



شبیه سازی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال متشکله از آب و نانو لوله کربنی FMWNT در یک ریزکانال تحت میدان مغناطیسی در رژیم جریان لغزشی

عبدالمجید تقی پور^۱ و آرش کریمی پور^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران.
^۲ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، اصفهان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۹/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۳/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۲۰

چکیده

جابجایی انتقال حرارت، جابجایی اجباری نانوسیال تشکیل شده از آب و نانو ذرات FMWNT در ریزکانال دو بعدی به صورت عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. دیواره پایینی ریزکانال، کاملاً عایق و دیواره بالایی فقط در قسمت ورودی عایق حرارتی است و مابقی آن نیز تحت تاثیر شار حرارتی ثابت q_0 است. همچنین میدان مغناطیسی با قدرت ثابت B_0 روی آن اعمال می‌شود. شرط مرزی سرعت لغزشی، در طول دیواره‌های ریزکانال در نظر گرفته می‌شود. معادلات ناویر-استوکس گسسته‌سازی شده، سپس به کمک کد کامپیوتری به صورت عددی حل می‌شوند. نتایج در قالب پروفیل‌های سرعت، دما و عدد ناسلت ارائه می‌شوند. در کار حاضر، اثر میدان مغناطیسی بر سرعت لغزشی سیال مجاور دیوار ریزکانال برای نخستین بار بررسی می‌شود. همچنین استفاده از نانوسیال متشکله از آب و نانو لوله کربنی (FMWNT) به عنوان سیال عامل در ریزکانال، از جمله دیگر دستاوردهای پژوهش حاضر است. مشاهده گردید که افزایش قدرت میدان مغناطیسی، منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار سرعت لغزشی می‌شود.

کلمات کلیدی: نانو لوله‌های کربنی، ریزکانال، انتقال حرارت، سرعت لغزشی، میدان مغناطیسی.

Simulation of the convective heat transfer in a nanofluid composed of water and FMWNT carbon nanotubes in a microchannel subjected to a magnetic field in the slip flow regime

A.M. Taghipour¹ and Arash Karimipour^{2,*}

¹ M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran.

² Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Isfahan, Iran.

Abstract

The forced convective heat transfer of a nanofluid composed of water and FMWNT nano-particles in a two-dimensional microchannel was numerically investigated. The bottom wall of the microchannel was fully insulated. The upper wall was insulated only at the entrance, the rest of the upper wall was subjected to a constant heat flux of q_0 . A constant magnetic field with a strength of B_0 was also applied on it. The slip velocity boundary condition was considered along the walls of the microchannel. Navier-Stokes equations were discretized and then solved numerically using a computer code. Results were presented in the form of velocity profiles, temperature, and the Nusselt number. In the present work, the effect of magnetic field on the slip velocity of the fluid adjacent to the microchannel wall was studied for the first time. The use of a nanofluid composed of water and carbon nanotubes (FMWNT), as the working fluid in a microchannel, could be another novelty of the present study. It was seen that stronger magnetic field corresponded to more amount of slip velocity.

Keywords: Carbon Nanotubes; Microchannel; heat transfer; slip velocity; magnetic field.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، تحقیق روی روش‌های متفاوت افزایش انتقال حرارت، سرعت بیشتری یافته است. در همین راستا، نسل جدیدی از سیالات با پتانسیل بسیار زیاد در کاربردهای صنعتی، مورد توجه قرار گرفت که از توزیع ذرات با ابعاد نانو در سیالات معمولی حاصل می‌شوند، این دسته از سیالات، به نانو سیالات معروف هستند. اندازه ذرات مورد استفاده در نانو سیالات، از ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. این ذرات از جنس ذرات فلزی همچون، مس، نقره و یا اکسیدهای فلزی‌اند. سیالات متداولی که در انتقال حرارت استفاده می‌شوند، معمولاً ضریب هدایت حرارتی پائینی دارند؛ ولی ذرات نانو به دلیل بالا بودن ضریب هدایتی با توزیع در سیال پایه، سبب افزایش ضریب هدایت حرارتی مخلوط سیال می‌گردند؛ لذا استفاده از نانوسیال، گزینه مناسبی برای افزایش انتقال حرارت به شمار می‌رود [۱ و ۲].

افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال، فراتر از تصویری است که از یک رابطه مرسوم قابل پیش بینی باشد. با استفاده از تغییراتی در هندسه جریان، شرایط مرزی و یا افزایش رسانایی حرارتی سیال، می‌توان ضریب انتقال حرارت را افزایش داد [۳]. در تعداد زیادی از پژوهش‌ها، به بررسی انتقال حرارت در شکل‌های هندسی متفاوت و بررسی اثرات عوامل خارجی بر این انتقال پرداخته شده است؛ از آن جمله، تهیر^۱ و همکاران، در پژوهشی به بررسی انتقال حرارت در کانال با مقطع دایره‌ای پرداخته‌اند [۴]. بررسی انتقال حرارت در کانال با مقاطع هندسی گوناگون، تاکنون در مراجع مختلفی گزارش شده است [۵ و ۶].

بررسی ضرایب انتقال حرارت هدایتی ذرات در مقیاس نانو و پراکندگی آن در مایع در ریزکانال‌ها، دارای اهمیت زیادی است. سیستم‌های خنک کننده، یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های کارخانه‌ها و صنایعی است که به نوعی با انتقال حرارت روبه‌رو هستند. در این شرایط، استفاده از سیستم‌های خنک کننده پیشرفته و بهینه، کاری اجتناب‌ناپذیر است. تولیسی^۲ و همکاران [۷]، در پژوهشی به بررسی اثرات خنک

کنندگی ریزکانال‌ها در شکل‌ها و سیالات مختلف پرداختند. رایج ترین سیالات مورد استفاده در ریزکانال‌ها، هوا و آب بودند که میزان انتقال حرارت هدایتی این سیالات نیز، بسیار ناچیز است. از طرفی بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال حرارت موجود، در بیشتر مواقع به وسیله افزایش سطح آن‌ها صورت می‌گیرد که همواره سبب افزایش حجم و اندازه این دستگاه‌ها می‌شود؛ لذا برای غلبه بر این مشکل، به خنک کننده‌های جدید و مؤثر نیاز است و نانو سیالات، به عنوان راهکاری جدید در این زمینه مطرح شدند [۸].

در راستای بررسی انتقال حرارت ریزکانال‌ها، مدل‌های مختلفی مورد بررسی و پژوهش قرار گرفتند [۹-۱۱]. همچنین اثرات هندسه ریزکانال، عدد رینولدز، کسر حجمی و ... بر عملکرد حرارتی ریزکانال نیز، مورد تحقیق قرار گرفته است [۱۲-۱۴]. در کل به نظر می‌رسد ریزکانال‌هایی که توسط نانوسیالات خنک کاری می‌شوند، عملکرد بهتری در مقابله با افزایش بار حرارتی تولیدی توسط دستگاه‌های الکترونیکی کوچک خواهند داشت [۱۵-۱۸].

اثرات سطح در مقیاس میکرو، تاثیرات بسیار چشمگیرتری نسبت به مقیاس ماکرو (متریک) دارند. به عنوان مثال، شرط عدم لغزش که در مقیاس ماکرو به وفور به کار می‌رود، در ریزکانال‌ها دیگر صادق نبوده، باید از شرط مرزی لغزشی در امتداد دیوارها استفاده شود؛ همچنین در مقیاس‌های میکرو و نانو باید از روش‌های خاصی که مبنای ذره‌ای داشته باشند مثل، روش شبکه بولتزمن یا دینامیک مولکولی استفاده نمود [۱۹-۲۳]. ریسیسی^۳ و همکاران [۲۴] به صورت عددی به بررسی انتقال حرارت در ریزکانال تحت شرایط مرزی وجود و عدم وجود سرعت لغزشی پرداختند. ایشان همچنین اثر استفاده از نانو سیال در نرخ انتقال حرارت از ریزکانال را در رژیم جریان لغزشی گزارش کردند. تاکنون پژوهش‌های زیادی در زمینه انتقال حرارت نانوسیالات در ریزکانال‌ها تحت شرایط مرزی مختلفی نظیر، دما ثابت یا شار ثابت ارائه شده است، که بعضاً شرط مرزی سرعت لغزشی نیز را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۲۵-۲۹].

