



## بررسی تاثیر تزریق از روی دیوار میکروکانال بر سرعت لغزشی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب و $AL_2O_3$ در میکروکانال

اسماعیل جلالی<sup>۱</sup>، آرش کریمی پور<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد، اصفهان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجفآباد، اصفهان، ایران

arash.karimipour@pmc.iaun.ac.ir

### چکیده:

در این مقاله انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تشکیل شده از آب و نانوذرات  $AL_2O_3$  در یک میکروکانال دو بعدی، افقی با تزریق از دیوار پایین شبیه سازی می شود. دیوار بالایی میکروکانال تحت دمای  $T_H$  برابر با 303 کلوین قرار دارد و بر روی دیوار پایینی میکروکانال سه عدد سوراخ به منظور تزریق جریان تعبیه شده است و سایر قسمت های دیواره عایق می باشند. در این کار تاثیر پارامترهایی نظیر، عدد رینولدز، ضریب لغزش و کسر حجمی نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. شرط مرزی سرعت لغزشی بر روی دیوارهای بالا و پایین میکروکانال در نظر گرفته می شود. در این کار جریان نانو سیال درون میکروکانال به صورت آرام، دائم و نیوتنی در نظر گرفته شده است. در کار حاضر، تزریق بر سرعت لغزشی از روی دیواره ی میکروکانال برای اولین بار بررسی می شود. همچنین نتایج به صورت پروفیل های سرعت و نمودارهای عدد ناسلت ارائه می گردند. مشاهده گردید که عدد ناسلت با افزایش مقدار ضریب لغزش سرعت و مقدار درصد وزنی نانوذرات جامد افزایش پیدا می کند و نرخ این افزایش در مقادیر بالای عدد رینولدز بیشتر می شود. همچنین بررسی شد که با تزریق از روی دیواره ی میکروکانال به خصوص در ضریب لغزش های بالاتر، مقدار سرعت لغزشی افزایش پیدا می کند.

کلید واژگان: انتقال حرارت، سرعت لغزشی، میکروکانال

### *Effect of Injection on the Microchannel Wall on the Slip Velocity the Heat Transfer of Water- $AL_2O_3$ Nanofluid in Microchannel*

*Esmail Jalali<sup>1</sup>, Arash Karimipour<sup>2</sup>*

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

*2- Assist. Prof., Department. of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran*

*†Corresponding Author Email: arash.karimipour@pmc.iaun.ac.ir*

### Abstract :

In this paper, the forced heat transfer of the nanofluid from water and  $AL_2O_3$  nanoparticles is simulated in a two-dimensional, microchannel, horizontal, by injection from the bottom wall. The upper wall of the microchannel is 303 K at a temperature of  $T_H$  and there are holes on the lower wall of the microchannel to inject the flow and the other parts of the wall are insulated. In this work, the effect of parameters such as Reynolds number, slip coefficient and volume fraction of nanoparticles were investigated. The boundary condition is considered to be the slipping speed on the upper and lower walls of the microchannel. In this work, the flow of nanofluid in the microchannel is considered slowly, permanently and Newtonian. In the present work, the injection of slip speed from the microchannel wall is first examined. The results are also presented as speed profiles and Nusselt number charts. It was found that the Nusselt number increases with increasing the amount of slip coefficient and the weight percentage of solid nanoparticles, and the rate of this increases in the high values of the Reynolds number. It was also investigated that the amount of slipping velocity increases with injection by the microchannel wall, especially in the slip coefficient.

**Keywords:** Convective heat transfer, Slip Velocity, Microchannel.

## ۱- مقدمه

خنک کاری یکی از مسائل مهمی است که بیشتر صنایع پایه از قبیل تولید انرژی، میکروالکترونیک، حمل و نقل، ساخت و ساز و متالوژی با آن روبرو می‌باشند. انتقال حرارت امروزه با دو چالش عمده روبرو است؛ از یک طرف خنک کاری تجهیزات با شار حرارتی بالا و از طرف دیگر مسئله کوچک نمودن اندازه تجهیزات. امروزه خنک کاری هوایی متداولترین شیوه خنک سازی است اما این روش برای انتقال شارهای حرارتی زیاد کارآیی ندارد. مایعات خنک کننده اغلب آب، اتیلن گلیکول، انواع میردها و سایر خنک سازها بسته به کارآیی هستند. این مایعات اغلب خواص انتقال حرارت ضعیفی دارند که به این منظور دانشمندان تلاش‌های زیادی نموده‌اند تا هدایت حرارتی پایین مایعات را با افزودن ذرات جامد در اندازه نانو بهبود بخشند. چون که جامد فلزی، ضریب هدایت حرارتی بیشتری نسبت به سیال دارد انتظار می‌رود تعلیق ذرات ریز جامد فلزی در سیال، هدایت حرارتی آن را افزایش دهد.

در ابتدا ماکسول [1]، بیش از 120 سال قبل در کار تئوری خود نشان داد که افزودن درصد حجمی ذرات معلق در سیال، افزایش انتقال حرارت هدایتی مخلوط را در پی دارد که دلیل آن قابلیت هدایت حرارتی بالای ذرات فلزی و غیر فلزی اضافه شده به سیال، نسبت به قابلیت هدایت حرارتی سیال پایه است. اخیراً نانو سیال‌ها به عنوان خنک‌کننده‌های بالقوه در مطالعات تئوری و تجربی متعدد معرفی شده‌اند [2,3]. امین فر و همکاران [4] به بررسی عددی آنترپوی تولیدی ناشی از جابجایی ترکیبی نانوسیال آب- $Al_2O_3$  در یک کانال عمودی با دیواره‌های سینوسی تحت میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوذره به سیال پایه، موجب افزایش آنترپوی تولیدی ناشی از انتقال حرارت و آنترپوی جریانی می‌شود. انتقال حرارت جابجایی طبیعی نانوسیال در حضور میدان مغناطیسی یکنواخت بین محفظه مربعی و سیلندر داخلی، با روش شبکه بولتزمن توسط رامیان و همکاران [5] شبیه سازی شده است. نتایج حاصله به خوبی حرکت جریان سیال و توزیع دما در فضای بین محفظه و سیلندر را نشان می‌دهد.

میکروکانال‌ها در کاربردهای مهندسی و علمی مختلفی به کار می‌روند که چاپگر جوهر افشان یک مثال کلاسیک است. با توجه به اندازه کوچک و راندمان بالا، استفاده گسترده‌ای در کاربردهای پزشکی و سیستم‌های میکروالکترومکانیکی مانند میکرو مبدل‌های حرارتی، میکروپمپ‌ها، میکروتوربین‌ها و حسگرها دارند [6,7].

در زیر، به تعداد زیادی از مقالات مربوط به جریان نانوسیال در لوله‌ها، کانال و میکروکانال‌ها پرداخته شده است.

اکبری نیا و همکاران [8] به بررسی جابجایی اجباری نانوسیال آب - اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال مستطیلی دو بعدی پرداختند. آن‌ها افزایش انتقال حرارت بر اثر افزودن ذرات نانو به سیال

پایه، در اعداد رینولدز پایین را مورد مطالعه قرار دادند. در نتایج بیان کردند که عدد رینولدز در نانوکنال، تحت اثر سرعت ورودی و ویسکوزیته سینتیکی نانوسیال بوده و ویسکوزیته با افزایش کسر حجمی نانو ذرات افزایش می‌یابد.

