

بررسی اثرات سرعت لغزشی و پرش دمایی بر جریان درون میکروکانال

چکیده: میکروکانال مبدل حرارتی کوچک و کارآمدی است که با تلفیق ویژگی‌های نظیر ضریب انتقال حرارت بالا، حجم سیال مورد نیاز اندک و وزن و ابعاد کوچک، ابزار بسیار کارآمدی در زمینه مقاصد انتقال حرارتی است. در این مقاله، سرعت لغزشی و پرش دمایی بر جریان درون میکروکانال بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در هر عدد رینولدزی سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده، درحالی‌که باعث می‌شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد. توزیع سرعت در میکروکانال (سرعت لغزشی) در مقایسه با جریان کوانتومی، پهن‌تر و پخت‌تر می‌گردد. سرعت در خط مرکزی (سرعت ماکزیمم) با افزایش سرعت لغزشی، در هر عدد رینولدزی کاهش می‌یابد. سرعت ماکزیمم در جریان توسعه یافته در حدود ۲۵ درصد با افزایش عدد نادسن تا ۰/۱، کاهش می‌یابد، اما این اثر بر روی رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. در اعداد نادسن و پرش دمایی مختلف، افزایش سرعت لغزشی و پرش دمایی، اثرکاهشی بر روی دما در هر مقطع دارد. همچنین میکروکانال منحنی همانند میکروکانال مستقیم عمل می‌نماید. افزایش کسر حجمی نانوسیال، باعث افزایش عدد ناسلت محلی در رژیم جریان لغزشی و رژیم جریان غیر لغزشی می‌شود.

واژه های راهنما: میکروکانال، سرعت لغزشی، پرش دمایی، مقیاس نانو، عدد ناسلت.

الیاس رستمی

دکتری مهندسی هوافضا، مدرس
دانشکده فنی و حرفه ای
علامه حسن زاده آملی، آمل

امید حبیبی

کارشناسی ارشد مهندسی
هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه
نصیرالدین طوسی، تهران

بهرام جلیلی*

استادیار، دانشکده مهندسی
مکانیک، دانشگاه آزاد تهران
شمال، تهران

مقاله علمی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۹

پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲

Elyas Rostami
PhD in Aerospace
Engineering, Allameh
Hassanzadeh Amoli
University, Amol

Omid Habibi
MSc of Aerospace
Engineering, K.N.Toosi
University of
Technology, Tehran

Bahram Jalili*
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Islamic
Azad University, North
Tehran Branch, Tehran

Investigation of the effects of slip velocity and temperature jump on the internal flow at microchannel

Abstract: Microchannel is a small and efficient heat exchanger which, by combining some features such as high heat transfer coefficient, low fluid volume required and small weight and dimensions, is a very efficient tool in the field of heat transfer purposes. In this article, the slip velocity and temperature jump on the internal flow of the microchannel are investigated. The results show that in each Reynolds number, the slip velocity increases the velocity near the wall, while decreasing the maximum velocity in the center line. The velocity distribution in the microchannel (slip velocity) becomes wider compared to the quantum flow. The velocity in the center line (maximum velocity) decreases with each Reynolds number as the sliding velocity increases. The maximum velocity during the developed flow decreases by about 25% as the Knudsen number increases to 0.1, but this effect is greater on higher Reynolds numbers. In Knudsen numbers and different temperature jumps, increasing slip velocity and temperature jump has a decreasing effect on the temperature at each section. Curved microchannel acts as a direct microchannel. Increasing the nanofluid volume fraction increases the local Knudsen number at slip-flow and non-slip-flow regime.

Keywords: Microchannel, Slip Velocity, Temperature jump, Nano scale, Nusselt Number.

۱- مقدمه

مورینی [۲] کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی را در مورد انتقال حرارت میکروکانال‌ها خلاصه‌بندی نمود. رزا و همکاران [۹] نیز کارهای عددی و آزمایشگاهی را در مورد انتقال حرارت تک‌فاز میکروکانال‌ها با تاکید بر روی اثرات مقیاس‌بندی، بازنگری و بیان نمودند. آن‌ها نتیجه‌گیری نمودند که نظریات کلاسیک انتقال حرارت و جریان سیال منطقی هستند ولی اثرات مقیاس‌بندی نیز باید در نظر گرفته شوند. سپس عبارات مناسبی را برای موضوع ذکر شده تحت شرایط مختلف طبقه‌بندی نمودند. در اوایل دهه ۱۹۸۰ اولین بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی انتقال حرارت میکروکانال‌ها صورت پذیرفت که می‌توان به تحقیقات و آزمایشات آقایان توکرمن و پیسی [۱۱]، هارمز و همکاران [۱۲]، مالا و لی [۱۳]، ژوو و همکاران [۱۴]، جودی و همکاران [۱۵]، هلدن و همکاران [۱۶]، وو و چنگ [۱۷]، لی و السن [۱۸]، هرنجک و تو [۱۹]، سیلوا و همکاران [۲۰]، وانگ و وانگ [۲۱] و الجنک و یانگ [۲۲] اشاره نمود. مطالعات و بررسی‌های روی جریان لغزشی بر اساس معادلات ناویر-استوکس و معادله انرژی است و جریان لغزشی در این معادلات به شکل شرط مرزی حضور پیدا می‌کند. این شرایط مرزی جدید، سرعت لغزشی و پرش دمایی را بیان می‌کنند. در واقع باید مشخص شود که سرعت جریان در مجاورت دیواره جامد صفر نیست و دما نیز در مجاورت دیواره، برابر با دمای دیواره نخواهد بود و هرکدام از این‌ها از رابطه‌ی خاصی پیروی می‌کنند. شرایط جریان لغزشی به وسیله مفهوم طول لغزش به‌خوبی قابل توضیح است. طول لغزش مسافتی در پشت سطح تماس است که در آن مقدار سرعت با برون‌یابی صفر می‌گردد. اندازه این طول، درجه لغزش و یا عدم لغزش را تعیین می‌نماید. طول لغزش به شماری از فاکتورها از قبیل فعل و انفعال سیال-سیال و دیواره-سیال، چگالی سیال، دمای سیستم و نرخ تنش تحمیلی و غیره بستگی دارد. در صورتی که مقدار طول لغزش صفر باشد، سرعت روی سطح جامد صفر شده و جریان بدون لغزش است و زمانی که طول لغزش بی‌نهایت شود، لغزش کامل اتفاق می‌افتد. در لغزش کامل سرعت در تمام سطح مقطع ثابت و برابر با سرعت میانگین است و بدین‌گونه می‌توان گفت جریان پلاگ رخ داده است. در صورتی که طول لغزش بین صفر تا بی‌نهایت باشد، لغزش جزئی رخ داده است. امروزه با پیشرفت تکنیک‌های ساخت و تولید قطعات در ابعاد میکرو، نیاز به روش‌های نوین در شبیه‌سازی سیالات در این ابعاد وجود دارد. در مقیاس‌های میکرو و نانو و با بالا رفتن عدد نادنسن شاهد تغییرات چشمگیری در رفتار سیالات هستیم.

زمینه‌ی میکرو و نانوسیال زمینه‌ی بسیار مهمی است که کاربردهای متعددی از جمله کارهای آزمایشگاهی، استخراج نفت، صنایع تصفیه، مسائل انتقال حرارت، صنایع کاغذسازی، روانکاری، پوشش سطح، علم مواد، علوم زیستی و غیره دارد.

با توجه به این کاربردهای بسیار گسترده، دانشگاه‌های بسیار معتبر دنیا از جمله ام‌آی‌تی^۱، کرنل^۲ و غیره اقدام به تاسیس آزمایشگاه مستقلی به همین نام نموده‌اند. حتی در برخی از کشورها مانند آلمان انستیتوی مستقلی به همین نام ایجاد گردیده است.