¹Tahir
²Tullius

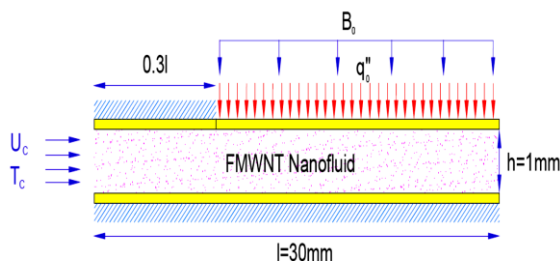
³ Raisi

مخلوط نانوسیال سرد متشکله از آب و ذرات نانو لوله کربنی FMWNT پس از ورود به ریزکانال تحت تاثیر شار ورودی گرم شده، در نهایت از طرف دیگر آن خارج می‌شود. دمای نانوسیال در ورودی ریزکانال Tc است. خواص ترموفیزیکی FMWNT در جدول ۱ ارائه می‌شود.

با توجه به مقادیر بسیار اندک کسر حجمی ذرات نانو، نانوسیال به عنوان سیال نیوتنی در نظر گرفته می‌شود. جریان سیال، آرام و غیر قابل تراکم فرض می‌شود. در مطالعه حاضر، به جهت تسهیل فرآیند حل عددی، نانوسیال به عنوان مخلوطی تک فاز و همگن در نظر گرفته می‌شود، به نحوی که توزیع حجمی نانو ذرات در طی روند حل کاملا یکنواخت است.

به جهت بررسی تمام ابعاد مسئله و بررسی اثرگذاری پارامترهای گوناگون بر حل عددی اثر تغییر پارامترهای مختلفی نظیر، کسر حجمی ذرات نانو، عدد رینولدز، ضریب لغزش بی بعد و عدد هارتمن بر خواص حرکتی و حرارتی جریان سیال بررسی می‌شود.

در خصوص کسر حجمی به دلیل اینکه در کار تجربی انجام شده، حداکثر درصد وزنی نانو ذرات ۰/۲۵ است، مناسب ترین محدوده را (0.1%, 0.2%) در نظر گرفتیم، عدد رینولدز را نیز در محدوده‌ای انتخاب کردیم که شرایط فیزیکی مساله را مختل نکند (Re=10,100)، درباره میزان عدد هارتمن هم، از آنجایی که افزایش عدد هارتمن در مقادیری بیش از عدد ۴۰، تقریباً اثر بخشی خاصی ندارد، لذا محدوده مناسب این عدد را نیز در Ha=0,20,40 یافتیم. به جهت بررسی لغزش‌های مختلف نیز محدوده (β*=0,0.04,0.08) را برای ضریب لغزش انتخاب شد.



شکل ۱- شماتیک ریزکانال مفروض

در سالهای اخیر بررسی جریان و انتقال حرارت در مقاطع مختلفی در ابعاد ماکرو که تحت اثر میدان مغناطیسی قرار دارند، از جمله موضوعات مورد علاقه محققان بوده است. در این حالت تحت تاثیر این میدان مغناطیسی نیرویی به نام نیروی لورنتس دامنه جریان را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد [۳۰-۳۳]. امین الساداتی^۱ و همکاران [۳۴] در پژوهشی اثرات میدان مغناطیسی بر ریزکانال تحت شار، ثابت را مورد مطالعه قرار دادند، البته در کار ایشان از اثرات سرعت لغزشی در امتداد دیوارهای ریزکانال صرف نظر شده است.

مشاهده شد که در زمینه بررسی جریان و انتقال حرارت در ریزکانال‌ها تحت تاثیر میدان مغناطیسی (MHD flow) تاکنون پژوهش‌ها به نحوی انجام گرفته که در تمامی آن‌ها شرط مرزی مهم سرعت لغزشی، نادیده گرفته شده است و پژوهش جامعی گزارش نشده است که در آن به اثرات میدان مغناطیسی، شرط مرزی سرعت لغزشی و انتقال حرارت اجباری به طور همزمان پرداخته شود؛ لذا در کار حاضر همه-ی این شرایط به طور همزمان در نظر گرفته شده، سعی می‌شود تا اثر میدان مغناطیسی بر میزان سرعت لغزشی مولکول‌های سیال مجاور دیواره، برای اولین بار مورد مطالعه قرار گیرد. همچنین در پژوهش حاضر، از ترکیب جدیدی به عنوان نانوسیال کاری استفاده می‌شود که حاصل از اختلاط آب (به عنوان سیال پایه) و ذرات نانو لوله کربنی FMWNT به عنوان ذرات نانو معلق در آن، است.

۲- بیان مسأله

در شکل ۱، شماتیک ریزکانال مفروض نشان داده می‌شود. عرض و طول ریزکانال به ترتیب، $h=1\text{mm}$ و $l=30\text{mm}$ هستند؛ بنابراین ارتفاع و طول بدون بعد نیز به ترتیب برابر $H=h/h=1$ و $L=l/h=30$ خواهند بود. ریزکانال به دو قسمت مجزا تقسیم می‌شود: در قسمت اول که شامل ورودی آن است، هر دو دیوار بالا و پایین عایق هستند. در قسمت دوم، دیوار فوقانی تحت تاثیر شار حرارتی ثابت q_0'' و میدان مغناطیسی یکنواخت با قدرت B_0 قرار دارد. شرط مرزی سرعت لغزشی در طول دیوارهای ریزکانال در نظر گرفته می‌شود.

^۱Aminossadati

۳-۱- شرایط مرزی

واضح است که در سطح ماکروسکوپیک، باید شرط مرزی عدم لغزش مورد استفاده قرار گیرد؛ ولی در رژیم جریان لغزشی داخل ریزکانال باید از شرط مرزی لغزشی استفاده کرد که بیانگر وجود لغزش (وجود سرعت لغزشی)، در ذرات سیال واقع روی دیوار ریزکانال است. مقدار سرعت لغزشی از رابطه (۱۰) قابل تخمین است:

$$u_s = \pm \beta \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0, h} \quad (10)$$

که β نشان‌دهنده ضریب لغزش است. فرم بدون بعد معادله (۱۰) روی دیوار به صورت رابطه (۱۱) قابل بیان است:

$$U_s = \pm \beta^* \left(\frac{\partial U}{\partial Y} \right)_{Y=0, 1} \quad (11)$$

که $\beta^* = \frac{\beta}{h}$ ضریب لغزشی بدون بعد نامیده می‌شود. سایر شرایط مرزی بی‌بعد نیز، به صورت زیر هستند:

$$\begin{aligned} U = 1, V = 0, \theta = 0 \quad X = 0, \quad 0 \leq Y \leq 1 \\ V = 0, \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad X = 30, \quad 0 \leq Y \leq 1 \\ V = 0, U = U_s, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad Y = 0, \quad 0 \leq X \leq 30 \quad (12) \\ V = 0, U = U_s, \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{یا} \quad \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{k_f}{k_{nf}} \quad Y = 1, 0 \leq X \leq 30 \end{aligned}$$

معادلات (۵) تا (۸)، تحت شرایط مرزی مذکور و با استفاده از الگوریتم SIMPLE و به کمک یک کد کامپیوتری به زبان فورتن به صورت عددی حل می‌شوند. عدد ناسلت محلی عبارتست از:

$$Nu_x]_{y=0, h} = \frac{q_0'' h}{(T_s(x) - T_c) k_{eff}} \quad (13)$$

که $T_s(x)$ دمای سطح دیوار ریزکانال است. شکل بی‌بعد رابطه فوق نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$Nu_x(X) = \frac{1}{\theta_s(X)} \quad (14)$$

عدد ناسلت متوسط هم با انتگرال گیری در طول دیوار شار ثابت به صورت رابطه (۱۵) قابل بیان است:

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x(X) dx \quad (15)$$

۴- نتایج و بحث

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تشکیل شده از آب و ذرات نانولوله کربنی FMWNT، در ریزکانال دو بعدی به صورت عددی بررسی می‌شود. ریزکانال مطابق شکل ۱، تحت تاثیر همزمان میدان مغناطیسی یکنواخت به قدرت B_0 و شار حرارتی ثابت q_0'' ، قرار دارد.

جدول ۱- نتایج تجربی برای خواص ترموفیزیکی نانو سیال

FMWNT در دمای 33°C از مرجع [۳۵]

* ظرفیت گرمایی این نانوسیال تقریباً برابر با ظرفیت گرمایی آب است.