بهباد مهر و همکاران [9] انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان مغشوش در یک لوله دایره‌ای شکل، با نانو سیال آب-اکسید مس را به صورت عددی مطالعه کردند. آنها در این مطالعه، مدل مخلوط دو فازی را به کار بردند. با مقایسه نتیجه‌های محاسبه شده و مقادیر تجربی، نشان دادند که مدل مخلوط دو فازی دقیق تر از مدل تک فازی است. همچنین چرخش محوری ناحیه جریان و پروفیل‌های سرعت توسعه یافته در عددهای رینولدز مختلف را بررسی کردند.

کمالی و همکاران [10] به بررسی عددی انتقال حرارت جابجایی نانوسیال آب-اکسید مس در یک میکرولوله با شرایط مرزی شار ثابت پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت افزایش یافته است. او همچنین رفتار نانوسیال در یک میکرولوله را با روش آزمایشگاهی نیز مورد بررسی قرار داده و با مقایسه با روش عددی مشخص گردید که روش عددی یکی از قوی‌ترین روش‌های حل مسائل انتقال حرارت است.

نعمتی و همکارانش [11] به بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر جریان جابجایی آزاد نانوسیال در یک محفظه مستطیلی پرداختند. نتایج مطالعه آنها نشان می‌دهد که نوسلت متوسط نانوسیال با افزایش کسر حجمی جامد افزایش می‌یابد، در حالی که در اثر میدان مغناطیسی زیاد، کاهش می‌یابد.

شیخ‌زاده و همکاران [12] به بررسی عددی تأثیر افت فشار و انتقال حرارت نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در میکروکانال پرداختند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد حجمی نانوذرات، انتقال حرارت افزایش می‌یابد و با این افزایش درصد حجمی، افت فشار نیز افزایش پیدا می‌کند و استفاده از نانوسیال در رینولدزهای بالا نسبت به رینولدزهای پایین باعث افزایش عدد ناسلت می‌گردد.

هوو و همکاران [13] با تحقیقات تجربی خود به منظور بررسی عملکرد خنک کاری نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در جریان اجباری در میکروکانال به این نتیجه رسیدند که نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در مقایسه با آب خالص دارای عملکرد بالاتری از انتقال حرارت در میکروکانال می‌باشد.

تهیر و همکاران [14] به صورت عددی، انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آرام توسعه یافته نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم در لوله دایره‌ای با شار حرارتی ثابت را بررسی نمودند و نشان دادند که ضریب انتقال حرارت با افزایش عدد رینولدز و کسر حجمی به طور خطی افزایش پیدا می‌کند و با افزایش اندازه ذرات به طور غیر خطی کاهش پیدا می‌کند.

ایزدی و همکاران [15] جریان جابجایی اجباری در حالت توسعه یافته آرام در بین دو دایره متحدالمرکز را مورد بررسی قرار دادند و به

این نتیجه رسیدند که کسر حجمی نانوذرات تأثیر مهمی در پروفیل-های دمایی دارد و تأثیر بر روی سرعت بی بعد ندارد.

پنگ و همکاران [16] به بررسی جریان سیال آب در میکرولوله شیشه ای پرداختند، در این بررسی تجربی، آنها دریافتند که انتقال جریان از حالت آرام به مغشوش در میکرولوله در محدوده عدد رینولدز بین 1700 تا 1900 اتفاق می افتد.

نظری و همکاران [17] انتقال حرارت آب و نانو سیال آب- آلومینا در یک لوله دما ثابت حاوی ماده متخلخل در محدوده رینولدز 700 تا 5000 به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نماینگر افزایش انتقال حرارت نانوسیال نسبت به سیال پایه است.

حاتمی و گنجی [18] به تحلیل جریان و انتقال حرارت جریان نانوسیال آب- اکسید مس در میکروکانال با چشمه حرارتی پرداختند. آنها نشان دادند که افزایش قطر نانوذرات باعث افزایش اختلاف دما بین سیال و دیواره ها و تقویت عدد ناسلت می شود. همچنین، افزایش نسبت منظری میکرو کانال باعث افزایش عدد ناسلت، کاهش حداکثر سرعت بی بعد و کاهش ضخامت لایه مرزی می گردد.

مایگا و همکاران [19,20] به صورت عددی خواص حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیالات عبوری از لوله ای که به طور یکنواخت حرکت داده می شود را در جریان آرام با مدل تک فازی بررسی نمودند. نشان دادند که افزودن نانوذرات، انتقال حرارت را نسبت به سیال پایه به طرز قابل توجهی افزایش می دهد.

لی و همکاران [21] با مطالعه انتقال حرارت در یک میکروکانال دوزنقه ای با استفاده از نانوسیال آب- مس نشان دادند که وجود نانو ذرات مس در سیال پایه آب باعث افزایش عملکرد حرارتی می شود.

آنوپ و همکاران [22] به صورت تجربی بررسی نمودند انتقال حرارت جابجایی اجباری و نانوسیال آب- نانوذرات سیلیکا را در یک میکرو کانال و نشان دادند که نانوسیال رفتار نیوتنی از خود نشان می دهد و افزایش کسر حجمی نانو ذرات باعث افزایش ویسکوزیته نانوسیال خواهد شد.

شریعت و همکاران [23] به مطالعه جابجایی ترکیبی جریان آرام نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم در یک کانال بیضی شکل، با شرط مرزی شار حرارتی یکنواخت پرداختند. آنها نشان دادند که در یک عدد رینولدز و عدد ریچاردسون مشخص، افزایش کسر حجمی نانو ذرات جامد، عددناسلت را افزایش می دهد در حالی که اصطکاک پوسته ای را کاهش می دهد.

مانکا و همکاران [24] به تجزیه و تحلیل عددی بر روی جریان جابجایی هوا در کانال های مربعی، مستطیلی، سه گوش و دوزنقه ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که، ضریب اصطکاک در رژیم مغشوش جریان سیال با افزایش عدد ناسلت، افزایش می یابد.

بازدید و همکاران [25] به مدلسازی عددی جریان آرام توأم با جابجایی مختلط نانو سیال آب- اکسید تیتانیوم در کانال قائم

مستطیلی پرداختند. بدین منظور از دو دیدگاه تک فاز و دو فاز استفاده شده است. در بخش دو فاز روش اوپلر- لاگرانژ برای شبیه سازی پخش ذرات در سیال پایه به کار رفته است. مشاهده می شود که افزایش درصد حجمی نانو ذرات، باعث بهبود ضریب انتقال حرارت می شود و این اثر در نسبت های منظری بالاتر، پر رنگتر است. همچنین در عدد ریچاردسون پایین تر که اثر جابجایی اجباری بیشتر از جابجایی آزاد است، پخش نانو ذرات آب- اکسید تیتانیوم در سیال پایه به نحوی است که بهبود انتقال حرارت بیشتر خواهد بود.

پاک و چو [26] با تحقیقات تجربی خود به منظور بررسی اثرات اصطکاک در جریان مغشوش و رفتارهای انتقال حرارتی نانوسیال تشکیل شده توسط ذرات  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  در یک لوله مدور به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت نانو ذره باعث افزایش عدد ناسلت می شود.

دینگ و همکاران [27] با مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری آرام نانوسیال آب- مس در نانو لوله کربنی با شرط عدم لغزش، نشان دادند که دلیل نسبت هندسی بالای میکرولوله، ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد.