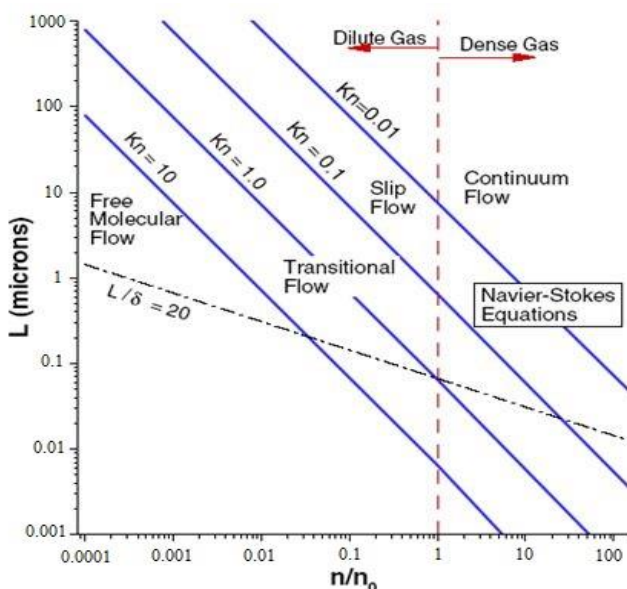
جریان لغزشی در میکروکانال‌ها در حالت کلی در حل معادلات بدست آمده از موازنه‌های سرعت و انرژی که معمولاً سرعت روی سطوح جامد، صفر و دما برابر دمای جامد فرض می‌شود، مورد بحث واقع می‌گردد. این فرض در حل معادلات به عنوان شرط مرزی در مسئله قرار داده می‌شود. اما استفاده از این شرایط همیشه درست نیست. هلمهولتز و ونیپوتروسکیمشاهداتی درباره لغزش بین مایع و سطح جامد داشتند که بعدها بردمن نتایج آن‌ها را تایید نمود. ناویر در سال ۱۸۲۳ برای اولین بار به مدل کردن لغزش جزئی مایعات در دیواره جامد پرداخت که پس از آن ماکسول همین کار را در ۱۸۷۹ در مورد گازها انجام داد. در حضور سرعت لغزشی، سرعت در مجاورت جریان غیرصفر است و یک پرش دمایی نیز وجود دارد (اختلاف محدودی بین دمای دیواره‌ی جامد و دمای سیال در مجاورت جامد وجود دارد). سرعت غیر صفر جریان و پرش دمایی در مجاورت دیواره‌های جامد بیشترین اثرات هیدرودینامیکی و حرارتی هستند که می‌توانند در سیالی که جریان لغزشی برای آن صادق است، بررسی شوند. جریان لغزشی در میکروکانال‌ها ممکن است در دو مورد بررسی گردند: (۱) وقتی دیواره‌های میکروکانال در دمای ثابت و یکنواختی گرم می‌شوند (حالت دما ثابت). (۲) زمانی که دیواره‌های میکروکانال در شارحرارتی ثابت و یکنواختی گرم می‌شوند (حالت شار ثابت).

تحقیقات مختلفی بر روی میکروکانال‌ها تا به امروز صورت پذیرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به مقالات مروری آقایان هو و تای [۱]، مورینی [۲]، استون [۳]، اسکویبرزوکواک [۴]، استینک و کاندلیکار [۵]، رنکسیزبولوت و همکاران [۶]، هو و لی [۷]، کرای و همکاران [۸]، رزا و همکاران [۹]، شآو و همکاران [۱۰] اشاره کرد.

² Cornell¹ MIT

به کارگیری معادلات ناویر- استوکس نسبت به نتایج تجربی اختلاف زیادی از خود نشان می‌دهد و معادلات ناویر- استوکس دیگر صادق نیستند و لذا نمی‌توان از آن استفاده نمود و باید از معادلات جایگزین با دقت بالاتری استفاده کرد.

۴) رژیم مولکولی آزاد یا رژیم گسسته: این رژیم عدد نادسن بزرگ‌تر از ۱۰ را شامل می‌شود و در این رژیم دیگر نمی‌توان از فرضیات محیط پیوسته استفاده کرد. این رژیم در واقع دنیای گسسته سیالات است و از آن پس وارد گستره‌ی نانو می‌گردد. برای تحلیل جریان در این ناحیه، از روش‌های آماری استفاده می‌شود که یکی از سودمندترین آن‌ها روشی موسوم به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو بوده که توجه بسیاری از محققان را در زمینه حل عددی به خود جلب کرده است. این روش نیازمند توان محاسباتی بالایی است، به همین جهت این روش‌ها در دهه‌های اخیر با گسترش توان محاسباتی رایانه‌ها پرکاربرد شده‌اند. لازم به یادآوری است که روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو به دلیل دارا بودن ساختار کاملاً مولکولی علاوه بر تحلیل رفتار جریان سیال در رژیم گسسته، برای تمامی رژیم‌های دیگر نیز صادق است ولی کارایی این روش در جریان‌های با سرعت پایین به شدت کاهش می‌یابد. در شکل (۱) ناحیه‌های مختلف جریان بر حسب عدد نادسن مشاهده می‌گردد.



شکل ۱ تقسیم بندی رژیم‌های جریان با توجه به عدد نادسن

[۲۳]

تاوسکولچای و شولته [۲۴] به ساخت کانال‌های جریان برای سیستم‌های میکروسیالی پرداختند. ناصری و همکاران [۲۵] به بررسی شرایط جریان در میکروکانال‌ها پرداخته‌اند. هی و

خوشبختانه در میکرو ابزارهای موجود همواره عدد نادسن زیر ۱ است و لذا اکثر مواقع در رژیم جریان پیوسته و یا نهایتاً لغزشی هستیم و در کمتر مواردی به رژیم گذرا نزدیک می‌شویم. در رژیم‌های لغزشی همچنان معادلات ناویر- استوکس برقرار بوده ولی شرایط مرزی تغییراتی نسبت به حالت رژیم پیوسته دارد. در رژیم لغزشی شاهد شرط مرزی لغزشی سرعت و پرش دمایی می‌باشیم. تا چند دهه قبل جریان‌های گاز رقیق تنها در ارتفاعات بالا از سطح زمین دیده می‌شد ولی با پیشرفت علم مشخص شد که جریان‌های در مقیاس کوچک نیز دچار پدیده رقیقی گاز می‌شوند. در مقیاس‌های میکرو و نانو، میزان رقیقی سیال نسبت به مقیاس‌های ماکرو بسیار بیشتر است در نتیجه فرض پیوستگی معادلات سیال دیگر اعتبار ندارد و برای شبیه‌سازی جریان در مقیاس میکرو و نانو نیازمند روش‌های جدیدی است که بتوانند جریان‌های رقیق را نیز مدل نمایند. معیار تقسیم‌بندی جریان‌های مختلف، عدد نادسن است که برابر با تقسیم طول پویس آزاد مولکول‌های سیال بر طول مشخصه آن بوده و به صورت زیر قابل بیان است [۲۳]:

$$Kn = \frac{\lambda}{l} \quad (1)$$

عدد نادسن، عددی بی‌بعد می‌باشد که از نسبت مسافت آزاد میانگین مولکولی به مقیاس طول فیزیکی حاصل می‌شود. عدد نادسن به افتخار فیزیکدان دانمارکی مارتین نادسن، نامگذاری شده است. مقدار عدد نادسن مشخص‌کننده درجه‌ی رقیقی گاز و اعتبار فرض پیوستگی است. به کمک معیار عدد نادسن، رژیم‌های جریان را به ۴ دسته‌ی مجزا می‌توان تفکیک نمود.

۱) رژیم پیوسته: تا زمانی که عدد نادسن بسیار کوچک باشد (معمولاً کوچک‌تر از ۰/۰۰۱) و یا به عبارت دیگر طول مشخصه سیستم در مقیاسه با پویس آزاد مولکول‌ها بسیار بزرگ‌تر است، در رژیم پیوسته قرار داریم و رفتار سیال از روابط سیال در حالت پیوستگی (ناویر- استوکس) پیروی می‌نماید.

۲) رژیم لغزشی: این رژیم در محدوده‌ی عدد نادسن بین ۰/۰۰۱ و ۰/۱ قرار دارد. در محدوده این رژیم اگرچه وارد رژیم نیمه پیوسته شده‌ایم اما معادلات ناویر- استوکس هنوز صادق‌اند و می‌توان از آن‌ها برای تحلیل رفتار جریان سیال به شرط آن‌که پدیده لغزش سیال روی دیواره‌ها و شرط مرزی پرش حرارتی نزدیک دیواره به درستی مدل شود، استفاده کرد. ولی نتایج به دست آمده از این روش‌ها در بعضی مواقع دقت مناسبی ندارند.

۳) رژیم گذرا: در این رژیم عدد نادسن در محدوده بین ۰/۱ تا ۱۰ قرار داشته و در واقع حالت گذار از محیط پیوسته به محیط گسسته را نشان می‌دهد. در این رژیم، حل میدان جریان با

بنابراین معادلات حاکم همان معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی مرسوم هستند [۲۳].