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

۳- فرمول‌بندی

شکل دو بعدی معادلات ناویر استوکس (پیوستگی، مومنوم و انرژی) با در نظرگیری اثر یک میدان مغناطیسی به قدرت B_0 به صورت زیر است:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial x} + \theta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\sigma_{nf} B_0^2}{\rho_{nf}} \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial p}{\partial y} + \theta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_{nf} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

در رابطه (۲)، پارامتر σ_{nf} بیانگر هدایت الکتریکی است که مقدار آن 4.99×10^{-2} S/cm است. لازم است روابط (۱) تا (۴)، به شکل بی‌بعد نوشته شوند. در این صورت خواهیم داشت:

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (5)$$

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial X} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right) - \frac{Ha^2}{Re} U \quad (6)$$

$$U \frac{\partial V}{\partial X} + V \frac{\partial V}{\partial Y} = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right) \quad (7)$$

$$U \frac{\partial \theta}{\partial X} + V \frac{\partial \theta}{\partial Y} = \frac{1}{Pr \cdot Re} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) \quad (8)$$

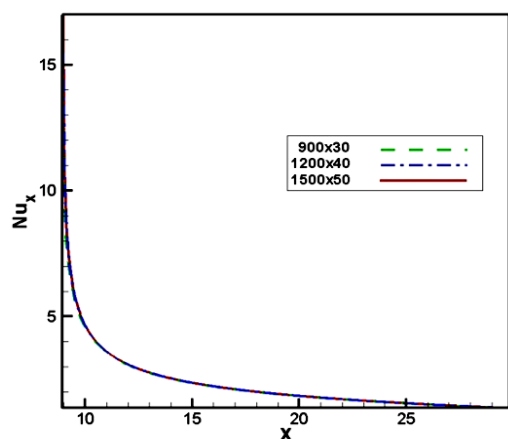
در روابط فوق، اعداد بی بعد همگی برحسب خواص نانوسیال تعریف شده‌اند، به این معنی که: $Re = \frac{\rho_{nf} u_c h}{\mu_{nf}}$

و $Pr = \frac{\nu_{nf}}{\alpha_{nf}}$ و $Ha = B_0 h \left(\frac{\sigma_{nf}}{\mu_{nf}} \right)^{0.5}$ همچنین در معادلات

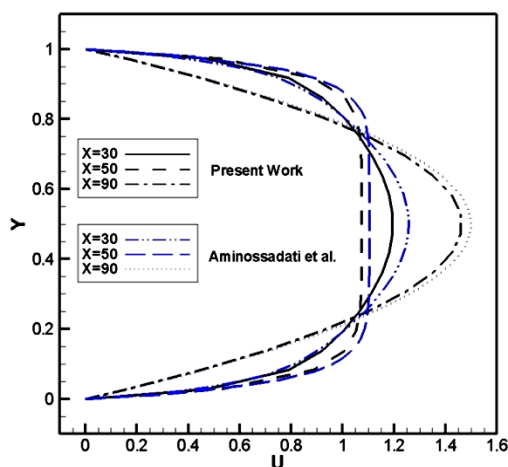
(۸) تا (۸) پارامترهای بدون بعد زیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند:

$$\begin{aligned} X = \frac{x}{h}, Y = \frac{y}{h}, U = \frac{u}{u_c}, V = \frac{v}{u_c}, P = \frac{p}{\rho_{nf} u_c^2}, \theta = \\ \frac{T - T_c}{\Delta T}, \Delta T = \frac{q_0'' h}{k_{nf}} \quad (9) \end{aligned}$$

ریزکانال تحت شار حرارتی و میدان مغناطیسی ثابت، بررسی شده است. همچنین قسمت‌های ابتدایی و انتهایی ریزکانال نیز عایق و از سرعت لغزشی صرف‌نظر شده است. در شکل ۳- الف پروفیل سرعت افقی در مقاطع مختلف از طول ریزکانال ترسیم و تطابق خوبی نیز بین نتایج مشاهده می‌شود.



شکل ۲- تغییرات عدد ناسلت در طول دیوار ریزکانال برای $\beta^*=0.04$ و $Re=10, Ha=0, \phi=0.1\%$ در شبکه‌های مختلف



شکل ۳- الف- پروفیل سرعت افقی پژوهش حاضر در مقایسه با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۳۴]، در مقاطع مختلف ریزکانال در $Re=100, Ha=20$ و $\phi=0.02$

همچنین در شکل ۳- ب نیز، پروفیل عدد ناسلت موضعی با نتایج مرجع [۳۴] به ازای مقادیر مختلف عدد هارتمن مقایسه شد. به منظور نشان دادن مقادیر کمی خطا، در جداول ۴ و ۵ به مقایسه مقادیر سرعت و عدد ناسلت

۴-۱- استقلال شبکه و اعتبار سنجی

جدول ۲ مقادیر عدد ناسلت متوسط روی دیوار ریزکانال را در ۳ شبکه‌بندی مختلف $900 \times 30, 1200 \times 40$ و 1500×50 به ازای $\phi=0.1, 0.2\%$ و $Re=10$ نشان می‌دهد. در این حالت، عدد هارتمن و ضریب لغزش نیز به ترتیب برابر با 0 و 0.04 مفروض هستند.

جدول ۲- مقادیر عدد ناسلت متوسط در شبکه‌های مختلف برای $\beta^*=0.04$ و $Re=10, Ha=0, \phi=0.1, 0.2\%$

	900x30	1200x40	1500x50
$\phi=0.1\%$	2.359	2.355	2.353
$\phi=0.2\%$	2.469	2.466	2.464

جدول ۳، نشانگر درصد میزان اختلاف بین مقادیر عدد ناسلت در شبکه‌های مختلف است. از مقایسه نتایج در جدول ۳، می‌توان استنتاج کرد که حل مسئله بعد از توزیع مشخص در شبکه، مستقل از تعداد نقاط شبکه می‌شود؛ یعنی با افزایش تعداد گره‌ها، تغییر محسوسی در نتایج به وجود نمی‌آید. بدین ترتیب مسئله دیگر، حساسیتی به تعداد گره‌ها نشان نمی‌دهد و مستقل از شبکه می‌شود؛ شبکه 1200×40 به عنوان شبکه بهینه جهت ادامه محاسبات مناسب شناخته شد.

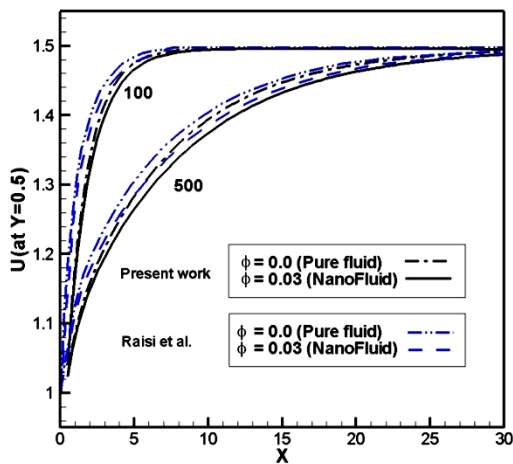
جدول ۳- درصد میزان اختلاف بین مقادیر عدد ناسلت در شبکه‌های مختلف برای $Re=10, Ha=0, \phi=0.1, 0.2\%$ و $\beta^*=0.04$

	درصد اختلاف در شبکه‌های	
	900x30 و 1200x40	1200x40 و 1500x50
$\phi=0.1\%$	0.17%	0.085%
$\phi=0.2\%$	0.12%	0.081%

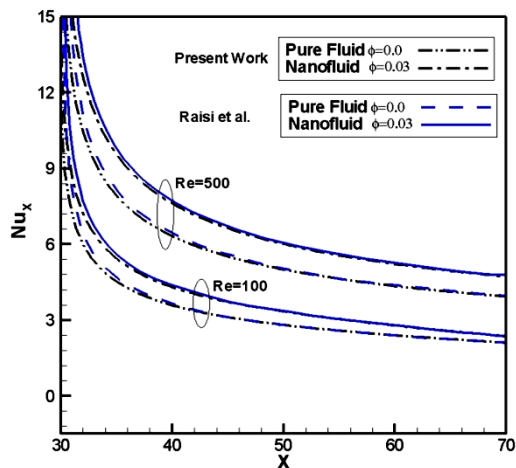
شکل ۲، تغییرات عدد ناسلت در طول دیوار ریز کانال در شبکه‌های متفاوت برای $\beta^*=0.04$ و $Re=10, Ha=0, \phi=0.1\%$ را نشان می‌دهد. این شکل، موید این امر است که با افزایش تعداد نقاط شبکه، تغییر بسیار اندکی در نتایج حاصل می‌شود.

