شدیدتر و اثربخش تری بر روی افزایش سرعت لغزشی خواهند داشت.

ضریب لغزشی β^* بالاتر اثر مثبتی بر روی سرعت لغزشی U_s خواهد داشت. این اثر در هارتمن های بالاتر دارای شدت بیشتری می باشد و بهتر قابل مشاهده است. افزایش عدد هارتمن می تواند نرخ انتقال حرارت را نیز افزایش دهد. در نتیجه افزایش عدد هارتمن، عدد رینولدز و ϕ منجر به افزایش عدد ناسلت متوسط NU_m می گردد. با این حال اثرات عدد هارتمن و ϕ در رینولدزهای بالاتر بهتر مشاهده می گردد.

۶. مراجع

- 1.Saidur, R. and Leong, K.Y and Mohammad, H.A (2011), "A review on applications and challenges of nanofluids", Renewable and Sustainable Energy Reviews, **15**, pp 1646-1668.
2. Khanafer, K. and Vafai, K. (2012), "A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, **54**, pp 4410-442.
- 3.Mangrulkar, C. K. and Kriplani, V. M. (2013), "Nanofluid Heat Transfer-A Review", International Journal of Engineering and Technology, **54**, pp 1710-1714.
- 4.Tahir, S. and Mital, M. (2012), "Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel", Applied Thermal Engineering, **39**, pp 8-14.
- 5.Ahmed, M.A. and Shuaib, N.H. and Yusoff, M.Z. and Al-Falahi, A.H. (2011), "Numerical investigations of flow and heat transfer enhancement in a corrugated channel using nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, **38**, pp 1368-1375.



6. Ahmed, M.A. and Shuaib, N.H. and Yusoff, M.Z. (2012), "Numerical investigations on the heat transfer enhancement in a wavy channel using nanofluid", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, pp 5891-5898.
7. Tullius, J.F. and Vajtai, R. and Bayazitoglu, Y. (2011), "A review of cooling in microchannels", *Heat Transfer Engineering*, **32**, pp 527-541.
8. Choi, S.U.S (1995) "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles", *ASME Fluids Engineering Division*, **231**, pp 99-105.
9. Goodarzi, M. and Safaei, M.R. and Karimipour, A. and Hooman, K. and Dahari, M. and Kazi, S.N. and Sadeghinezhad, E. (2014) "Comparison of the Finite Volume and Lattice Boltzmann Methods for Solving Natural Convection Heat Transfer Problems inside Cavities and Enclosures", *Abstract and Applied Analysis*, **2014**, pp 1-15.
10. Karimipour, A. and Afrand, M. and Akbari, M. and Safaei, M.R. (2012) "Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in the Inclined Enclosure", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **61**, pp 435-440.
11. Bird, G. (1994) "Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows", Oxford.
12. Karimipour, A. and Nezhad, A.H. and D'Orazio, A. and Shirani, E. (2013) "The effects of inclination angle and Prandtl number on the mixed convection in the inclined lid driven cavity using lattice Boltzmann method", *J. Theoret. Appl. Mech*, **51**, pp 447-462.
13. Karimipour, A. and Nezhad, A.H. and D'Orazio, A. and Shirani, E. (2012) "Investigation of the gravity effects on the mixed convection heat transfer in a microchannel using lattice Boltzmann method", *Int. J. Therm. Scie.*, **54**, pp 142-152.
14. Raisi, A. and Ghasemi, B. and Aminossadati, S.M. (2011) "A numerical study on the forced convection of laminar nanofluid in a microchannel with both slip and no-slip conditions", *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, **59**, pp 114-129.
15. Akbarinia, A. and Abdolzadeh, M. and Laur, R. (2011) "Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes", *Applied Thermal Engineering*, **31**, pp 556-565.
16. Mah, W.H. and Hung, Y.M. and Guo, N. (2012) "Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels", *Int. J. Heat Mass Transfer*, **55**, pp 4169-4182.
17. Aminossadati, S.M. and Raisi, A. and Ghasemi, B. (2011) "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel", *Int. J. Non-Linear Mecha*, **46**, pp 1373-1382.
18. Amrollahi, A. and Rashidi, A.M. (2010) "Convection heat transfer of functionalized MWNT in aqueous fluids in laminar and turbulent flow at the entrance region", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, pp 717-723.
19. Mahmoudi, A.H. and Pop, I. and Shahi, M. (2012) "Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid", *Int. J. Thermal Sciences*, **59**, pp 126-140.