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad \text{پیوستگی} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \right) \left(u^* u^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial y^*} \right) \left(u^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right) \quad \text{مومنتوم در جهت X} \\ & = \left(- \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{1}{Re} \right) \left(\frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^* \partial y^*} \right) \end{aligned} \quad (۳)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial}{\partial x^*} \right) \left(u^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right) \\ & + \left(\frac{\partial}{\partial y^*} \right) \left(v^* v^* - \left(\frac{1}{Re} \right) \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right) \quad \text{مومنتوم در جهت Y} \\ & = \left(- \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right) \\ & + \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{1}{Re} \right) \left(\frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right. \\ & \left. + \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^* \partial y^*} \right) \end{aligned} \quad (۴)$$

$$\begin{aligned} & u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} \\ & = \left(\frac{1}{Re Pr} \right) \left(\frac{\partial^2 T^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \right) \\ & + \left[\left(\frac{Br}{Re Pr} \right) \left(2 \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + 2 \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} \right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} + \frac{\partial v^*}{\partial x^*} \right)^2 \right] \\ & - \left(\frac{2}{3} \right) \left(\frac{Br}{Re Pr} \right) \left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \right)^2 \end{aligned} \quad \text{انرژی} \quad (۵)$$

برای بی‌بعدسازی معادلات حاکم و شرایط مرزی از پارامترهای زیر استفاده گردیده است [۲۳].

$$\begin{aligned} u^* &= \frac{u}{u_m}, v^* = \frac{v}{u_m}, x^* = \frac{x}{D_H}, y^* = \frac{y}{D_H} \\ Br &= \mu u_m^2 / k (T_i - T_w) \\ T^* &= (T - T_w) / (T_i - T_w), Kn = \frac{\lambda}{D_H}, \\ P^* &= (p - p_0) / \rho u_m^2, Pr = \frac{\mu c_p}{k}, \\ Re &= \frac{\rho u_m D_H}{\mu} \end{aligned} \quad (۶)$$

میزان انتقال حرارت در قالب عدد ناسلت بیان می‌گردد. برای تعریف عدد ناسلت، ابتدا دمای میانگین سیال، T_m^* تعریف

همکاران [۲۶] توسط شبیه سازی عددی و آزمایش‌ها به بررسی اثرات مخرب و آسیب‌های ناشی از حباب‌های موجود در کانال‌های میکروسیال پرداختند. آن‌ها برای جلوگیری از تشکیل حباب، تأثیر عواملی چون ساختار داخلی کانال، ترشوندگی داخلی و سرعت جریان مایع را مورد مطالعه قرار دادند. دینکائو و همکاران [۲۷] کاربردهای جریان تپنده در سیستم‌های میکروسیال را توضیح می‌دهند. ریو و همکاران [۲۸] به مقایسه آماده سازی نانوذرات لیپیدی با تزریق در میکروسیستم‌های مختلف پرداختند. آن‌ها بیان نمودند که سیستم‌های میکروسیالی می‌توانند ابزار مفیدی برای تولید نانوذرات لیپیدی باشند. جابری و همکاران [۲۹] به مطالعه‌ی سیستم‌های میکروسیالی با محفظه‌های کشت سلولی جاسازی شده برای سنجش‌های بیولوژیکی با توان بالا پرداختند. پنگ و همکاران [۳۰] یک استراتژی ساده و کم هزینه برای ساخت میکروکانال‌ها بر روی بستر سیلیکون بر اساس نوشتن جوهر قلم با نشانگر مستقیم و حکاکی شیمیایی با کمک فلز گزارش کرده‌اند. استراتژی پیشنهادی برای ساخت میکروکانال، آسان و مقرون به صرفه است و ساختارهای میکروکانال‌ها برای توسعه برنامه‌های کاربردی دستگاه‌های میکروسیال و میکروسنسورها امیدوار کننده است. پینهو و همکاران [۳۱] به تجسم و اندازه‌گیری سلول‌های خونی جریان یافته در سیستم‌های میکروسیالی و رئولوژی خون پرداخته‌اند. آن‌ها بیان نمودند که با ترکیب ویژگی‌های منحصر به فرد همورولوژی و فناوری میکروسیالی برای تجزیه و تحلیل تک سلولی، می‌توان به پیشرفت‌های ارزشمندی در پزشکی برای درمان‌های جدید و رویکرد تشخیص دست یافت. وانگ و همکاران [۳۲] به مطالعه‌ی طراحی سطح داخلی میکروکانال‌های کاربردی برای کنترل جریان در مقیاس کوچک پرداختند. نیکشاد و همکاران [۳۳] به تحقیق در رابطه با پیشرفت‌های فناوری میکروسیال در زیست‌شناسی تولید مثل پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های میکروسیال باعث بهبود کارایی در کمک به تولید مثل می‌شود.

۳- معادلات حاکم و شرایط مرزی

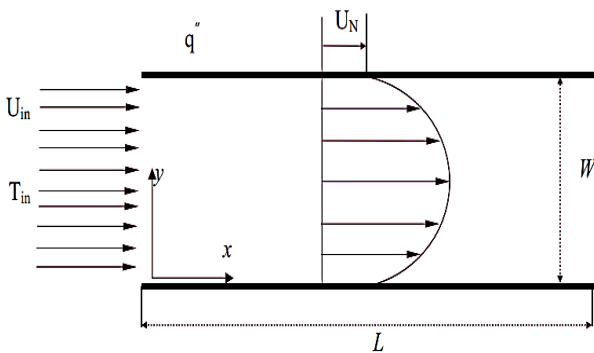
بر طبق آنچه که گذشت، در میکروکانال‌ها رژیم جریان به عدد ناسلت که بیانگر میزان رقیقی سیال است، رجوع داده می‌شود. جریان لغزشی در $10^{-1} < Kn < 10^{-3}$ رخ می‌دهد و برای مدل کردن آن از معادلات ناویر-استوکس همراه با شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دمایی روی دیواره‌ها، استفاده می‌شود.

$$T^* = 1, u^* = 1 \quad (14)$$

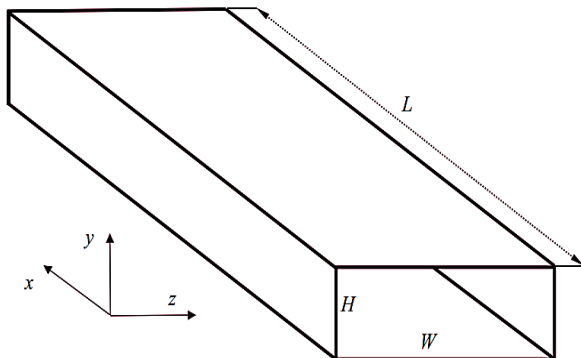
معادلات پیوستگی، مومنتوم و انرژی به همراه شرایط مرزی گفته شده به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری سازی شده اند [۳۶ و ۳۷]. برای حل همزمان کل معادلات حاکم، الگوریتم نیمه‌ضمنی سیمپلر [۲۳] استفاده شده است.

۴- میکروکانال مستقیم

در شکل‌های (۳ و ۲)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال مستقیم و در شکل‌های (۵ و ۴) نیز پروفیل و تغییرات سرعت بی‌بعد را برطبق معیارهای مختلف عدد نادسن و عدد رینولدز مشاهده می‌نماییم. در ادامه به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۲ نمایی از میکروکانال مستقیم [۲۳]



شکل ۳ نمایی کلی از میکروکانال مستقیم [۲۳]

می‌شود که انرژی حرارتی متوسط سیال را مشخص می‌نماید [۲۳].

$$T_m^* = (\int u^* T^* dy^*) / \int u^* dy^* \quad (7)$$

حال با استفاده از درجه حرارت متوسط می‌توان عدد ناسلت را تعریف نمود [۳۴].

$$Nu_x = -(2 \frac{\partial T^*}{\partial y^*})_w / T_m^* \quad (8)$$

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از مدل ماکسول [۳۵] مطابق معادله زیر استفاده می‌گردد.

$$u_{slip}^* = u_s^* - u_{wall}^* = - \left(\frac{2 - \sigma}{\sigma} \right) Kn \left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)_w + \frac{3}{4} Kn^2 \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left(\frac{\partial T^*}{\partial x^*} \right)_w \quad (9)$$

عبارت دوم سمت راست معادله، بیانگر اثر خزش حرارتی بر روی لغزش سرعت در دیواره‌ها است. همچنین در مورد پرش دمایی از مدل اسمولچوسکی استفاده می‌گردد [۲۳].

$$T_s^* = -2 k Kn \left(\frac{\partial T^*}{\partial y^*} \right)_w \quad (10)$$

$$k = \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{1}{Pr} \right) \quad (11)$$

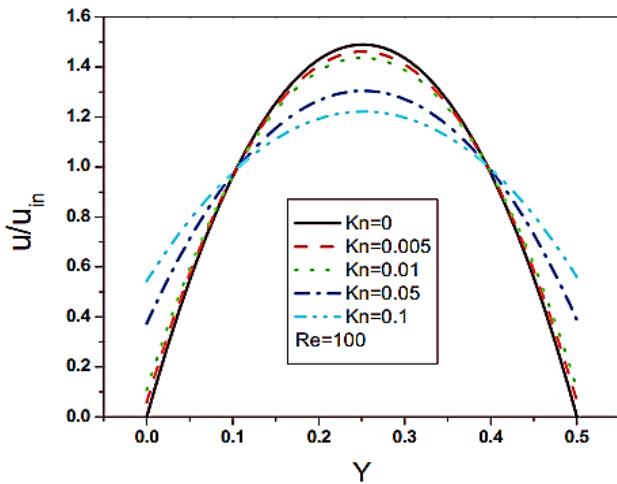
با توجه به تعریف پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته می‌توان شرط توسعه یافتگی هیدرودینامیکی در انتهای میکروکانال را به صورت زیر اعمال نمود [۲۳].