به منظور صحت سنجی کد کامپیوتری مورد استفاده، نتایج حاصل از پژوهش حاضر، مطابق شکل ۳- الف با مقادیر متناظر حاصل از کار امین الساداتی و همکاران [۳۴] مقایسه شد. در مرجع مذکور، جریان و انتقال حرارت نانوسیال در

در ادامه در شکل ۴-الف و ۴-ب به ترتیب، تغییرات سرعت در خط مرکزی ریزکانال و تغییرات عدد ناسلت موضعی در امتداد دیوار ریزکانال به ازای مقادیر مختلف کسر حجمی و عدد رینولدز با مقادیر پژوهش ریسی و همکاران [۲۴] مقایسه شد. ایشان در کار خود جریان و انتقال حرارت نانوسیال را دو حالت مختلف رژیم لغزشی و عدم وجود لغزش مقایسه کردند. در این دو شکل نیز، انطباق خوبی بین نتایج دیده می‌شود.

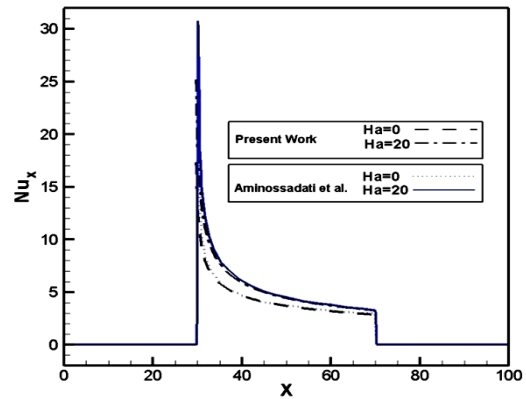


شکل ۴-الف - مقایسه تغییرات سرعت در خط مرکزی ریزکانال در مقایسه با مقادیر مشابه از پژوهش ریسی و همکاران [۲۴]، برای نانو سیال و سیال خالص در طول دیوار ریزکانال، برای مقادیر مختلف Re ، ϕ



شکل ۴-ب - مقایسه تغییرات عدد ناسلت موضعی روی دیوار ریزکانال در مقایسه با مقادیر مشابه از پژوهش ریسی و همکاران [۲۴]، برای نانو سیال و سیال خالص، برای مقادیر مختلف Re ، ϕ

پژوهش حاضر و نتایج حاصل از کار امین الساداتی و همکاران [۳۴]، پرداخته شده است.



شکل ۳-ب - مقایسه تغییرات عدد ناسلت با مقادیر حاصل از کار امین الساداتی و همکاران [۳۴]، در طول دیوار ریزکانال در اعداد هارتمن مختلف برای $Re=100$ و $\phi=0.02$

جدول ۴ - مقایسه تغییرات عدد ناسلت در طول دیوار ریزکانال پژوهش حاضر با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۳۴]

X		35	45	55	65
Ha=0	Nu	5.815	4.051	3.389	3.001
	Nu [34]	5.974	4.007	3.424	3.062
	Error %	2.7	1.1	1.1	2
Ha=20	Nu	7.668	4.978	4.008	3.452
	Nu [34]	7.869	5.103	4.081	3.495
	Error %	2.6	2.5	1.8	1.2

جدول ۵ - مقایسه تغییرات سرعت افقی در مقاطع مختلف ریزکانال پژوهش حاضر با مقادیر مشابه پژوهش امین الساداتی و همکاران [۳۴]

Y		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
X=30	U	0.831	1.001	1.115	1.176	1.202
	U [34]	0.822	1.015	1.146	1.224	1.258
	Error %	1.1	1.4	2.7	3.9	4.5
X=50	U	0.938	1.052	1.067	1.067	1.067
	U [34]	0.962	1.081	1.102	1.102	1.102
	Error %	2.5	2.7	3.2	3.2	3.2
X=90	U	0.536	0.949	1.237	1.401	1.462
	U [34]	0.542	0.963	1.265	1.436	1.500
	Error %	1.1	1.5	2.2	2.4	2.5

به جهت مقایسه بین شرایط لغزش و عدم لغزش، یکی از مقادیر ضریب لغزشی برابر صفر انتخاب شد. در این شکل، مشاهده می‌شود که افزایش ضریب لغزشی، اثرات قابل توجهی روی پروفیل سرعت داشته، منجر به کاهش سرعت بیشینه و افزایش سرعت لغزشی در مجاورت دیوارها می‌شود؛ این روند تغییرات، متضمن شرط بقای جرم و پیوستگی جریان داخل ریزکانال است. شکل ۵-الف پروفیل دمایی نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی ریزکانال $(x = \frac{L}{2})$ به ازای $\phi=0.2\%$ و $Ha=0$ را برای مقادیر مختلف β^* و اعداد رینولدز نشان می‌دهد.

از شکل پیداست که در $Re=10$ ، دمایی نانوسیال به واسطه سرعت پایین آن سریعاً افزایش می‌یابد. از این رو پروفیل دمایی بی بعد با تغییر ضریب لغزشی، تغییر چندانی از خود نشان نمی‌دهد؛ اما در مقادیر بالاتر عدد رینولدز با افزایش ضریب لغزش، شاهد افزایش دمایی بی بعد هستیم. تبادل حرارتی بیشتر در اعداد رینولدز بالاتر را می‌توان به علت وجود تنش برشی بیشتر در سیال دیوار (در اعداد رینولدز بالاتر) دانست.

پروفیل دمایی بی بعد نیز، به خوبی بودن دیوار پایین را نشان می‌دهد. افزایش دمایی سیال، تحت تاثیر شار حرارتی وارده از دیوار بالایی به خوبی در این شکل مشخص است؛ همچنین تغییر ضریب لغزشی اثر محسوس بر پروفیل دما از خود نشان نمی‌دهد.

در ادامه پروفیل دمایی بدون بعد در مقاطع مختلف ریزکانال در $\phi=0.2\%$ و $Ha=0$ برای مقادیر مختلف β^* در شکل ۶ نشان داده می‌شود.

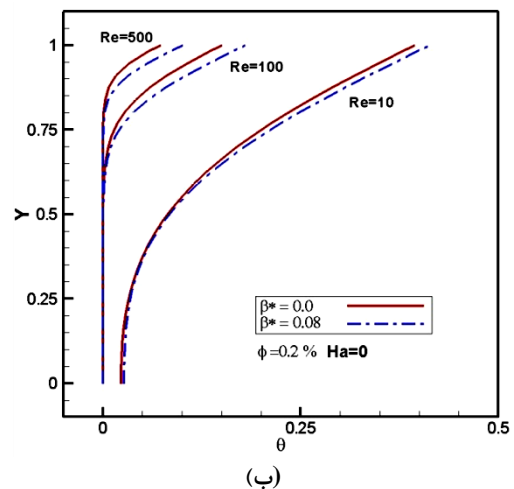
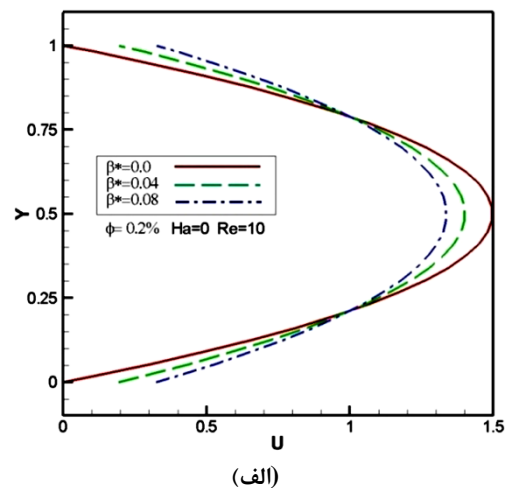
در شکل ۶، در $X=0.3L$ ، جایی که هنوز جریان به طور قابل توجه تحت تاثیر دیوار داغ بالایی قرار نگرفته، مقدار دما پایین است و دما دارای پروفیل مسطح و یکنواختی است. افزایش اندک دما در نزدیکی دیوار بالایی، به علت نفوذ و پخش حرارت در این ناحیه است.