بتاچریا و همکاران [28] انتقال حرارت جریان مغشوش نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در میکروکانال را بررسی نمودند. به این نتیجه رسیدند که، استفاده از نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم به جای استفاده از آب خالص باعث بهبود عملکرد انتقال حرارت در میکروکانال با چاه حرارتی شده است.

جانگ و همکاران [29] به بررسی جریان نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال مستطیلی پرداختند و در کار خود افزایش انتقال حرارت را بر اثر افزایش عدد رینولدز و درصد حجمی نشان دادند. همچنین مشخص نمودند که، افزایش عدد رینولدز باعث افزایش ناسلت می شود.

رحمان و همکاران [30] عملکرد حرارتی یک جریان دو بعدی، پایدار و لغزشی و تحت میدان مغناطیسی با نانوسیال آب- مس و آب- اکسید آلومینیوم را در یک گوه مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که سرعت نانوسیال در مقایسه با سرعت سیال خالص کمتر خواهد بود و وجود نانوسیال باعث نازک تر شدن لایه مرزی هیدرودینامیکی و ضخیم تر شدن لایه مرزی حرارتی می شود. همچنین نرخ انتقال حرارت در نانوسیال آب- مس، بیشتر از نانو سیال آب- اکسید آلومینیوم می باشد. سانترا و همکاران [31] با بررسی انتقال حرارت و جریان آرام نانوسیال آب- اکسید مس در میان دو صفحه موازی هم دما، نشان دادند که عملکرد حرارتی با افزایش کسر حجمی افزایش می یابد و نانوسیال نیز در مقایسه با آب خالص جهت خنک سازی مفیدتر خواهد بود.

کریمی پور و همکاران [32] انتقال حرارت جابجایی اجباری نانو سیال آب-FMWCNT را در یک ریز کانال دو بعدی تحت میدان

عدد رینولدز ورودی میکروکانال و ورودی از سوراخ‌های دیواره‌ی پایین مقادیر  $Re=1,10,100$  در نظر گرفته شده است. تغییر مقادیر ضریب لغزش به صورت  $\beta^*=0.001$  و  $\beta^*=0.01$  و  $\beta^*=0.1$  می‌باشد و مقادیر درصد وزنی نانوذرات جامد  $\phi=0\%$  و  $\phi=2\%$  و  $\phi=4\%$  می‌باشند.

جدول (۱): خواص ترموفیزیکی نانوسیال آب- $AL_2O_3$  در دمای  $20^\circ C$  [33]

$\phi$	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$\mu$ ( $pa.s$ )	$K$ ( $w/mk$ )	$c_p$ ( $J/kg k$ )
0%	997.1	$8.91 \times 10^{-4}$	0.613	4179
2%	1056.5	$9.37 \times 10^{-4}$	0.653	3922.4
4%	1116	$9.87 \times 10^{-4}$	0.695	3693.3

### ۳- معادلات حاکم:

معادلات بی بعد حاکم شامل معادلات پیوستگی، ممنتوم و انرژی است که برای حالت دائم، آرام و سیال نیوتنی به صورت زیر حل می‌شوند.

معادله پیوستگی بی بعد:

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

معادلات ممنتوم بی بعد:

$$U \frac{\partial U}{\partial X} + V \frac{\partial U}{\partial Y} = - \frac{\partial P}{\partial X} +$$

$$\frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf} \nu_f} \left( \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right)$$

معادله انرژی بی بعد:

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

برای بی بعد سازی معادلات 1 تا 3، از پارامترهای زیر استفاده می‌شود:

$$H = \frac{h}{x} = 1 \quad L = \frac{l}{h} = 30 \quad (4)$$

$$X = \frac{x}{h} \quad Y = \frac{y}{h} \quad U = \frac{u}{u_c}$$

$$\theta = \frac{T-T_c}{T_h-T_c} \quad V = \frac{v}{u_c} \quad Pr = \frac{\nu_f}{\alpha_f} \quad Re = \frac{u_c h}{\nu_f}$$

روابط محاسبه خواص نانوسیال به صورت زیر ارائه می‌شود:

چگالی نانوسیال

$$(5)$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s$$

ضریب پخش حرارتی موثر نانوسیال

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{eff}}{(\rho c_p)_{nf}} \quad (6)$$

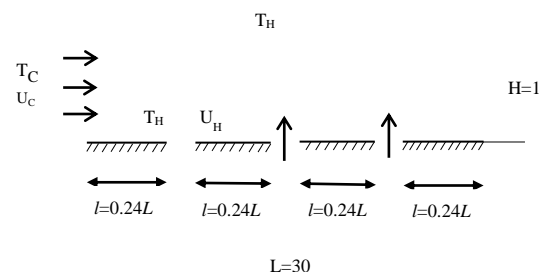
مغناطیسی مطالعه نمودند و مشاهده نمودند که افزایش قدرت میدان مغناطیسی، منجر به افزایش قابل توجهی در مقدار سرعت لغزش می‌شود.

امین السادتی و همکاران [33] مطالعه اثرات میدان مغناطیسی بر جابجایی اجباری در میکروکانال افقی، با اعمال شار حرارتی و میدان مغناطیسی در قسمت وسط میکروکانال با نانوسیال آب- اکسید آلومینیوم انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که، عملکرد حرارتی بهتر میکروکانال در اعداد رینولدز و هارتمن بالا اتفاق می‌افتد. همچنین در قسمت وسط میکروکانال عدد ناسلت متوسط با افزایش کسر حجمی جامد افزایش خواهد یافت.

در پژوهش حاضر برای نخستین بار به مطالعه انتقال حرارت جابجایی اجباری جریان آرام نانوسیال آبی- اکسید آلومینیوم در یک میکروکانال با تزریق جریان از روی دیوار میکروکانال در رژیم لغزشی پرداخته شده است. در این مطالعه عملکرد حرارتی نانوسیال تحت تاثیر غلظت ذرات نانو، ضریب لغزش بررسی شده است. نتیجه‌های به دست آمده با استفاده از پروفیل‌های سرعت، دما و مقادیر عدد ناسلت موضعی و متوسط ارائه شده‌اند. نوآوری پژوهش حاضر در نظر گرفتن بررسی تزریق بر سرعت لغزشی از روی دیواره‌ی میکروکانال می‌باشد.

### ۲- شرح مسئله:

مسئله مورد بررسی یک میکروکانال دوبعدی، افقی طبق شکل ۱ می‌باشد. دیواره‌ی بالایی میکروکانال تحت دمای  $T_H=303k$  قرار دارد، بر روی دیوار پایین سه عدد سوراخ با قطر  $D=0.07 \times 1$  تعبیه شده است که از این قسمت‌ها تزریق انجام می‌شود و سایر قسمت‌ها در بین سوراخ‌ها و همچنین لبه‌های ورودی و خروجی دیوار پایین عایق هستند. نانوسیال در نظر گرفته شده شامل آب و نانوذرات جامد  $AL_2O_3$  می‌باشد. نانوسیال با دمای  $T_C=293k$  و سرعت  $U_C$  وارد میکروکانال شده و پس از خنک سازی دیواره‌های میکروکانال از انتهای آن خارج می‌شود. جریان نانوسیال درون میکروکانال به صورت آرام، دائم، نیوتنی در نظر گرفته شده است.



شکل (۱): شماتیک میکروکانال

دمای  $T=20^\circ C$  مطابق جدول 1، ارائه شده است. شرط سرعت لغزشی روی دیواره‌های بالا و پایین در نظر گرفته شده است.