$$\left(\frac{\partial u^*}{\partial x^*} \right)_{x^*=L} = 0, v^* = 0 \quad (12)$$

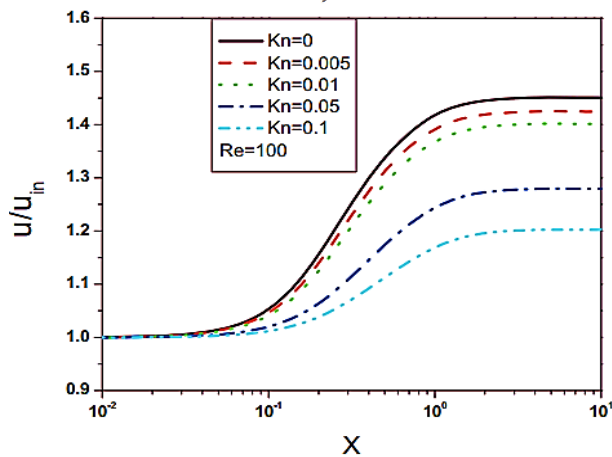
شرط مرزی تقارن در خط مرکزی میکروکانال به صورت رابطه زیر برقرار است [۲۳].

$$\left(\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \right)_{y^*=1/2} = 0, (v^*)_{y^*=1/2} = 0 \quad (13)$$

همچنین با توجه به یکنواخت بودن سرعت و دمایی ورودی، شرایط مرزی در ورودی میکروکانال به صورت زیر است [۲۳].



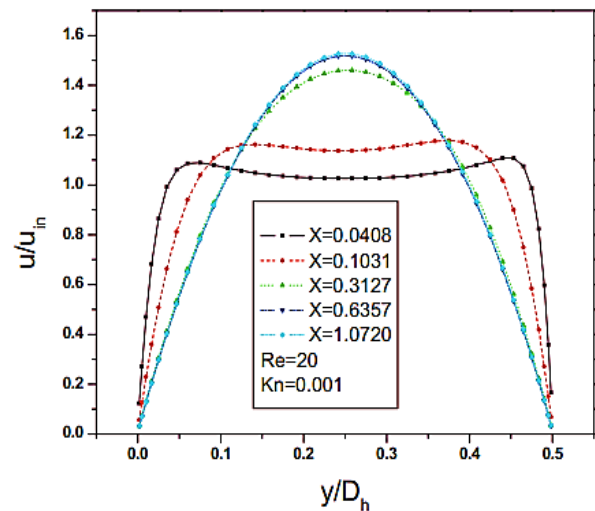
a)



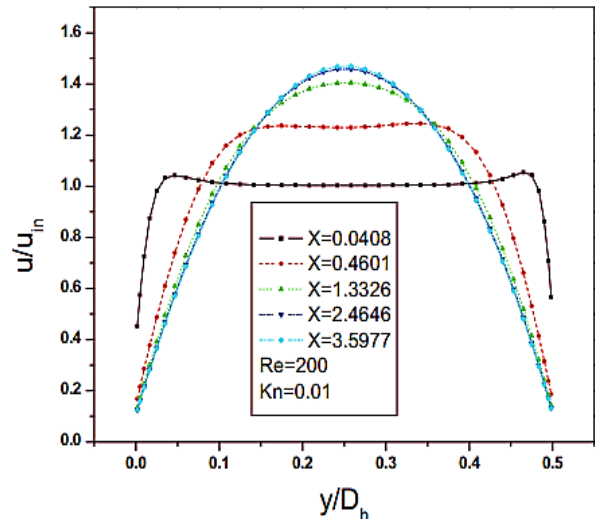
b)

شکل ۵ تغییرات سرعت بی بعد با عدد نادسن [۲۳]

در هر عدد رینولدزی سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده، درحالیکه باعث می شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد. مشخص است که توزیع سرعت در میکروکانال (سرعت لغزشی) در مقایسه با جریان کوانتومی ($kn=0$)، پهن تر و پخ تر می گردد. سرعت در خط مرکزی (سرعت ماکزیمم) با افزایش سرعت لغزشی (افزایش kn)، در هر عدد رینولدزی کاهش می یابد. سرعت ماکزیمم در جریان توسعه یافته در حدود ۲۵ درصد با افزایش عدد نادسن تا ۰/۱، کاهش می یابد.



a)



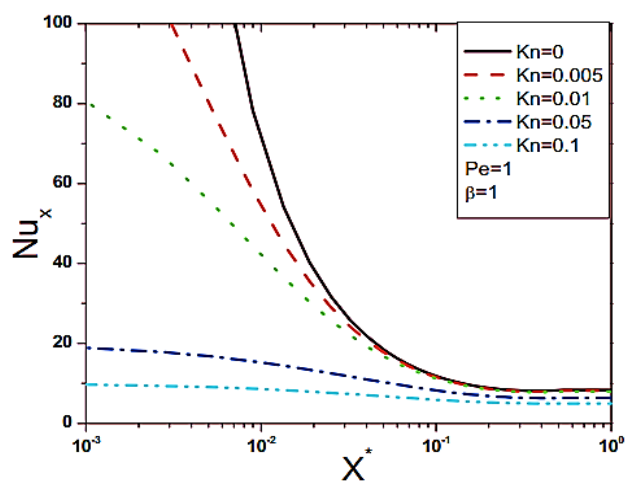
b)

شکل ۴ پروفیل سرعت بی بعد در

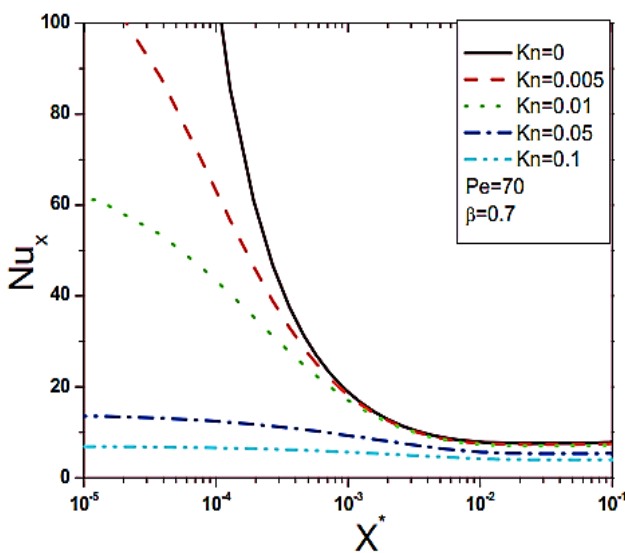
a) $Re=20, Kn=0.001$ and b) $Re=200, Kn=0.01$ [۲۳]

پروفیل سرعت در شروع میکروکانال دارای شیب زیادی در نزدیکی دیواره است و در مرکز به صورت یکنواخت در می آیند. با پیشروی در جهت x ، گرادیان سرعت نزدیک دیواره شروع به صاف شدن می کند تا به سرعت ماکزیمم در مرکز نزدیک می شود. شرایط توسعه یافتگی کامل برای $Re=20$ و $kn=0.001$ در $x=1.0720$ اتفاق می افتد. شرایط توسعه یافتگی کامل برای $Re=200$ و $kn=0.01$ در $x=3.5977$ اتفاق می افتد.

در شکل (۷) می‌توان تغییرات دمای بی‌بعد در خروجی میکروکانال را در اعداد نادسن و β های مختلف مشاهده نمود. در اعداد نادسن و پرش دمایی مختلف، افزایش سرعت لغزشی و پرش دمایی (افزایش Kn)، اثر کاهشی بر روی دما در هر مقطع دارد. اما این اثر زمانی که پرش دمایی بالا باشد (برای مقادیر کوچکتر $\beta = Pr(\gamma + 1)/2\gamma$)، مشهودتر است. کاهش پرش دمایی (با افزایش β) تاثیر قابل توجهی بر روی دما در هر مقطع عرضی مختلف برای مورد ($Kn=0.01$) ندارد، اگرچه افزایش Kn سبب می‌شود دمای سیال نزدیک دیواره، کاهش یابد. در شکل (۸) نیز اثرات سرعت لغزشی با توجه به عدد ناسلت مشخص گردیده است.