در بخش میانی ریزکانال، $X=0.4L$ تا $X=0.6L$ ، جایی که نانوسیال تحت تاثیر انتقال حرارت از دیوار داغ است، دمایی نزدیک دیوار بالا افزایش پیدا می‌کند. در این حالت، پروفیل دما از حالت مسطح خارج شده، سهمی شکل می‌شود.

در $X=0.8L$ ، جایی که جریان به طور کامل تحت تاثیر دیوار داغ قرار گرفته است، تاثیر پذیری پروفیل دما بیشتر

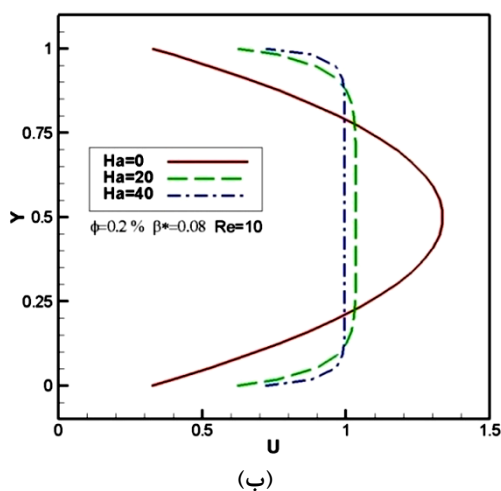
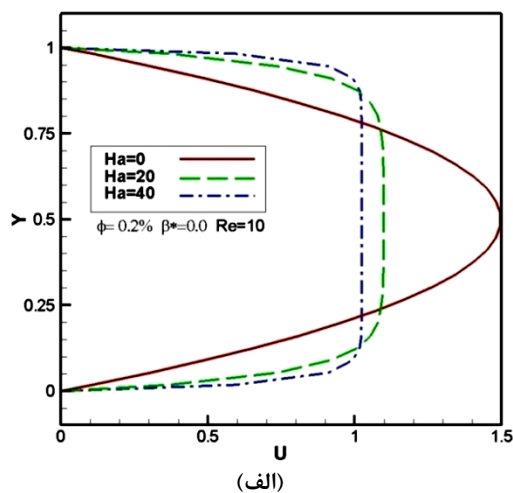
۴-۲- بررسی اثر ضریب لغزشی بی بعد (β^*)

در این قسمت، اثرات ضریب لغزشی روی عملکرد حرارتی ریزکانال، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۵-الف، پروفیل سرعت و دمایی نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی ریزکانال $(x = \frac{L}{2})$ به ازای $\phi=0.2\%$ و $Ha=0$ را برای مقادیر مختلف β^* نشان می‌دهد.



شکل ۵-الف - پروفیل سرعت نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی ریزکانال $(x = \frac{L}{2})$ به ازای $\phi=0.2\%$ و $Ha=0$ برای مقادیر مختلف β^* و ب- پروفیل دمایی نانوسیال FMWNT روی خط عمودی مرکزی ریزکانال $(x = \frac{L}{2})$ به ازای $\phi=0.2\%$ و $Ha=0$ برای مقادیر مختلف β^* و عدد رینولدز

شده، نفوذ گرما به سمت مرکز ریزکانال بهتر قابل مشاهده است. هرچه قدر نانو سیال در ریزکانال به سمت خروجی جریان می‌یابد، این افزایش و نفوذ دما به مرکز ریزکانال، بهتر قابل رویت خواهد بود.

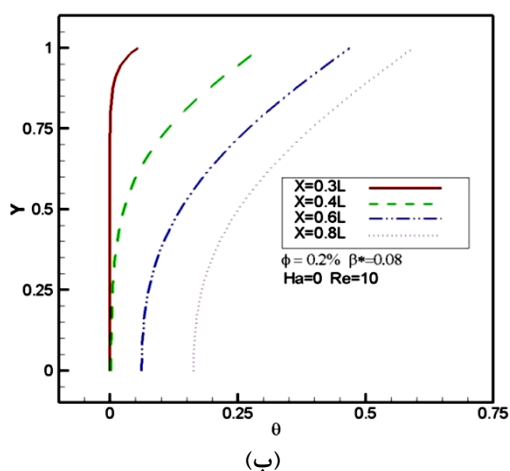
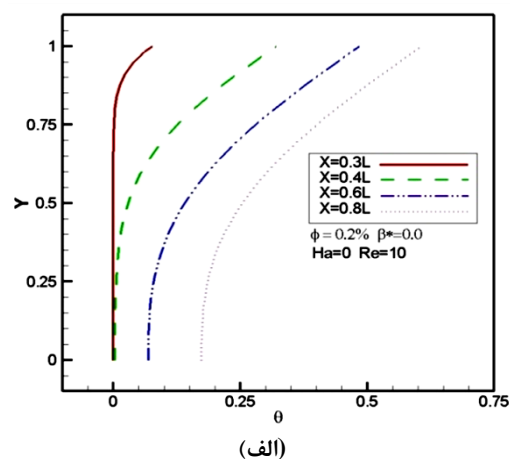


شکل ۷- پروفیل سرعت افقی بی بعد روی خط مرکزی عمودی ریزکانال در هارتمن های مختلف، $\phi=0.2\%$ و $\beta^* = 0.08$ و $\beta^* = 0.0$ برای $Re=10$

در مقایسه کیفی بین شکل ۷ و شکل ۵-الف می‌توان این نکته را دریافت که میزان کاهش سرعت بیشینه در خط مرکزی ریزکانال و افزایش سرعت در نزدیکی جداره‌ها، در زمان حضور میدان مغناطیسی نسبت زمان عدم حضور میدان ($Ha=0$) بیشتر خواهد بود.

میدان مغناطیسی B_0 اعمالی روی ریزکانال، سبب ایجاد نیروی لورنتس در جهت خلاف محور X می‌شود. از این رو افزایش عدد هارتمن، سبب کاهش سرعت بدون بعد در

شکل ۶- پروفیل دمای بدون بعد در مقاطع مختلف ریزکانال در $Re=10$ و $Ha=0$ و $\phi=0.2\%$ برای مقادیر مختلف β^*

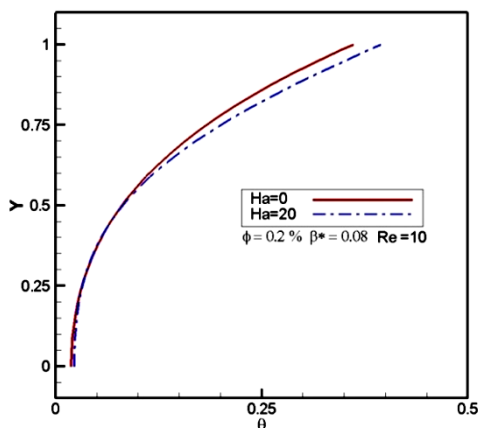
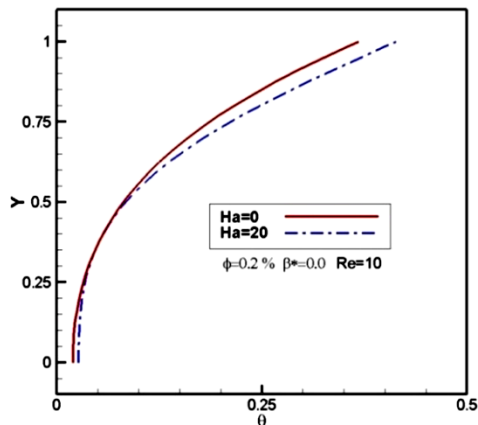


شکل ۶- پروفیل دمای بدون بعد در مقاطع مختلف ریزکانال در $Re=10$ و $Ha=0$ و $\phi=0.2\%$ برای مقادیر مختلف β^*

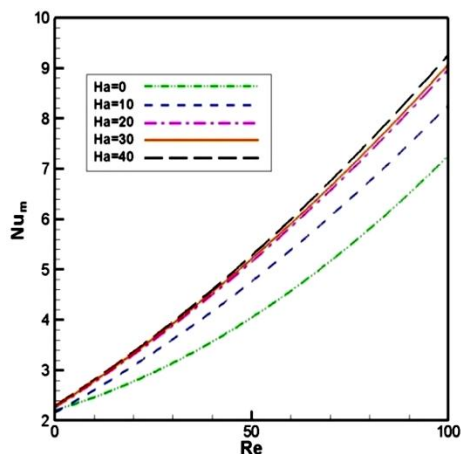
از مقایسه شکل ۶-الف و ۶-ب می‌توان این نتیجه‌گیری را کرد که ضریب لغزشی در اعداد رینولدز پایین، تاثیر چندانی بر روی پروفیل دما نخواهد گذاشت که این امر تاییدی بر شکل ۵ است.