ظرفیت گرمای ویژه نانوسیال  
(7)

$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s$$

در جریان آرام، لزجت موثر دینامیکی نانوسیال با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.  
(8)

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1 - \phi)^{2.5}}$$

برای محاسبه ضریب هدایت گرمایی موثر نانوسیال از رابطه پاتل و همکاران [34] استفاده می‌شود

(9)

$$K_{eff} = k_f \left( 1 + \frac{k_s A_s}{k_f A_f} + c k_s P_e \frac{A_s}{k_f A_f} \right)$$

در رابطه (9)، ثابت تجربی برابر با  $c=25000$ ، رسانایی گرمایی جامد  $K_s=40w/mk$  و رسانایی گرمایی سیال برابر با  $=0.613 w/mk$  می‌باشد.  
(10)

$$\frac{A_s}{A_f} = \frac{d_f \phi}{d_s (1 - \phi)}$$

(11)

$$P_e = \frac{u_s d_s}{\alpha_f}$$

در روابط (10) و (11)،  $df=2^\circ A$  قطر ملکول آب و  $d_s=40nm$  قطر ملکول نانوذره می‌باشد، همچنین  $A_s$  مساحت ملکول جامد،  $A_f$  مساحت ملکول سیال است. مقدار  $u_s$  سرعت حرکت براونی نانو ذرات با رابطه زیر بدست می‌آید:  
(12)

$$u_s = \frac{2K_b T}{\pi \mu_f d_s^2}$$

در رابطه (12) مقدار  $k_b=1.3807 \times 10^{-23} J/K$  می‌باشد.

عدد ناسلت موضعی  $(Nu_x)$  و ناسلت متوسط  $(Nu_m)$  به صورت زیر می‌باشد:  
(13)

$$Nu(x) = -\frac{K_{eff}}{K_f} \left( \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right)_{Y=0}$$

(14)

$$Nu_m = \frac{1}{L} \int_0^L Nu_x dx$$

#### ۴- شرایط مرزی:

شرایط مرزی در میکروکانال شامل شرایط مرزی سرعت ورودی در مقطع ورودی جریان سیال، شرط فشار خروجی در مقطع خروجی و دیواره‌ها از نوع جامد هستند. در شرایط مرزی ورودی، جریان یکنواخت با سرعت و دمای بی بعد واحد در نظر گرفته می‌شود. درخروجی نیز از شرایط توسعه یافتگی هیدروپنایمیک و حرارتی استفاده می‌گردد.

مقدار سرعت لغزشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

(15)

$$U_s = \pm B \left( \frac{\partial U}{\partial Y} \right)_{Y=0,1}$$

که B نشان دهنده‌ی ضریب لغزش است. به طور کلی، شرایط مرزی حاکم بر مسئله به صورت زیر می‌باشند [35]: (16)

$$\leq Y \leq 1 \text{ for } X=0 \text{ and } 0 \text{ and } \theta = 0 \quad U=1, V=0$$

$$\leq Y \leq 1 \text{ for } X=30 \text{ and } 0 \text{ and } \frac{\partial U}{\partial X} = \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad V=0$$

$$30 \text{ for } Y=0 \text{ and } 0 \leq X \leq 30 \quad V=0, U = U_s \text{ and } \frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0$$

$$V=0, \text{ and } \theta = 1 \text{ for } Y=1 \text{ and } 0 \leq X \leq 30$$

$$U = U_s$$

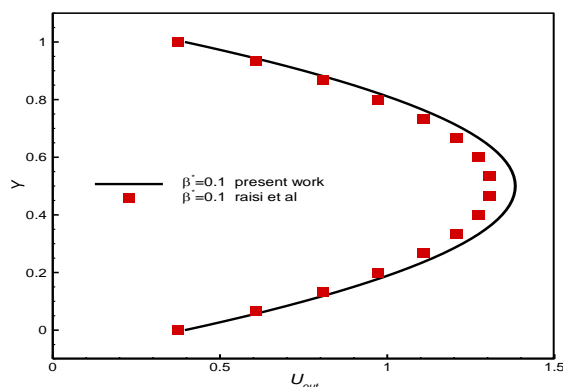
#### ۵- بررسی استقلال از شبکه:

با توجه به اینکه هندسه مورد نظر میکروکانال دوبعدی است، از مش منظم مستطیلی استفاده می‌کنیم. در این پژوهش تعداد مش مطابق با جدول 2 با در نظر گرفتن معیارهایی مانند خطای عددی قابل قبول و تعداد مش مناسب برای محاسبه پارامترهای سرعت و دمای بی بعد بررسی می‌شود. در جدول 2، استقلال از شبکه در عدد رینولدز  $Re=10$  برای نانوسیال نیوتونی، در کسر حجمی 2 درصد نانوذره جامد بررسی شده است.

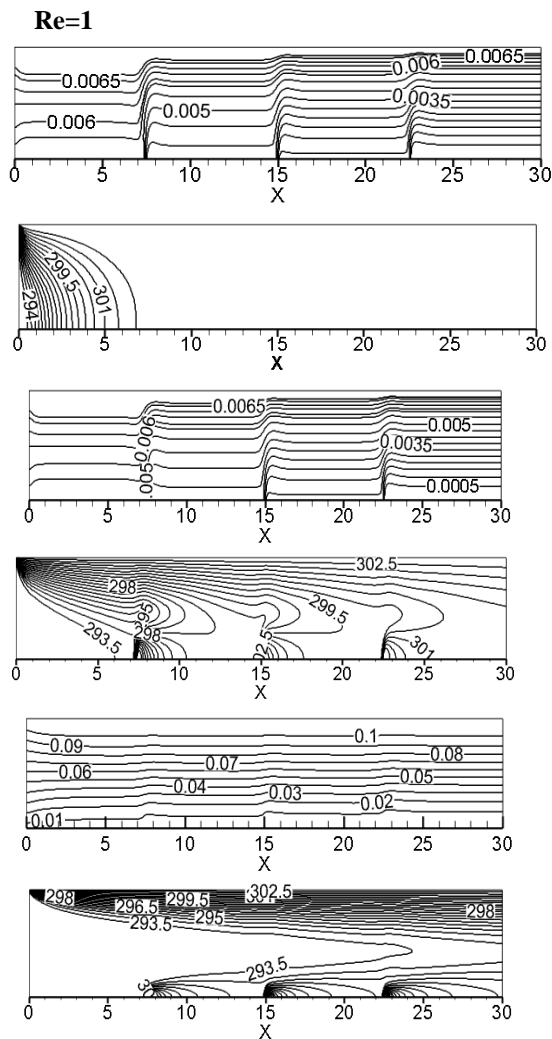
جدول ۲: بررسی استقلال از شبکه در پژوهش حاضر

	500×50	600×60	700×70
U	1.8636	1.8639	1.8641
θ	0.9141	0.9144	0.9147

در بررسی استقلال از شبکه، میزان خطای دو پارامتر سرعت و دمای بی بعد نسبت به حالت جواب‌های دقیق تر (تعداد مش  $70 \times 70$ ) در نظر گرفته شده است. به دلیل وجود خطای کمتر و تعداد مش کمتر و استفاده از حافظه و زمان پردازش کمتر، از مش سازمان یافته مستطیلی برای هندسه مورد نظر با ابعاد  $(60 \times 60)$  استفاده می‌کنیم.