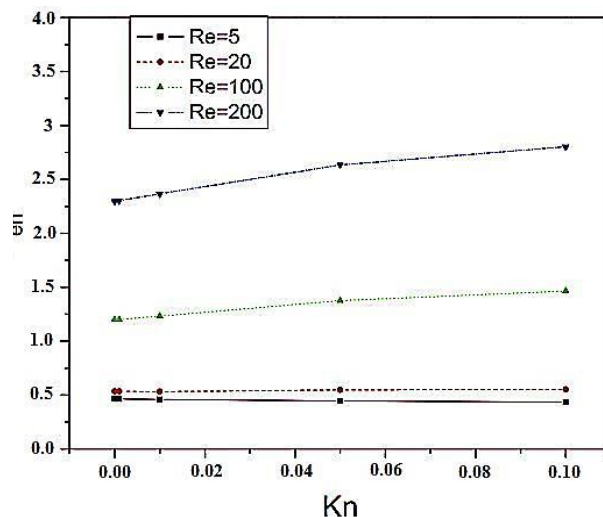


a)



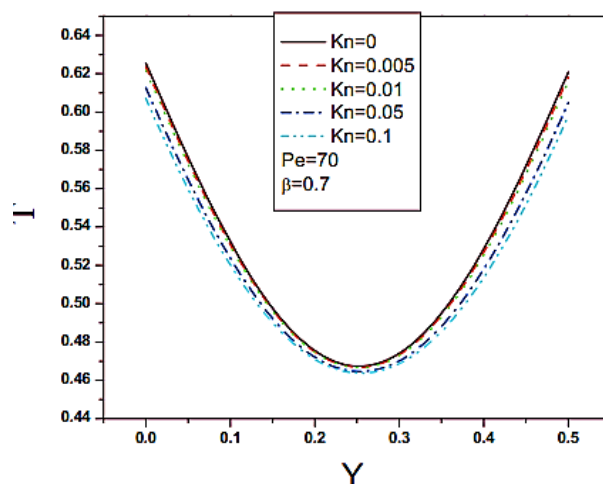
b)

شکل ۸ اثرات سرعت لغزشی بر روی عدد ناسلت
a) $Pe=1, \beta=1$ and b) $Pe=70, \beta=0.7$ [۲۳]

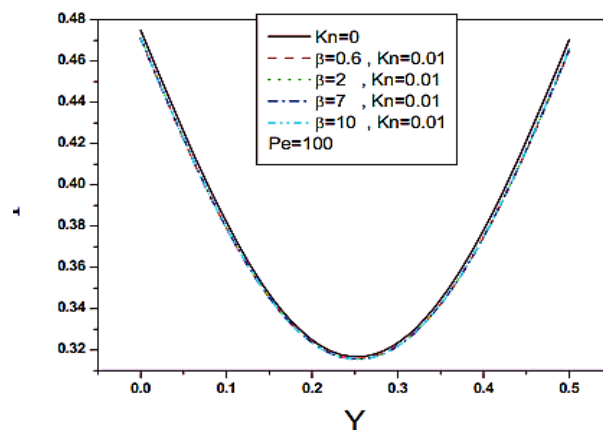


شکل ۶ اثر سرعت لغزشی بر روی طول ورودی بی بعد در رینولدزهای مختلف [۲۳]

شکل (۶) نشان می‌دهد که سرعت لغزشی اثر افزایشی بر روی طول ورودی در هر عدد رینولدزی دارد. اما این اثر بر روی رینولدزهای بالاتر، بیشتر است.



a)



b)

شکل ۷ تغییرات دمای بی‌بعد در خروجی [۲۳]

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_\theta}{r\partial\theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (15) \text{ پیوستگی}$$

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_r}{r\partial\theta} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\theta^2}{r} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{u_r}{r^2} \right) - \left(\frac{2}{r^2} \right) \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] - \frac{\partial P}{\partial r}$$

در مومنوم جهت r (16)

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_\theta}{r\partial\theta} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} - \frac{u_r u_\theta}{r} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{u_\theta}{r^2} \right) + \left(\frac{2}{r^2} \right) \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

در مومنوم جهت θ (17)

$$\rho \left(u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_z}{r\partial\theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = \mu \left[\left(\frac{1}{r} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \right] - \frac{\partial P}{\partial z}$$

در مومنوم جهت z (18)

$$\rho C_p \left(u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial T}{r\partial\theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r^2} \right) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \right]$$

انرژی (19)

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از معادله زیر استفاده می‌شود.

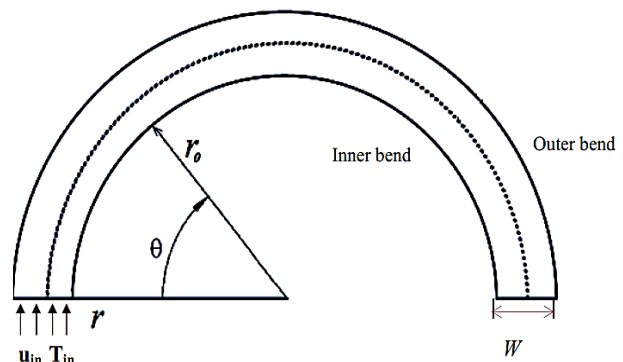
$$u_\theta = \left(\frac{2 - \sigma_u}{\sigma_u} \right) Kn Dh \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} \right)_w \quad (20)$$

در مورد پرش دمایی نیز از مدل زیر استفاده می‌گردد.

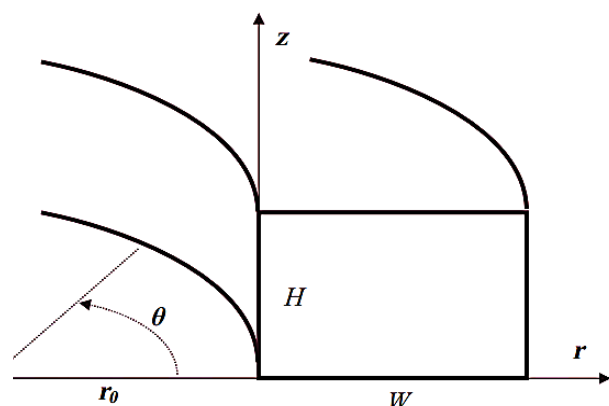
در جریان غیر لغزشی ($kn=0$)، در نزدیک ورودی میکروکانال ($x=0$)، عدد ناسلت از یک مقدار بی‌نهایت شروع می‌شود و در ادامه به شدت افت می‌یابد تا به مقدار توسعه یافتگی کامل برسد ($Nu \propto \frac{\beta}{kn} \xrightarrow{kn \rightarrow 0} Nu \rightarrow \infty$). در حضور سرعت لغزشی و پرش دمایی، عدد ناسلت از یک مقدار متناهی شروع می‌گردد. افزایش سرعت لغزشی (افزایش kn) و پرش دمایی (کاهش β) باعث افزایش پخش‌دگی (افقی شدن) نزدیک دیواره می‌گردد.

۵- میکروکانال منحنی

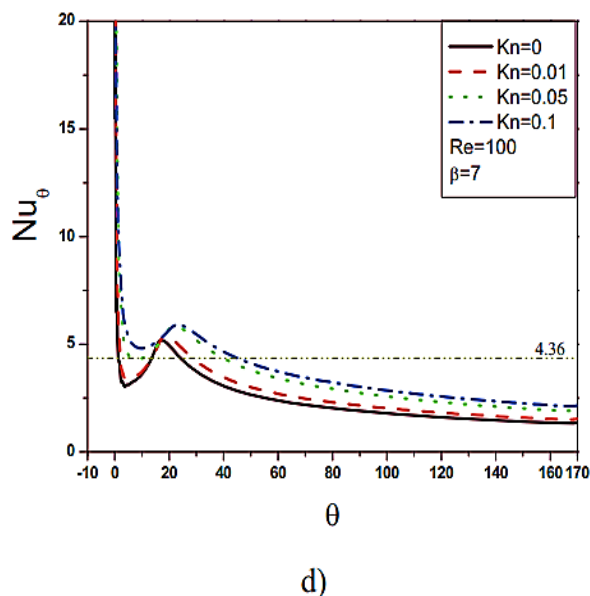
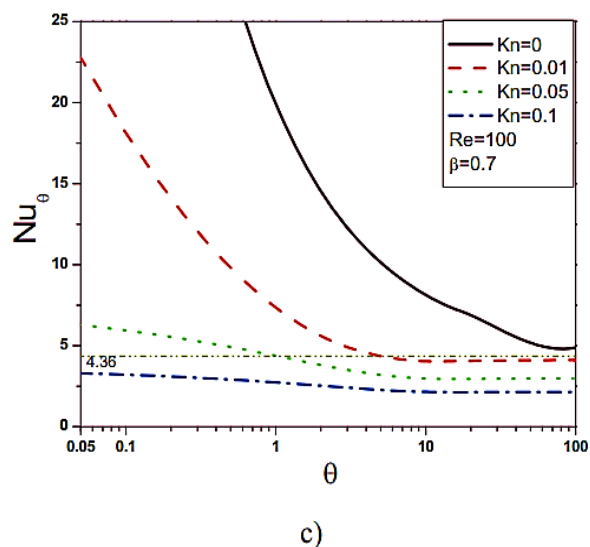
در شکل‌های (۹ و ۱۰)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال منحنی را مشاهده می‌نماییم. این نکته قابل ذکر است که باید فرم معادلات ناویر-استوکس و شرایط مرزی از مختصات کارتیزین به مختصات استوانه‌ای تغییر کند. در ادامه فرم معادلات در مختصات استوانه‌ای را نوشته و به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می‌نماییم.