۳-۴- بررسی اثر عدد هارتمن

شکل ۷ نشان دهنده پروفیل سرعت افقی بی بعد روی خط مرکزی عمودی ریزکانال در $Ha=0$ ، $Ha=20$ و $Ha=40$ و



شکل ۸- پروفیل های دما در خط عمودی مرکز ریز کانال در مقادیر مختلف عدد هارتمن و β^* برای $\phi=0.2\%$ و $Re=10$



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت متوسط با عدد رینولدز در اعداد هارتمن مختلف، $\phi=0.2\%$ و $\beta^* = 0.04$.

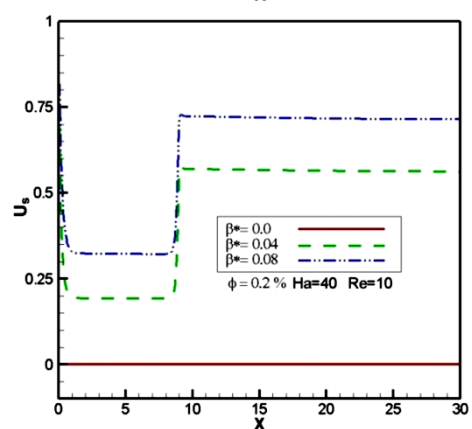
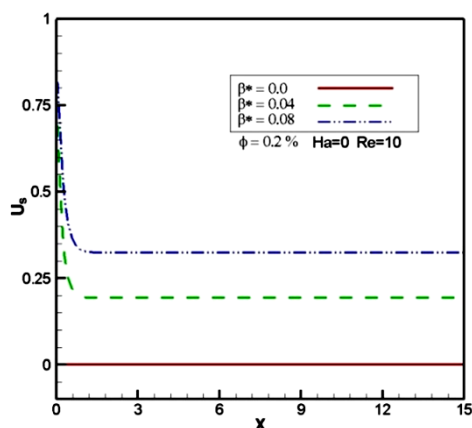
مقادیر بیشینه و افزایش سرعت در نزدیکی جداره‌ها می‌شود. اثر تغییر عدد هارتمن بر پروفیل سرعت، بویژه بر سرعت لغزشی مجاور دیوار، از دیگر نتایج جالب توجه این شکل است. در نمودار مربوط به $\beta^* = 0.08$ در این شکل بخوبی می‌توان دید، افزایش Ha منتج به سرعت لغزشی زیادتری روی دیوار ($Y=0$) می‌شود. علت ایجاد سرعت لغزشی زیادتر در این حالت نسبت به شکل ۵-الف، اثرگذاری همزمان دو پارامتر است؛ یکی میدان مغناطیسی که با ایجاد نیروی لورنتس سرعت را کاهش می‌دهد و دیگری اثرگذاری ضریب لغزشی است (در شکل ۵ بحث شد).

پروفیل‌های دما در خط عمودی مرکز ریز کانال، به منظور نشان دادن اثر عدد هارتمن بر دامنه گرمایی جریان در مقادیر مختلف عدد هارتمن برای $\phi=0.2\%$ و $Re=10$ و ضرایب لغزش $\beta^* = 0.0$ و $\beta^* = 0.08$ در شکل ۷ نشان داده می‌شوند.

در شکل ۸ و علی‌رغم شکل ۷، در نمودارهای $\beta^* = 0.0$ و $\beta^* = 0.08$ اثرات ضریب لغزش ناچیز، ولی در عین حال اثرات عدد هارتمن چشمگیر است؛ به این معنی که مقدار زیادتر Ha افزایش دمای سیال می‌شود؛ اگرچه مقدار این افزایش، زیاد قابل توجه نیست.

همان‌طور که پیشتر اشاره شد، اعمال میدان مغناطیسی، منجر به کاهش سرعت می‌شود، لذا با کاهش سرعت، نانو سیال فرصت بیشتری جهت تبادل حرارت پیدا می‌کند. از این رو علت اثر گذاری عدد هارتمن بر پروفیل دمایی را می‌توان در این پدیده دانست.

شکل ۹، نشان دهنده تغییرات عدد ناسلت متوسط با تغییر اعداد هارتمن و رینولدز است. نتایج نشان می‌دهند که در هر عدد هارتمن ثابت، مقدار عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز، افزایش می‌یابد. این افزایش در اعداد رینولدز بالاتر، قابل ملاحظه‌تر است. نتایج همچنان بیانگر این واقعیت هم هستند که در عدد رینولدز ثابت، میزان نرخ انتقال حرارت با افزایش عدد هارتمن افزایش می‌یابد. اثرات عدد هارتمن روی افزایش عدد ناسلت متوسط، در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است.



شکل ۱۰- سرعت لغزشی، U_s ، در امتداد دیوار بالایی ریزکانال در مقادیر مختلف β^* برای $\phi=0.2\%$ ، $Re=10$ و $Ha=0,40$.

۴-۴- بررسی اثر عدد رینولدز و کسر حجمی نانو لوله-های کربنی

در ادامه، تغییرات عدد ناسلت موضعی به منظور مطالعه بیشتر مکانیزم انتقال حرارت در ریزکانال مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۱، نشان دهنده تغییرات Nu_x در طول دیوار ریزکانال در مقادیر مختلف عدد رینولدز و هارتمن برای $\phi=0.2\%$ و $\beta^*=0.08$ است.

مشاهده می‌شود که افزایش عدد رینولدز، به طور قابل توجهی منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت از دیوارها می‌شود. البته با توجه به اینکه مقدار عدد رینولدز نانوسیال جاری در ریزکانال معمولاً عدد کوچکی است؛ لذا این روش جهت افزایش نرخ انتقال حرارت هزینه‌بر بوده، توصیه نمی‌شود. در کار حاضر نیز قسمت اعظم نتایج مربوط به $Re=10$

جدول ۶ اطلاعات مفید و قابل توجهی در خصوص افزایش عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد هارتمن به دست می‌دهد. نتایج در اعداد رینولدز مختلف ارائه شده‌اند. همانطور که اشاره شد، نتایج جدول ۶ نشان می‌دهند، دفع حرارت از دیواره میکروکانال با افزایش عدد رینولدز، افزایش قابل توجهی می‌یابد. دلیل این افزایش نرخ انتقال حرارت در اعداد رینولدز و هارتمن بالاتر را می‌توان در این امر یافت که، سرعت جریان در اعداد رینولدز بالاتر در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال، بیشتر است که در آنجا نیز ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتر خواهد بود.

جدول ۶- مقادیر عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز و

هارتمن مختلف، $\phi=0.2\%$ و $\beta^*=0.04$

	Ha=0	Ha=10	Ha=20	Ha=30	Ha=40
Re=10	2.466	2.609	2.768	2.791	2.812
Re=50	5.047	5.764	6.157	6.216	6.281
Re=100	6.262	7.264	7.973	8.075	8.267

شکل ۱۰ نشان دهنده سرعت لغزش U_s در طول دیواره ریزکانال در مقادیر مختلف β^* برای $\phi=0.2\%$ و $Re=10$ در $Ha=0,40$ است. سرعت لغزشی از مقدار بیشینه خود در ورودی آغاز و با افزایش x شروع به کاهش می‌کند و پس از رسیدن به حالت توسعه یافتگی جریان، نهایتاً به مقدار ثابتی در طول دیواره میل می‌کند. علاوه بر این، ضریب لغزش اثرات چشمگیر خود در افزایش سرعت لغزشی را به خوبی در این شکل نشان می‌دهد. نمودار مربوط به $Ha=40$ ، دربرگیرنده نتایج جالبی است. به این معنی که به محض ورود جریان به منطقه تحت نفوذ میدان مغناطیسی، مقدار سرعت لغزشی به طور چشمگیری افزایش پیدا می‌کند؛ به عنوان مثال، مقدار سرعت لغزشی از $U_s=0.33$ به ازای $\beta^*=0.08$ ، به مقدار $U_s=0.72$ می‌رسد. این امر، تاییدی بر نتایج حاصل در شکل-های قبل نیز است.