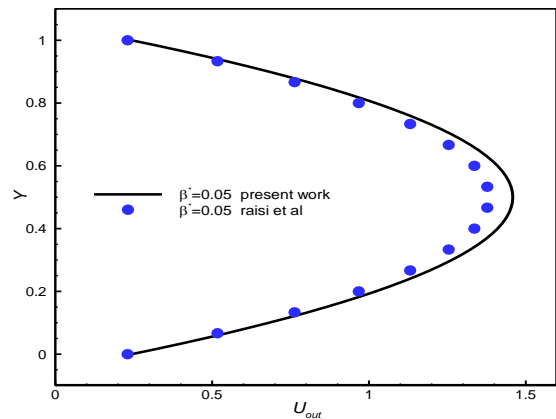
سپس پس از آخرین تزریق جریان به توسعه یافتگی کامل دست پیدا می‌کند. خطوط دما نشان می‌دهند که هر چه عدد رینولدز بیشتر باشد، به دلیل سرعت بیشتر جریان، زمان کافی برای تبادل گرما بین نانوسیال و دیواره‌ی میکروکانال وجود ندارد و تبادل گرمای کمتری شکل می‌گیرد، لذا جریان دیرتر می‌تواند به حالت کاملاً توسعه یافته برسد.



شکل ۴: نمودارهای خطوط جریان (بالا) و خطوط دما (پایین) در اعداد رینولدز مختلف در  $\beta^* = 0.1$ ،  $\phi = 2\%$

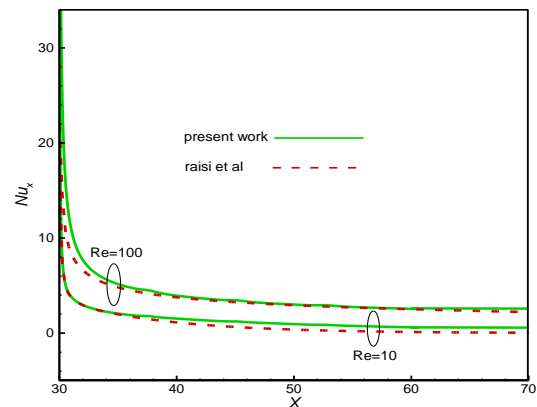
#### ۷-۱- بررسی اثر ضریب لغزش بی بعد:

در این قسمت، اثرات ضریب لغزش بر روی عملکرد حرارتی میکروکانال بررسی می‌شود. شکل ۵ پروفیل سرعت و دمای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم روی خط عمودی میکروکانال ( $x=0.6L$ )، به ازای  $Re=10$  و  $\phi=2\%$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱ در مقادیر مختلف ضریب لغزش مشخص شده است. در نمودار پروفیل سرعت، جریان نانوسیال به صورت پروفیل‌های سهمی



شکل ۵: پروفیل سرعت پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج [35]

همچنین در شکل ۳ عدد ناسلت موضعی در یک میکروکانال در رینولدزهای مختلف با نتایج کار رئیسی و همکاران [35] مقایسه شده است.



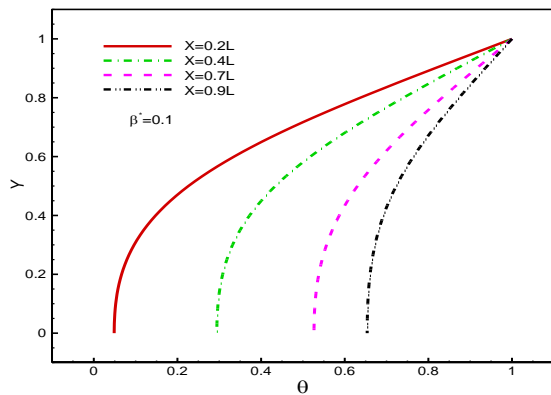
شکل ۶: عدد ناسلت پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج [35]

#### ۷- نتایج و بحث:

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال آب- $Al_2O_3$  در یک میکروکانال دو بعدی افقی به صورت عددی مطالعه شده است. همان طور که در شکل ۱، نشان داده شده است، دیواره‌ی بالایی میکروکانال تحت دمای ثابت و دیواره‌ی پایینی در لبه‌های ورودی و خروجی و همچنین بین سوراخ‌ها عایق می‌باشد. شرط مرزی سرعت لغزشی در طول دیواره‌های میکروکانال، برای مقادیر مختلف ضریب لغزش در نظر گرفته شده است.

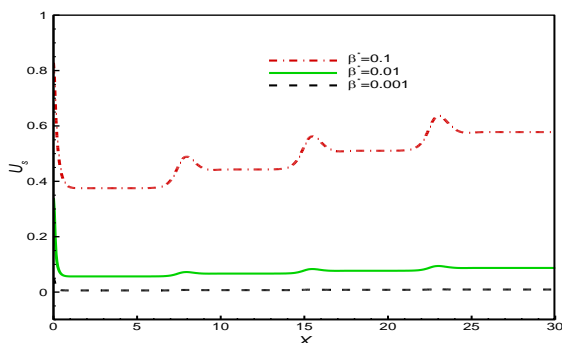
شکل ۴ خطوط جریان و هم دما را برای اعداد رینولدز ۱۰ و ۱۰۰ به ازای کسر حجمی ۲ درصد، ضریب لغزش ۰.۱ و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱۰ را نشان می‌دهد. برای هر سه عدد رینولدز، با توجه به خطوط جریان مشاهده می‌شود که جریان بعد از گذشتن از طول کمی از ورودی میکروکانال به حالت توسعه یافته می‌رسد، تا اینکه تزریق در هر مرحله از سوراخ‌ها انجام می‌شود و

نانوسیال در نزدیکی دیواره گرم میکروکانال زیاد شده، همچنین با زیاد شدن ضریب لغزش، تغییر ناچیزی در دمای نانوسیال رخ می‌دهد.

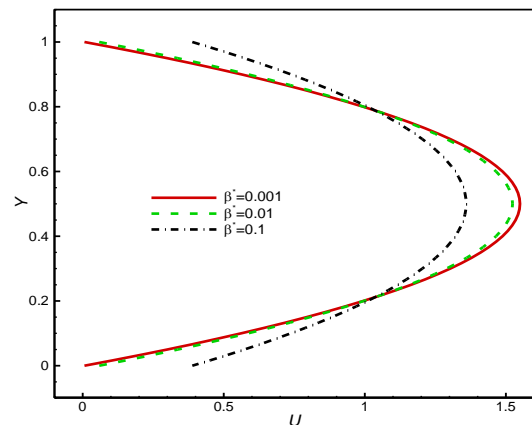


شکل ۶: پروفیل دما روی مقطع‌های مختلف میکروکانال در  $Re=10$  و  $\phi=2\%$

در شکل ۷ تاثیر مقادیر مختلف ضریب لغزش بر روی سرعت لغزشی در عدد رینولدز ۱۰ و کسر حجمی نانو ذرات  $\phi=2\%$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌ها برابر ۱۰ مشخص گردیده است. مشاهده می‌شود که سرعت لغزشی دیواره در ورودی میکروکانال مقدار حداکثر می‌باشد و در طول کمی با افزایش  $x$ ، کاهش می‌یابد و سپس با انجام هر تزریق از سوراخ‌های دیواره، سرعت لغزشی مقداری زیاد شده و در نهایت کاهش می‌یابد و به مقدار ثابتی میل می‌کند. ضریب لغزش اثر قابل توجهی بر سرعت لغزشی نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال دارد. با افزایش ضریب لغزش جریان به رژیم لغزشی نزدیک‌تر می‌گردد و سرعت لغزشی در طول دیواره‌های میکروکانال زیاد می‌شود. هر چه عدد رینولدز بیشتر می‌شود، مشخص است که سرعت نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه، سرعت لغزشی دیرتر به حالت کاملاً توسعه یافته می‌رسد. شکل ۷ به خوبی تاثیر تزریق از روی دیواره‌ی میکروکانال که در این کار به آن پرداخته شده است را نشان می‌دهد که باعث افزایش سرعت لغزشی به خصوص در ضریب لغزش‌های بالا در طول دیوار میکروکانال شده است. با توجه به بررسی کارهای تحقیقاتی انجام شده در این زمینه و مبحث میکروکانال تا به امروز، این نمودار برای اولین بار در کار حاضر بررسی و رسم شده است.