شکل ۹ نمایی از میکروکانال منحنی [۲۳]



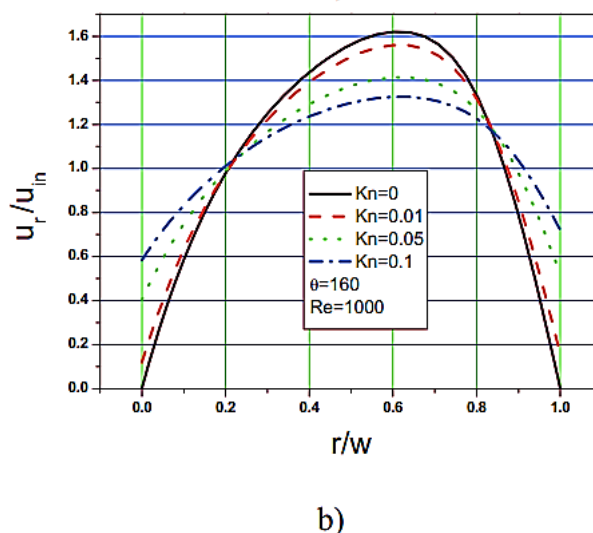
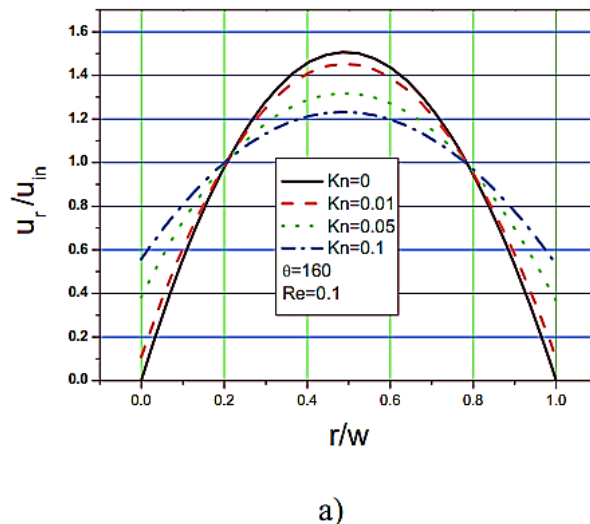
شکل ۱۰ نمایی کلی از میکروکانال منحنی [۲۳]



شکل ۱۲ عدد ناسلت محلی در ناسن های مختلف
[۲۳] c) Re=100, beta=0.7 and d) Re=100, beta=7

با توجه به شکل (۱۲) در می‌یابیم که اگرچه هم سرعت لغزشی و هم پرش دمایی با افزایش kn افزایش می‌یابد ولی نتایج نشان می‌دهند که عدد ناسلت برای پرش دمایی بالا ($\beta=0.7$)، کاهش می‌یابد اما عدد ناسلت محلی با افزایش kn برای پرش دمایی پایین ($\beta=7$)، افزایش می‌یابد. عدد $Nu=4.36$ برای جریان کاملاً توسعه یافته در کانال مستقیم می‌باشد. قابل ذکر است که عدد ناسلت کاملاً توسعه یافته در میکروکانال منحنی نزدیک $4/36$ می‌باشد. این نکته نشان می‌دهد که نیروی گریز از مرکز در میکروکانال منحنی اثر قابل توجهی بر روی انتقال حرارت ندارد.

$$T - T_w = \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{1}{Pr} \right) \times [Kn D_h \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_w] \quad (21)$$



شکل ۱۱ تغییرات پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته در میکروکانال منحنی با عدد ناسن [۲۳] (a) Re=0.1 and (b) Re=1000

همانطوری که در شکل (۱۱) مشاهده می‌گردد، در هر رینولدزی سرعت لغزشی باعث افزایش سرعت جریان نزدیک دیواره شده در حالیکه ماکزیمم سرعت جریان در خط مرکزی کاهش می‌یابد. توزیع سرعت در میکروکانال همراه با رژیم جریان لغزشی در مقایسه با رژیم جریان غیر لغزشی پیچ‌تر شده است. نیروی گریز از مرکز تأثیری در پروفیل سرعت جریان برای $Re=0.1$ ندارد، اگرچه برای $Re=1000$ ، پروفیل سرعت جریان به سمت انحنای بیرونی تمایل پیدا می‌کند.

۶- نانوسیال در میکروکانال

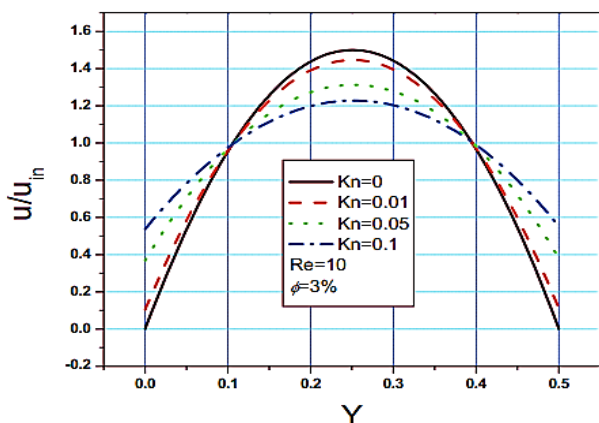
$$(\rho C_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s \quad \text{ظرفیت گرمایی نانوسیال (۲۷)}$$

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از معادله زیر استفاده می شود.

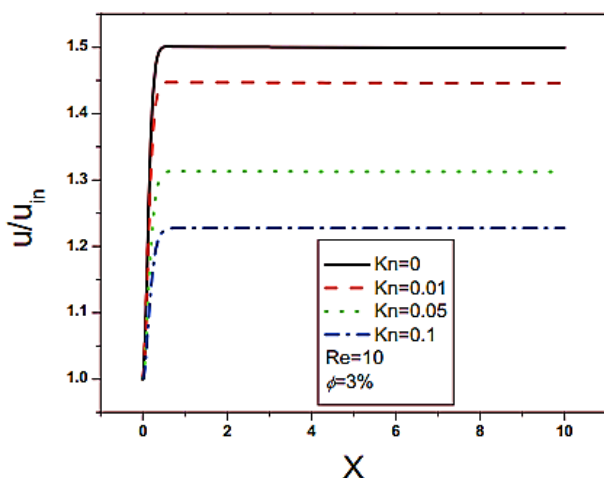
$$U = \left(\frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v}\right) Kn \left(\frac{\partial U}{\partial Y}\right)_w + \left[\frac{(3)Kn^2 Re}{2 \pi Ec}\right] \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma}\right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial X}\right)_w \quad (۲۸)$$

در مورد پرش دمایی نیز از مدل زیر استفاده می گردد.

$$\theta - \theta_w = \left(\frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T}\right) \left(2 \frac{\gamma}{\gamma + 1}\right) \left(\frac{1}{Pr}\right) [Kn \left(\frac{\partial \theta}{\partial Y}\right)_w + \left(\frac{Kn^2}{2!}\right) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2}\right)_w + \dots] \quad (۲۹)$$



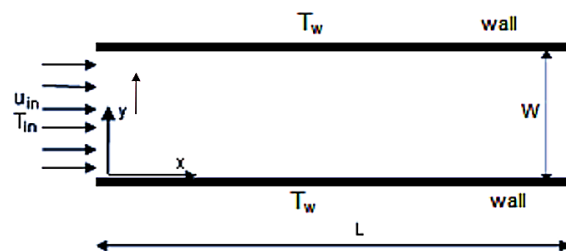
a)



b)

شکل ۱۴ تغییرات پروفیل سرعت بی بعد با عدد نادسن درکسر حجمی نانوذره ثابت و عدد رینولدز ثابت [۲۳]

در شکل (۱۳)، نمایی از ساختار و پروفیل سرعت میکروکانال را مشاهده می کنیم. این نکته قابل ذکر است که باید فرم معادلات ناویر-استوکس و شرایط مرزی برای نانو سیالات تغییر یابد. در ادامه فرم معادلات برای نانو سیالات را نوشته و به بررسی جریان در میکروکانال پرداخته و تاثیرات سرعت لغزشی و پرش دمایی در آن را مشاهده می نماییم. در جدول (۱) نیز برخی از مشخصات نانو ذره و سیال پایه آورده شده است.