در شکل ۵، اثرات ضریب لغزش در نبود میدان مغناطیسی و در شکل ۷، اثرات ضریب لغزش در حضور میدان مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه شکل ۱۰ و مقادیر سرعت لغزشی به تطابق معنی دار و تایید کننده‌ای بین نتایج شکل ۱۰ و شکل‌های ۵ و ۷ خواهیم رسید.

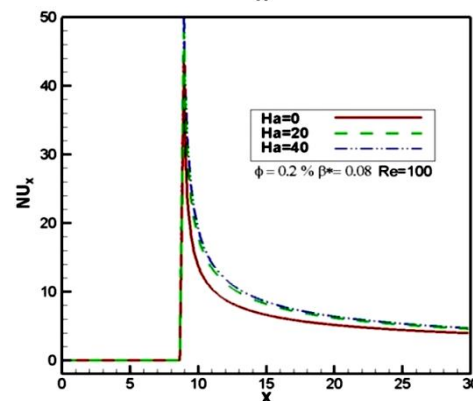
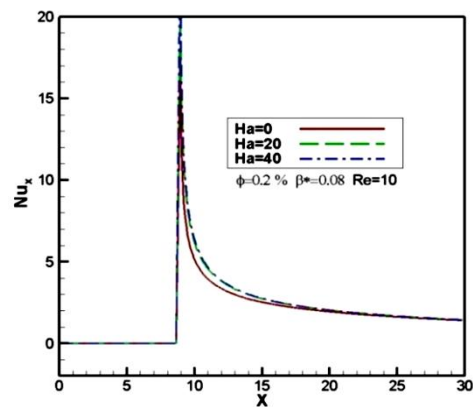
افزایش عدد هارتمن نیز تاثیر کمی بر پروفیل ناسلت موضعی داشته، اندکی آن را افزایش می‌دهد، البته این تاثیر مثبت Ha به ازای مقادیر بیشتر Re ملموس‌تر خواهد بود. همان‌گونه که قبلا اشاره شد، اعمال میدان مغناطیسی، منجر به کاهش سرعت می‌شود، لذا با کاهش سرعت، نانو سیال فرصت بیشتری جهت تبادل حرارت پیدا می‌کند. حال هر چقدر قدرت میدان مغناطیسی اعمالی بیشتر باشد، این کاهش سرعت بیشتر بوده، نانو سیال در میدان‌های مغناطیسی قوی‌تر فرصت مناسب‌تری جهت تبادل حرارتی پیدا می‌کند.

جالب است که نمودارهای مربوط به $Ha=20$ و $Ha=40$ تقریبا برهم منطبق بوده، تفاوت بیشتری با نمودار مربوط به $Ha=0$ دارند؛ این بدان معنی است که افزایش قدرت میدان مغناطیسی به منظور زیاد کردن نرخ انتقال حرارت، فقط در محدوده مشخصی قابلیت کاربرد داشته، از حد مشخصی به بعد اثر قابل توجهی نداشته، مقرون به صرفه نخواهد بود. به منظور ارائه بهتری از میزان نرخ انتقال حرارت از دیوار ریزکانال مقدار عدد ناسلت متوسط Nu_m روی دیوار فوقانی ریزکانال در مقادیر مختلف عدد هارتمن، ϕ و β^* به ازای $Re=10$ و $Re=100$ در شکل ۱۲ نشان داده می‌شود.

در این شکل، اثرات پارامترهای مختلفی نظیر Re ، Ha ، β^* و ϕ روی Nu_m به خوبی قابل مشاهده است. مقایسه دو نمودار مجزای موجود در این شکل، به خوبی بیانگر مقدار بیشتر Nu_m در مقادیر بالاتر Re است. همچنین اثر مثبت و افزایش ϕ نیز در افزایش نرخ انتقال حرارت در هر یک از این دو شکل مشهود است، گرچه این افزایش در مقادیر بیشتر عدد رینولدز با شدت زیادتری روی می‌دهد. از طرفی با افزایش ضریب لغزش مقدار Nu_m زیادتر شده است.

آنچه در این بین از همه بیشتر جلب توجه می‌کند، اثر قابل توجه و افزایش عدد هارتمن در ازدیاد نرخ انتقال حرارت از دیوار است، به طوری که می‌توان ادعا کرد، بیشترین نرخ انتقال حرارت از دیوارهای ریزکانال در مقادیر زیادتر از کسر حجمی و عدد رینولدز (البته تا حد ممکن که شرایط فیزیکی مساله را مختل نکند) و به ازای یک میدان مغناطیسی قویتر حاصل می‌شود؛ که البته با افزایش ضریب سرعت لغزشی این امر باز هم تقویت خواهد داشت.

بوده، فقط در این بخش، نتایج حاصل از مقدار $Re=100$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. واضح است که عدد ناسلت روی دیوارهای عایق برابر صفر است. در امتداد دیوار شار ثابت فوقانی، عدد ناسلت از بیشینه مقدار خود در $X=9$ شروع و سپس با شیب تندی شروع به کاهش کرده، سرانجام به صورت ملایم به سمت مقدار ثابتی در خروجی ریزکانال میل می‌کند.



شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول دیوار ریزکانال در مقادیر مختلف عدد رینولدز و هارتمن برای $\beta^* = 0.08$ و $\phi = 0.2\%$

همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، مقدار عدد ناسلت متوسط در ابتدای بخش دوم میکروکانال بیشترین مقدار را دارد، جایی که بیشترین اختلاف دما بین دیواره میکروکانال و جریان نانوسیال وجود دارد. وقتی نانوسیال در بخش دوم میکروکانال جریان پیدا می‌کند، دمای آن افزایش می‌یابد، متعاقبا اختلاف دمای بین نانوسیال و دیواره میکروکانال کاهش پیدا می‌کند، در نتیجه عدد ناسلت هم رو به کاهش می‌رود.

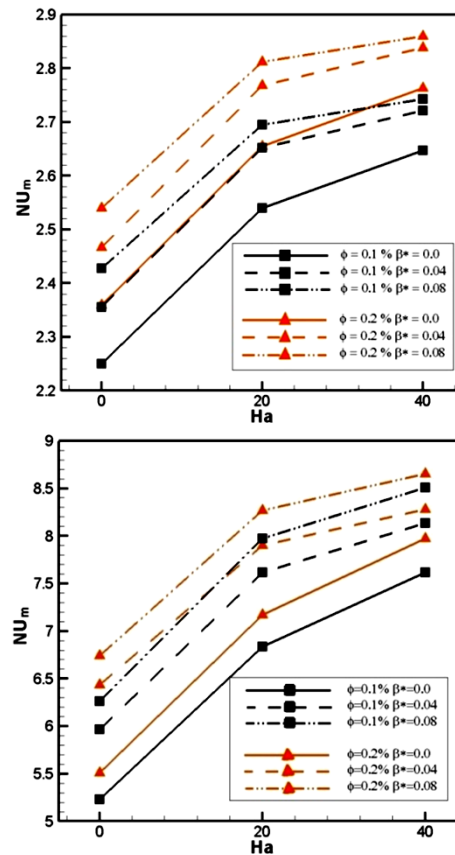
تغییر می‌کند. سرعت لغزشی از مقدار بیشینه خود در ورودی آغاز و با افزایش X شروع به کاهش می‌کند و در نهایت به مقدار ثابتی در طول دیوار میل می‌کند. زیاده‌تر شدن مقدار ضریب لغزش، سبب افزایش سرعت لغزشی سیال در مجاورت جدارها و کاهش سرعت بیشینه در مرکز ریزکانال می‌شود. افزایش قدرت میدان مغناطیسی (افزایش Ha)، منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار سرعت لغزشی می‌شود، به این معنی که به محض ورود جریان به منطقه تحت نفوذ میدان مغناطیسی، مقدار سرعت لغزشی از $U_s=0.33$ به ازای $\beta^*=0.08$ ، به مقدار $U_s=0.72$ می‌رسد.