شکل توسعه یافته شده می‌باشد. نانوسیال روی دیواره‌های میکروکانال به دلیل وجود شرط مرزی لغزش روی دیواره‌ها دارای سرعت است و به عبارت دیگر، سرعت نانوسیال روی دیواره‌های میکروکانال غیر صفر می‌باشد. با افزایش ضریب لغزش، مقدار سرعت نانوسیال روی دیواره‌های میکروکانال بیشتر می‌شود. مقدار حداکثر سرعت روی خط عمودی وسط میکروکانال نیز با افزایش ضریب لغزش، به دلیل قانون بقای جرم کاهش پیدا می‌کند. در نمودار پروفیل دما، مقدار دما روی خط عمودی میکروکانال نیز با زیاد شدن ضریب لغزش افزایش پیدا می‌کند.

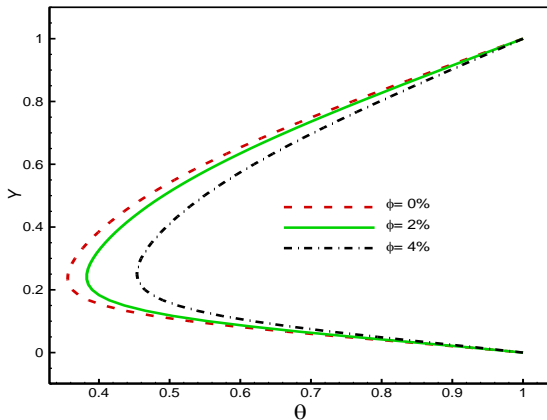


شکل ۵: پروفیل سرعت و دمای بی بعد در خط عمودی میکروکانال ( $x=0.6 L$ ) در  $Re=10$ ،  $\phi=2\%$  و لغزش‌های مختلف

در ادامه در شکل ۶ پروفیل دمای بی بعد در مقاطع مختلف میکروکانال در  $Re=10$  و  $\phi=2\%$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱ در ضریب لغزش ۰.۱ مشخص شده است. مقدار دمای بی بعد در طول میکروکانال، با افزایش مقطع افزایش پیدا می‌کند. دمای نانوسیال در ناحیه کاملاً توسعه یافته در طول میکروکانال با افزایش سطح مقطع، زیاده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود طبق پروفیل‌های دما، دمای

### شکل ۷: سرعت لغزشی بی بعد در طول دیواره‌ی میکروکانال در $Re=10$ ، $\phi=2\%$ و ضریب لغزش‌های مختلف

در نمودار مشاهده می‌شود که افزایش کسرحجمی نانوذرات جامد، باعث افزایش دمای بی بعد نانوسیال به خاطر افزایش ضریب هدایت گرمایی نانوسیال می‌گردد. این افزایش دما به دلیل انتقال حرارت از دیواره‌ی میکروکانال به جریان نانوسیال در طول میکروکانال می‌باشد.



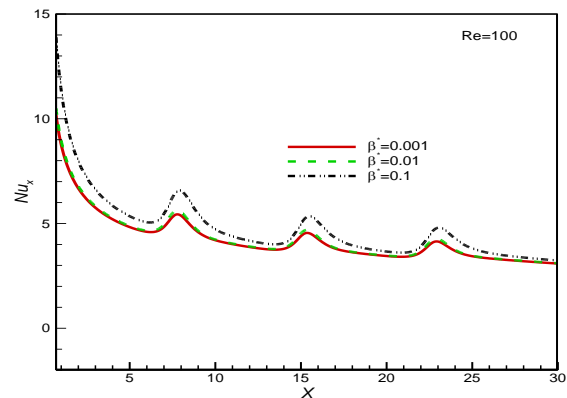
شکل ۸: پروفیل دما روی خط عمودی میکروکانال ( $x=0.6L$ ) در  $Re=10$ ،  $\beta^*=0.1$  و کسر حجمی‌های مختلف

شکل ۱۰ تاثیر مقادیر مختلف کسر حجمی نانو ذرات بر عدد ناسلت در  $Re=100$  و  $\beta^*=0.01$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱۰۰ مشخص شده است.

عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و کسرحجمی نانوذرات جامد افزایش پیدا می‌کند. عدد ناسلت در ورودی میکروکانال، به خاطر اختلاف زیاد دما بین نانوسیال و دیواره‌های میکروکانال، دارای مقدار حداکثر می‌باشد و در طول میکروکانال با افزایش  $x$ ، به دلیل افزایش دمای نانوسیال، کاهش پیدا می‌کند. در خروجی میکروکانال که دمای نانوسیال و دمای دیواره‌ی میکروکانال بسیار به هم نزدیک می‌شوند، مقدار عدد ناسلت بسیار کم می‌باشد. در عددهای رینولدز مختلف با افزایش کسرحجمی نانوذرات، عدد ناسلت موضعی افزایش پیدا می‌کند. چون با افزایش کسرحجمی نانوذرات، عملکرد حرارتی نانوسیال به دلیل ضریب هدایت حرارتی بالای نانوذرات زیاد می‌شود. در عددهای رینولدز پایین، افزایش عدد ناسلت تحت تاثیر افزایش کسرحجمی نانوذرات کمتر می‌باشد. چون در رینولدزهای پایین، سرعت جریان کم می‌باشد و زمان کافی برای تبادل انتقال حرارت بین نانوسیال و دیواره‌های میکروکانال وجود دارد و دمای نانوسیال افزایش پیدا می‌کند و به دمای دیواره‌ی میکروکانال می‌رسد و اختلاف دمای نانوسیال و دیواره‌های میکروکانال کم می‌شود.

شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول دیواره‌ی میکروکانال در  $Re=100$ ،  $\beta^*=0.01$  و کسر حجمی‌های مختلف

اثر مقادیر مختلف ضریب لغزش بر عدد ناسلت در شکل ۸ برای  $Re=100$  و  $\phi=2\%$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱۰۰ مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز و ضریب لغزش افزایش پیدا می‌کند. در ورودی میکروکانال، عدد ناسلت به دلیل اختلاف زیاد دما بین نانوسیال و دیواره‌های میکروکانال، دارای مقدار حداکثر می‌باشد و در طول میکروکانال با افزایش  $x$ ، به دلیل افزایش دمای نانوسیال، کاهش پیدا می‌کند. مقدار عدد ناسلت در خروجی میکروکانال که دمای نانوسیال و دمای دیواره‌ی میکروکانال بسیار به هم نزدیک می‌گردند، بسیار کم می‌شود. در اعداد رینولدز مختلف با افزایش ضریب لغزش، عدد ناسلت موضعی افزایش پیدا می‌کند. چون با افزایش ضریب لغزش، گرادیان دما در طول دیوار گرم شده میکروکانال زیاد می‌شود. در رینولدزهای پایین، افزایش عدد ناسلت تحت تاثیر افزایش ضریب لغزش کمتر است اما هر چه عدد رینولدز بیشتر می‌شود، افزایش عدد ناسلت با افزایش ضریب لغزش مشهودتر می‌باشد. زیرا در رینولدزهای پایین، سرعت نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال کم می‌باشد و زمان کافی برای تبادل انتقال حرارت بین نانوسیال و دیواره‌های میکروکانال وجود دارد و دمای نانوسیال زیاد شده و به دمای دیواره‌ی میکروکانال می‌رسد و اختلاف دمای نانوسیال و دیواره‌ی میکروکانال کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۸: تغییرات عدد ناسلت موضعی در طول دیواره‌های میکروکانال در  $\phi=2\%$  برای ضریب لغزش‌های مختلف

### ۷-۲- بررسی تاثیر کسر حجمی نانوسیال:

شکل ۹ تاثیرات کسر حجمی نانوسیال را بر روی پروفیل دمای بی بعد روی خط عمودی میکروکانال ( $x=0.6L$ )، به ازای  $Re=10$  و  $\beta^*=0.1$  و رینولدز ورودی از سوراخ‌های دیوار پایین برابر با ۱ در مقادیر مختلف کسر حجمی نانو ذرات مشخص شده است.



ناسلت در ورودی میکروکانال رخ می‌دهد. ضریب لغزش اثر قابل توجهی بر سرعت لغزشی نانوسیال در نزدیکی دیواره‌های میکروکانال دارد. به گونه‌ای که با افزایش ضریب لغزش، جریان به رژیم لغزشی نزدیکتر می‌شود. با افزایش عدد رینولدز عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند. در اعداد رینولدز مختلف با افزایش ضریب لغزش، عدد ناسلت زیاد می‌شود. در عددهای رینولدز پایین، افزایش عدد ناسلت تحت تاثیر افزایش ضریب لغزش کمتر می‌باشد و هر چه عدد رینولدز زیادتر می‌شود، افزایش عدد ناسلت با افزایش ضریب لغزش مشهودتر می‌باشد.

همچنین اعمال تزریق باعث افزایش سرعت لغزشی در طول دیواره‌ی میکروکانال می‌گردد.

در پژوهش حاضر با در نظر گرفتن تزریق از روی دیواره و همچنین جریان در رژیم لغزشی، برای نخستین بار تاثیر تزریق بر سرعت لغزشی از روی دیواره‌ی میکروکانال مورد مطالعه قرار گرفت.

#### فهرست علائم

Pr	عدد پراتل
$C_p$	گرمای ویژه (J/kgK)
Nu	عدد ناسلت
$Nu_x$	عدد ناسلت موضعی
$Nu_m$	عدد ناسلت میانگین
Re	عدد رینولدز
$U_s$	سرعت لغزشی بی بعد
T	دما (K)
U	مولفه سرعت بی بعد در راستای X
V	مولفه سرعت بی بعد در راستای Y
X, Y	راستای بی بعد طول، عرض

#### علائم یونانی

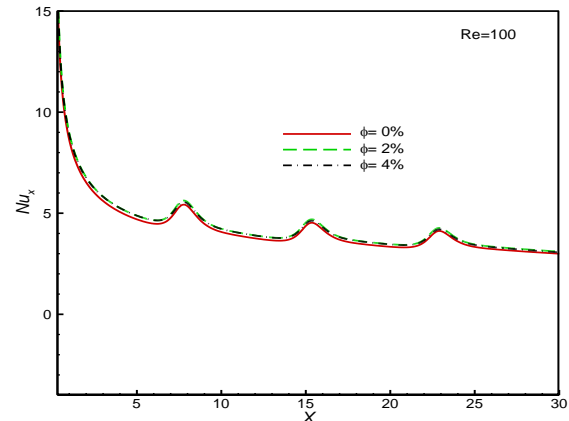
$\rho$	چگالی $kg/m^3$
$\phi$	کسر حجمی
$\beta^*$	ضریب لغزش بی بعد
$\mu$	لزجت Pa.s

#### زیر نویس‌ها

f	سیال
nf	نانوسیال

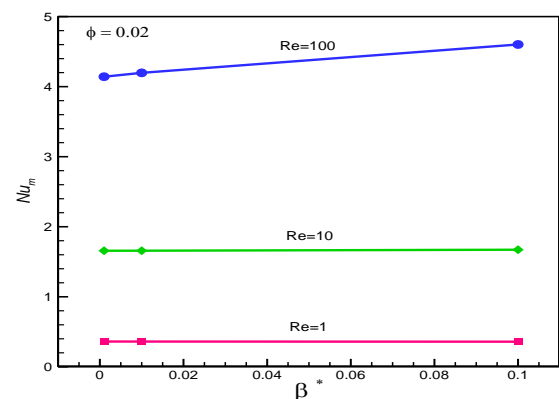
#### ۹- مراجع:

[1] J.C. Maxwell, "A Treatise on electricity and magnetism", *second ed., Clarendon Press, Oxford, UK, 1881.*



در شکل 11 مقادیر ناسلت متوسط روی دیوار میکروکانال برای ضریب لغزش‌های مختلف نشان داده شده است. عدد ناسلت متوسط با افزایش ضریب لغزش زیاد می‌شود، به دلیل اینکه با افزایش ضریب لغزش، گردابان دما در طول دیوار گرم شده‌ی میکروکانال افزایش می‌یابد و در نتیجه عدد ناسلت متوسط زیاد می‌شود.

در عددهای رینولدز پایین، افزایش عدد ناسلت متوسط تحت تاثیر افزایش ضریب لغزش کمتر می‌باشد.



شکل ۱۱: تغییرات عدد ناسلت متوسط برای مقادیر مختلف رینولدز و ضریب لغزش

#### ۸- نتیجه گیری:

انتقال حرارت جابجایی اجباری نانوسیال تشکیل شده از آب و ذرات اکسید آلومینیوم در میکروکانال دوبعدی، افقی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. دیواره‌ی بالایی میکروکانال تحت دمای ثابت و بر روی دیواره‌ی پایین سه عدد سوراخ به منظور تزریق جریان قرار دارد و سایر قسمت‌های دیوار پایین عایق می‌باشد.

عدد ناسلت با زیاد شدن عدد رینولدز و کسر حجمی نانوذرات افزایش پیدا می‌کند. در عددهای رینولدز مختلف با افزایش کسر حجمی نانوذرات، عدد ناسلت موضعی زیاد می‌شود. هر چه عدد رینولدز بیشتر شود، افزایش عدد ناسلت با افزایش کسر حجمی نانوذرات مشهودتر می‌باشد.