شکل ۱۳ نمایی از میکروکانال [۲۳]

جدول ۱ خواص نانوذره و سیال پایه [۲۳]

آب	ذره نانو	خواص
۹۹۸/۲	۳۸۹۰	چگالی (kg/m ³)
۴۲۴۰	۸۸۰	ظرفیت حرارتی (J/kg.K)
۰/۶۰۸	۳۵	هدایت حرارتی (W/mK)

$$X_i = \frac{x_i}{D_h}, U_i = \frac{u_i}{u_{in}}, P = \frac{P}{\rho_{nf} u_{in}^2} \quad \text{پارامترهای بی بعد (۲۲)}$$

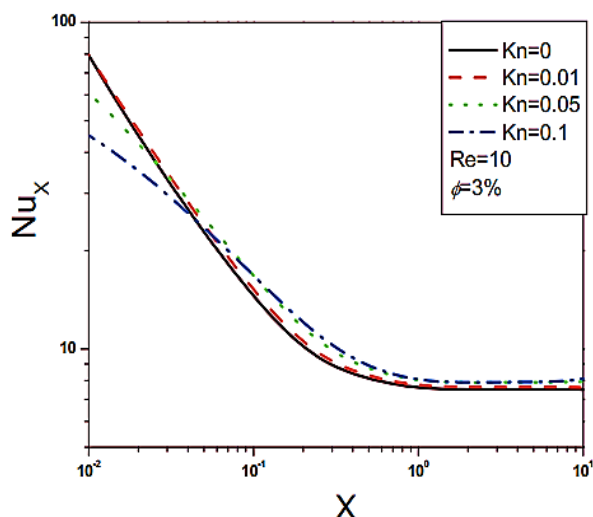
$$\theta = (T - T_{in}) / (T_{wall} - T_{in})$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial X_j} = 0 \quad \text{پیوستگی (۲۳)}$$

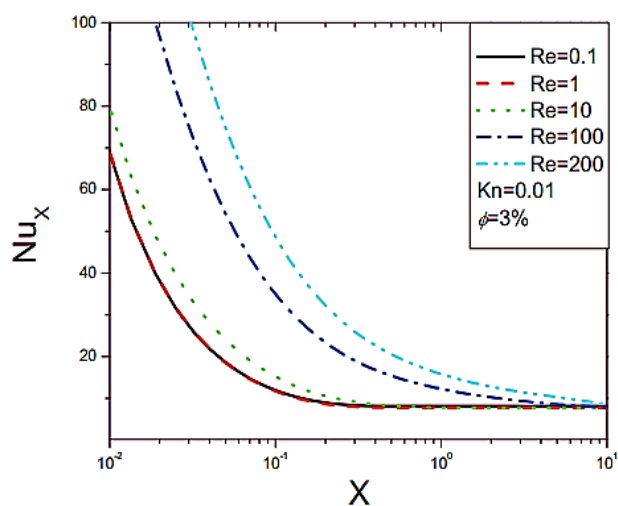
$$\left(\frac{\partial}{\partial X_j} U_i U_j\right) = \left(\frac{1}{Re_{nf}}\right) \frac{\partial^2 u_i}{\partial X_j^2} - \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad \text{مومنوم (۲۴)}$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial X_i} U_i \theta\right) = \left(\frac{1}{Pe_{nf}}\right) \frac{\partial^2 \theta}{\partial X_i^2} \quad \text{انرژی (۲۵)}$$

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)(\rho)_f + \phi(\rho)_s \quad \text{چگالی نانوسیال (۲۶)}$$



c)

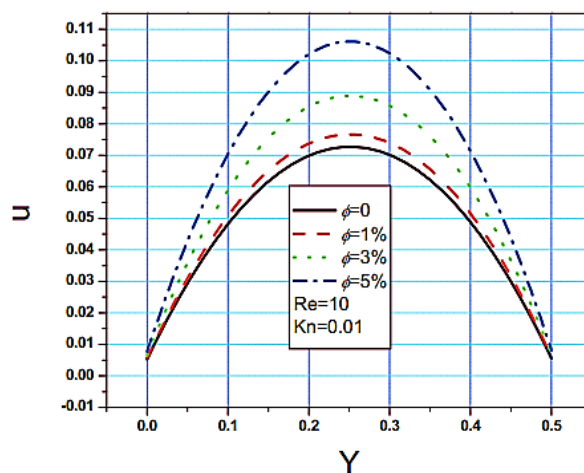


d)

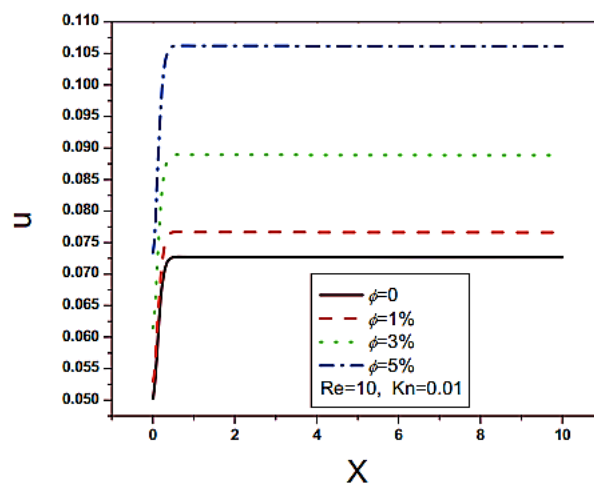
شکل ۱۶ تغییرات عدد ناسلت با عدد نادسن و عدد رینولدز در کسر حجمی نانوذره ثابت [۲۳]

طبق شکل (۱۶) افزایش سرعت لغزشی و افزایش پخش دمایی (افزایش kn) در جریان نانوسیال، عدد ناسلت محلی را در شروع میکروکانال کاهش می‌دهد و سپس بعد از قسمت آغازین میکروکانال عدد ناسلت محلی افزایش می‌یابد. افزایش عدد رینولدز باعث افزایش عدد ناسلت محلی می‌گردد.

در شکل (۱۴) تغییرات پروفیل سرعت بی‌بعد با عدد نادسن در کسر حجمی نانوذره ثابت و عدد رینولدز ثابت مشخص گردیده است و مشاهده می‌گردد که سرعت لغزشی تأثیری افزایشی بر روی سرعت نزدیک دیواره داشته در حالیکه سرعت ماکزیمم کاهش یافته است. پروفیل سرعت در رژیم جریان لغزشی در مقایسه با رژیم جریان غیر لغزشی پخش‌تر شده است.



c)



d)

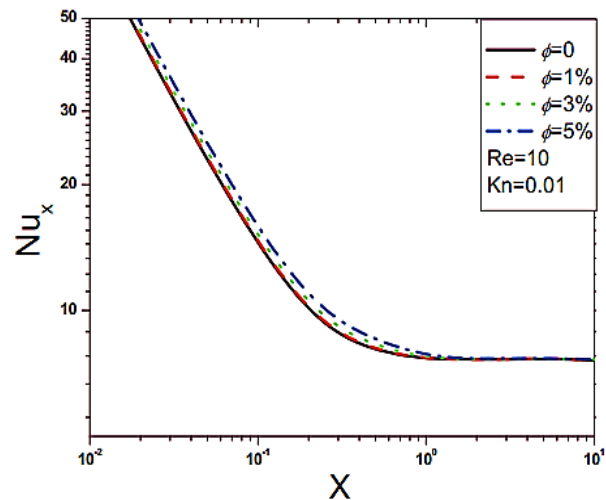
شکل ۱۵ تغییرات پروفیل سرعت با کسر حجمی نانوذره [۲۳]

طبق شکل (۱۵) در می‌یابیم که در یک عدد رینولدز ثابت، سرعت با افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) افزایش پیدا می‌کند.