نمودارهای ناسلت موضعی مربوط به $Ha=20$ و $Ha=40$ تقریباً بر هم منطبق بوده، تفاوت محسوس‌تری با نمودار مربوط به $Ha=0$ دارند؛ این بدان معنی است که افزایش قدرت میدان مغناطیسی، به منظور زیاد کردن نرخ انتقال حرارت، فقط در محدوده مشخصی قابلیت کاربرد داشته، از حد مشخصی به بعد اثر قابل توجهی ندارد. می‌توان ادعا کرد، بیشترین نرخ انتقال حرارت از دیوارهای ریزکانال در مقادیر زیادتر از کسر حجمی و عدد رینولدز و به ازای یک میدان مغناطیسی قویتر حاصل می‌شود؛ که البته با افزایش ضریب سرعت لغزشی، این امر باز هم تقویت خواهد داشت.

در پژوهش حاضر و با در نظرگیری جریان در رژیم لغزشی، برای نخستین بار اثر میدان مغناطیسی بر میزان سرعت لغزشی مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در کار حاضر، از مخلوط جدید آب و نانو لوله‌های کربنی FMWNT به عنوان سیال کاری استفاده شد. در این مخلوط و برخلاف نانوسیال‌های مرسوم حاصل از آب و ذرات فلز، با اندکی افزایش کسر حجمی ذرات (در حد دهم درصد)، از دیاد مطلوبی در مقدار ضریب هدایت حرارتی مخلوط حاصل می‌شود.

۶- مراجع

- [1] Saidur R, Leong K.Y, Mohammad H.A (2011) A review on applications and challenges of nanofluids. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15: 1646-1668.
- [2] Khanafar K, Vafai K (2012) A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer 54: 4410-442.



شکل ۱۲- مقادیر NU_m روی دیوار بالایی ریزکانال در مقادیر مختلف عدد هارتمن ϕ و β^* برای $Re=10$ (بالا) و $Re=100$ (پایین)

۵- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تشکیل شده از آب و ذرات نانو لوله کربنی FMWNT در ریزکانال دو بعدی به صورت عددی و به کمک کد کامپیوتری به زبان فرترن، مورد بررسی قرار گرفت. دیوارهای ریزکانال در قسمت ابتدایی عایق بوده، سپس در ادامه یک شار حرارتی یکنواخت از دیوار فوقانی به سیال وارد می‌شود. ریزکانال در رژیم لغزشی قرار داشته، دامنه سیال درون آن در قسمت شار ثابت، تحت تاثیر میدان مغناطیسی یکنواخت نیز قرار دارد.

میدان مغناطیسی، منجر به تولید نیروی لورنتس در خلاف جهت محور X می‌شود، از این رو افزایش عدد هارتمن، منجر به کاهش مقدار بیشینه سرعت در خط مرکزی ریزکانال و افزایش سرعت در نزدیکی دیوارها می‌شود؛ در نتیجه شکل پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته با عدد هارتمن

- on convective heat transfer coefficient for the turbulent flow through pipe using nanofluid. *International Journal of Micro and Nano Systems*1: 9-14.
- [19] Goodarzi M, Safaei M.R, Karimipour A, Hooman K, Dahari M, Kazi S.N, 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: 1-15.
- [20] Karimipour A, Afrand M, Akbari M, Safaei M.R (2012) Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in the Inclined Enclosure. *World Academy of Science, Engineering and Technology*61: 435-440.
- [21] Bird G (1994) *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*. Oxford.
- [22] Karimipour A, Nezhad A.H, D'Orazio A, 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: 447-462.
- [23] Karimipour A, Nezhad A.H, D'Orazio A, Shirani E (2012) Investigation of the gravity effects on the mixed convection heat transfer in a microchannel using lattice Boltzmann method. *Int. J. Therm. Sci.*54: 142-152.
- [24] Raisi A, Ghasemi B, 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: 114-129.
- [25] Mital M (2013) Analytical analysis of heat transfer and pumping power of laminar nanofluid developing flow in microchannels. *Applied Thermal Engineering* 50: 429-436.
- [26] Akbarinia A, Abdolzadeh M, Laur R (2011) Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluids in microchannels with slip and non-slip flow regimes. *Applied Thermal Engineering*31: 556-565.
- [27] Mah W.H, Hung Y.M, Guo N (2012) Entropy generation of viscous dissipative nanofluid flow in microchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer*55: 4169-4182.
- [28] Singh P.K, Harikrishna P.V, Sundararajan T, Das S.K (2012) Experimental and numerical investigation into the hydrodynamics of nanofluids in microchannels. *Experi. Thermal Fluid Science*42: 174-186.
- [29] Yang Y.T, Lai F.H (2011) Numerical study of flow and heat transfer characteristics of alumina-water nanofluids in a microchannel using the lattice Boltzmann method. *Int. Commu. Heat Mass Transfer*38: 607-614.
- [30] Ellahi R (2013) The effects of MHD and temperature dependent viscosity on the flow of non-Newtonian nanofluid in a pipe: Analytical
- [3] Mangrulkar C. K, Kriplani V.M (2013) Nanofluid Heat Transfer-A Review. *International Journal of Engineering and Technology*54: 1710-1714.
- [4] Tahir S, Mital M (2012) Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel. *Applied Thermal Engineering*39: 8-14.
- [5] Ahmed M.A, Shuaib N.H, Yusoff M.Z, 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: 1368-1375.
- [6] Ahmed M.A, Shuaib N.H, 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: 5891-5898.
- [7] Tullius J.F, Vajtai R, Bayazitoglu Y (2011) A review of cooling in microchannels. *Heat Transfer Engineering*32: 527-541.
- [8] Choi S.U.S (1995) Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *ASME Fluids Engineering Division*231: 99-105.
- [9] Xu D, Pan L (2006) Numerical study of nanofluid flow and heat transfer in microchannels. *International Journal of Nanoscience*5: 747-752.
- [10] Koo J, Kleinstreuer C (2005) Laminar nanofluid flow in microheat-sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*48: 2652-2661.
- [11] Jang S.P, Choi S.U.S (2006) Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids. *Applied Thermal Engineering*26: 2457-2463.
- [12] Chein R, Huang G (2005) Analysis of microchannel heat sink performance using nanofluids. *Applied Thermal Engineering*25: 3104-3114.
- [13] Abbassi H, Aghanajafi C (2006) Evaluation of heat transfer augmentation in a nanofluid-cooled microchannel heat sink. *Journal of Fusion Energy*25: 187-196.
- [14] Tsai T.H, Chein R (2007) Performance analysis of nanofluid-cooled microchannel heat sinks. *International Journal of Heat and Fluid Flow*28: 1013-1026.
- [15] Chein R, Chuang J (2007) Experimental microchannel heat sink performance studies using nanofluids. *International Journal of Thermal Sciences* 46: 57-66.
- [16] Jung J.Y, Oh H.S, Kwak H.Y (2009) Forced convective heat transfer of nanofluids in micro channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*52: 466-472.
- [17] Bhattacharya P, Samanta A.N, Chakraborty S (2009) Numerical study of conjugate heat transfer in rectangular micro channel heat sink with Al₂O₃-H₂O nano-fluid. *Heat Mass Transfer*45: 1323-1333.
- [18] Pentalwar S.P, Bhandarkar U.V, Prabhu S.V (2009) Experimental and numerical investigation

- [34] Aminossadati S.M, Raisi A, Ghasemi B (2011) Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel. *Int. J. Non-Linear Mecha.*46: 1373-1382.
- [35] Amrollahi A, 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: 717-723.
- [36] Mahmoudi A.H, Pop I, Shahi M (2012) Effect of magnetic field on natural convection in a triangular enclosure filled with nanofluid. *Int. J. Thermal Sciences*59: 126-140.
- solutions. *Applied Mathematical Modelling*37: 1451-1467.
- [31] Ghasemi B, Aminossadati S.M, Raisi A (2011) Magnetic field effect on natural convection in a nanofluid-filled square enclosure. *Int. J. Thermal Sciences*50: 1748-1756.
- [32] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji D.D, Soleimani S, Seyyedi S.M (2012) Natural convection of nanofluids in an enclosure between a circular and a sinusoidal cylinder in the presence of magnetic field. *Int. Commu. Heat Mass Transfer*39: 1435-1443.
- [33] Zheng L, Niu J, Zhang X, Gao Y (2012) MHD flow and heat transfer over a porous shrinking surface with velocity slip and temperature jump. *Mathem. Computer Modelling*56: 133-144.