سرعت لغزشی با افزایش ضریب لغزش، افزایش می‌یابد اما مقدار عدد ناسلت در خروجی میکروکانال کاهش می‌یابد. مقدار ماکزیمم عدد

- [12] Sheikhzadeh, G. A., Ebrahim Qomi, M., Hajialigol N., Fattahi A., Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nanofluid on heat transfer and pressure drop in a three-dimensional microchannel, *International Journal Nano Dimens*, Vol. 34, pp. 281- 288, 2013.
- [13] Ho, C. J., Wei, L. C., Li, Z. W., An Experimental Investigation of Forced Convective Cooling Performance of a Microchannel Heat Sink with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Water Nanofluid, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp. 96–103, 2010.
- [14] S.Tahir, M.Mital, " Numerical investigation of laminar nanofluid developing flow and heat transfer in a circular channel", *Applied Thermal Engineering*, vol. 39, pp.8-14, 2012.
- [15] M. Izadi, A. Behzadmehr, D. Jalali-Vahida, Numerical study of developing laminar forced convection of a nanofluid in an annulus, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 48, pp. 2119-2129, 2009.
- [16] Peng-Fei Hao Xi-Wen, Zhang Zhao-Hui, Yao Feng He. "Transitional and turbulent flow in a circular microtube", *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. 423–431, 2007.
- [17] M. Nazari, M. Ashouri, M.H. Kayhani, Experimental investigation of forced convection of nanofluids in a horizontal tube filled with porous medium, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 7, pp. 109-116, 2014.
- [18] Hatami M., Ganji, D. D., Thermal and flow analysis of microchannel heat sink (MCHS) cooled by Cu–water nanofluid using porous media approach and least square method, *Energy Convers. Manag.*, Vol. 78, pp. 347–358, 2014.
- [19] Maiga, S.E.B.; Nguyen, C.T.; Galanis, N.; Roy, G.; "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube", *Superlattices and Microstructures*, vol. 35, pp. 543–557, 2004.
- [20] Maiga, S.E.B.; Nguyen, C.T.; Galanis, N.; Roy, G.; "Hydrodynamic and thermal behaviours of a nanofluid in a uniformly heated tube", *Computational Studies*, vol. 5, pp. 453–462, 2004.
- [21] Li. J., Kleinstreuer.C., " Thermal performance of nanofluid flow in microchannels", *International Journal. of Heat and Fluid Flow*, vol. 29, pp. 1221-1232, 2008.
- [22] Anoop. K., Sadr. R., Yu. J., Kang. S., Jeon. S., Banerjee. D., "Experimental study of forced convective heat transfer of nanofluids in a microchannel", *International Communications*
- [2] A. Malvandi, D.D. Ganji, Magnetic field effect on nanoparticles migration and heat transfer of water/alumina nanofluid in a channel, *Journal Magn.Magn.Mater*, vol. 36, pp. 172–179, 2014.
- [3] A. Malvandi, D.D. Ganji, Brownian motion and thermophoresis effects on slip flow of alumina/water nanofluid inside a circular microchannel in the presence of a magnetic field, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 84, pp. 196–206, 2014.
- [4] H. Aminfar, M.Nasiri, M. Khezerloo, Numerical investigation of entropy generation of nanofluid in vertical sinusoidal channel with magnetic field, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 87-94, 2015.
- [5] P. Ramian, M. Taebie Rahni, A. Adamian, Computational Simulation of Effects of Nanofluidity and Flow Boundaries on Natural Heat Transfer in Presence of Magnetic Field, Using LBM, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 167-178, 2015.
- [6] O. Mokrani, B. Bourouga, C. Castelain, H. Peerhossaini, Fluid flow and convective heat transfer in flat microchannels, *International Journal Heat Mass Transf.*, vol. 52, pp. 1337–1352, 2009.
- [7] A. Malvandi, D.D. Ganji, Effects of nanoparticle migration and asymmetric heating on magnetohydrodynamic forced convection of alumina/water nanofluid in microchannels, *Eur. J. Mech.-B/Fluids*, vol. 52, pp. 169–184, 2015.
- [8] A. Akbarinia, M. Abdolzadeh, R. Laur, Critical investigation of heat transfer enhancement using nanofluid in microchannels with slip and non-slip flow regimes, *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, pp. 556-565, 2011.
- [9] A. Behzadmehr, M. Saffar-Avval, N. Galanis, Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 28, pp. 211-219, 2007.
- [10] R. Kamali, A.R. Binesh, Numerical Investigation of Heat Transfer Enhancement Using Carbon Nanotube Non-Newtonian Nanofluids, *International Communication in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, pp. 1153-1157, 2010.
- [11] Nemati H., Farhadi M., Sedighi K., Ashor-nejad H.R., Fattahi E., "Magnetic Field Effects on Natural Convection Flow of Nanofluid in a Rectangular Cavity Using the Lattice Boltzmann Model", *Scientia Iranica*, Vol .19, pp.303-310, 2012.

*Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 419, pp. 420- 428, 2016.

[33] S.M. Aminossadati, A.Raisi, B.Ghasemi, "Effects of magnetic field on nanofluid forced convection in a partially heated microchannel", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 46, pp. 1373-1382, 2011.

[34] Patel, H. E., Sundararajan T., Pradeep T., Dasgupta A., Dasgupta N., Das, S. K., A Micro Convection Model for Thermal Conductivity of Nanofluids, *Pramana Journal Phys* , Vol. 65, no. 5, pp. 863–869, 2005.

[35] Raisi, A., Ghasemi, B., and Aminossadati, S. M., "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, vol. 59, pp. 114-129, 2011.

*in Heat and Mass Transfer*, vol. 39, pp. 1325-1330, 2012.

[23] M. Shariat, A. Akbarinia, A. Hossein Nezhad, A. Behzadmehr, R. Laur, Numerical study of two phase laminar mixed convection nanofluid in elliptic ducts, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 2348-2359, 2011.

[24] O. Manca, S. Nardini, D. Ricci, Numerical investigation of air forced convection in channels with differently shaped transverse ribs, *International Journal. Numer. Method Heat Fluid Flow*, vol. 21, pp. 618-639, 2010.

[25] F. Bazdidi Tehrani, M. Sedaghatnejad, N. Ekrami, I. Vasefi, Single Phase and Two Phase Analysis of Mixed Convection of Nanofluid Flow in Vertical Rectangular Duct under an Asymmetric Thermal Boundary Condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 13, pp. 47-58, 2015.

[26] B. C. Park, Y. I. Cho, Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, *Experimental. Heat Transf.*, vol. 11, pp. 151-170, 1998.

[27] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. Williams, "Heat Transfer of Aqueous Suspension of Carbon Nanotube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240-250, 2006.

[28] Bhattacharya P., Samanta, A. N., Chakraborty S., Numerical Study of Conjugate Heat Transfer in Rectangular Microchannel Heat Sink with  $Al_2O_3$ -H<sub>2</sub>O Nanofluid, *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, no. 10, pp. 1323–1333, 2009.

[29] Jung, J., Oh, H., Kwak, H., "Forced convective heat transfer of nanofluids in microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, pp. 466-472, 2009.

[30] M.M. Rahman, M.A. Al-Lawatia, I.A. Eltayeb, N. Al-Salti, "Hydromagnetic slip flow of water based nanofluids past a wedge with convective surface in the presence of heat generation (or) absorption", *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 57, pp. 172-182, 2012.

[31] A. Santra, S.Sen, N. Chakraborty, "Study of Heat Transfer Due to Laminar Flow of Copper-Water Nanofluid through Two Isothermally Heated Parallel Plates", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 391-400, 2009.

[32] A. Karimipour, A. Taghipour, A. Malvandi, "Developing the laminar MHD forced convection flow of water/FMWNT carbon nanotubes in a microchannel imposed the uniform heat flux",