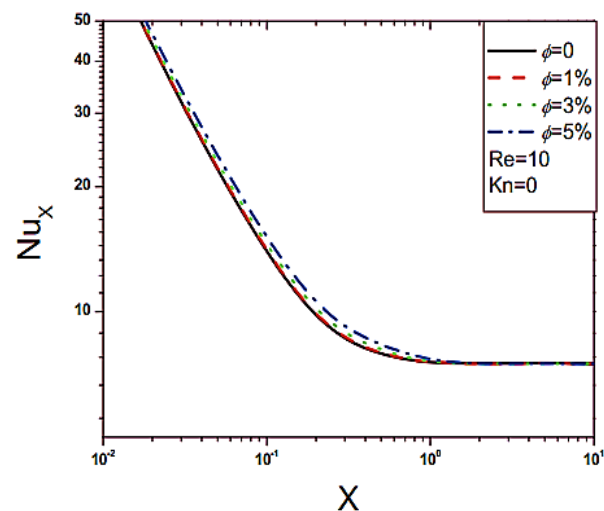
کاملی در مورد رفتار اجزاء وجود ندارد. یکی از مهمترین سیستمهای میکروسیستم، سیستم میکروسیالی است که نیاز به بررسی بیشتری دارد. اگرچه سیستم های ریزسیال در این کار مورد بررسی قرار گرفته است، هنوز جنبه های زیادی در این زمینه وجود دارد که ممکن است بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد. در ابتدا، به دلیل عدم انجام کارهای تجربی در این زمینه، مجبور شدیم از برخی فرض ها استفاده کنیم، که ممکن است برای کارهای بعدی نادیده گرفته شود. جریان سیال ممکن است به عنوان یک جریان قابل تراکم در نظر گرفته شود که برای جریان گاز مهم است. جریان ناپایدار سیال در میکروکانالها باید مورد مطالعه قرار گیرد. زبری سطح را می توان در نظر گرفت. خواص جریان در این کار ثابت فرض می شود، که ممکن است با برخی از مشخصه های جریان مانند دما و فشار متغیر در نظر گرفته شود.

در مقاله حاضر، جریان سیال و انتقال حرارت در سیستمهای میکروسیالی به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جریان سیال در اکثر کاربردهای سیستمهای ریزسیال در حالت جریان لغزشی است که با سرعت لغزشی و پرش دمایی در دیوار مشخص می شود. جریان در دستگاههای ریزسیال، لغزش قابل توجهی را نشان می دهد. نتایج این تحقیق را می توان به صورت زیر بیان نمود:

- ۱- شرط سرعت لغزشی و پرش دمایی در میکروکانالها حاکم است.
- ۲- سرعت لغزشی سبب افزایش سرعت نزدیک دیواره شده در حالیکه باعث می شود سرعت ماکزیمم در خط مرکزی کاهش یابد.
- ۳- افزایش عدد ناسن، اثر کاهش بر روی دما در هر مقطع دارد.
- ۴- افزایش سرعت لغزشی (افزایش Kn) و پرش دمایی (کاهش β) باعث افزایش پخشندگی (افقی شدن) نزدیک دیواره می شود.
- ۵- سرعت لغزشی اثر افزایشی بر روی طول ورودی در هر عدد رینولدزی دارد.
- ۶- در حضور سرعت لغزشی و پرش دمایی، عدد ناسلت از یک مقدار متناهی شروع می شود.
- ۷- میکروکانال منحنی همانند میکروکانال مستقیم عمل می نماید.
- ۸- در یک عدد رینولدز ثابت، سرعت با افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) افزایش پیدا می کند.
- ۹- افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ) باعث افزایش عدد ناسلت محلی در رژیم جریان لغزشی ($Kn=0.01$) و رژیم جریان غیر لغزشی ($Kn=0$) می شود.
- ۱۰- استفاده از نانوسیال با Pr بالا (β بالا) و میکروکانال با سرعت لغزشی بالا (Kn بالا) باعث افزایش انتقال حرارت می گردد.



a)



b)

شکل ۱۷ تغییرات عدد ناسلت با کسر حجمی نانوذره

[۲۳] a) $Re=10$ and $Kn=0.01$ and b) $Re=10$ and $Kn=0$

طبق آنچه که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، افزایش کسر حجمی نانوسیال (ϕ)، باعث افزایش عدد ناسلت محلی در رژیم جریان لغزشی ($kn=0.01$) و رژیم جریان غیر لغزشی ($kn=0$) می شود. استفاده از نانوسیال یک راه خوب و کاربردی برای افزایش انتقال حرارت در میکروکانال است.

۷- نتیجه گیری

با توسعه علم و فناوری، پیاده سازی میکروسیستم ها در همه نوع فناوری به تعداد زیادی افزایش یافته است. اگرچه میکروسیستم ها به طور گسترده در فناوری ها استفاده می شوند، اما دانش

۸- فهرست علائم و اختصارات

۹- مراجع

علائم انگلیسی

- [1] Ho, C.-M. and Tai, Y.-C., Micro-electro-mechanical systems (MEMS) and fluid flow. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30, 579–612, (1998).
- [2] Morini, G. L., Single-phase convective heat transfer in microchannels: a review of experimental results. *International Journal of Thermal Sciences.* 43, 631–651, (2004).
- [3] Stone, H.A., Stroock, A.D. and Ajdari, A., Engineering flows in small devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36, 381–411, (2004).
- [4] Squires, T. M. and Quake, S. R., Microfluidics: Fluid physics at the nanoliter scale. *Reviews of modern Physics.* 77(3), 977–1026, (2005).
- [5] Steinke, M. E. and Kandlikar, S. G., Single-phase liquid friction factors in microchannels. *International Journal of Thermal Sciences.* 45, 1073–1083, (2006).
- [6] Renksizbulut, M., Niazmand, H., Tercan, G., Slip-flow and heat transfer in rectangular microchannels with constant wall temperature. *Int. J. Therm. Sci.* 45 (9), 870–881, (2006).
- [7] Hu, G. and Li, D., Multiscale phenomena in microfluidics and nanofluidics. *Chemical Engineering Science.* 62, 3443 – 3454, (2007).
- [8] Kraly, J. R., Holcomb, R. E., Guan, Q. and Henry, C. S., Review: Microfluidic applications in metabolomics and metabolic profiling. *Analytica Chimica Acta.* 653, 23–35, (2009).
- [9] Rosa, P., Karayiannis, T.G. and Collins, M.W., Single-phase heat transfer in microchannels: The importance of scaling effects. *Applied Thermal Engineering.* 29, 3447–3468, (2009).
- [10] Shao, N., Gavriilidis, A. and Angeli, P., Flow regimes for adiabatic gas-liquid flow in microchannels. *Chemical Engineering Science* 64, 2749- 2761, (2009).
- [11] Tuckerman D.B., Pease F.W., High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Lett.* EDL-2, 126-129, (1981).
- [12] Harms, T. M., Kazmierczak, M. J. and Gerner, F. M., Developing convective heat transfer in deep rectangular microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 20, 149-157, (1999).
- [13] Mala, Gh. M. and Li, D., Flow characteristics of water in microtubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 20, 142-148, (1999).
- [14] Xu B., Ooi K.T., Wong N.T. and Choi W.K., Experimental investigation of flow friction for liquid
- a پارامتر همرفت- انتشار
 C_p گرمای ویژه ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
d قطر نانوذرات یا مولکول آب
 D_h قطر هیدرولیک (m)
f ضریب اصطکاک فانیگ ($= \frac{2\tau_w}{\rho \bar{u}^2}$)
h ضریب انتقال حرارت ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
k هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
 k_B ثابت بولتزمن ($= 1.3807 \times 10^{-23} \text{ J/k}$)
 Kn عدد نادسن (λ/D_h)
L طول میکروکانال (m)
 Nu_x عدد ناسلت محلی ($= \frac{h_x D_h}{k}$)
p فشار (Pa)
P فشار بی بعد
 Po عدد پوازیه ($f Re = \frac{2\tau_w D_h}{\mu \bar{u}}$)
Pe عدد پکلت ($= Re Pr$)
Pr عدد پرائتل ($= \frac{\mu C_p}{k}$)
 q'' شار حرارتی ثابت
Re عدد رینولدز ($= \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu}$)
T دما
 T^* دمای بی بعد ($= \frac{k(T - T_{in})}{q'' D_h}$)
u سرعت (m s^{-1})
U سرعت بی بعد
W عرض میکروکانال (m)
x, y مختصات
X, Y مختصات بی بعد
 X^* عدد گراتز متقابل ($\frac{x}{D_h Pe}$)
- علائم یونانی
- γ نسبت گرمای ویژه
 θ دمای بی بعد ($= \frac{T - T_{in}}{T_{wall} - T_{in}}$)
 λ مسیر آزاد متوسط (m)
 μ ویسکوزیته دینامیکی (N s m^{-2})
 ρ چگالی (kg m^{-3})
 σ_T ضریب تطابق حرارتی
 σ_V ضریب تطابق مومنتم مماسی
 τ_w تنش برشی دیواره ($= -\mu (\frac{\partial u}{\partial y})_w$)
 \emptyset کسر حجمی جامد
- زیرنویس ها
- f سیال پایه
fd کاملا توسعه یافته
i, j شاخص های آرایه
in شرط ورودی
nf نانوسیال
s نانوذرات جامد
wall دیواره

- [27] Dincau, B., Dressaire, E. and Sauret, A., Pulsatile flow in microfluidic systems. *Small*, 16(9), p.1904032, (2020).
- [28] Riewe, J., Erfle, P., Melzig, S., Kwade, A., Dietzel, A. and Bunjes, H., Antisolvent precipitation of lipid nanoparticles in microfluidic systems—A comparative study. *International journal of pharmaceutics*, 579, p.119167, (2020).
- [29] Jaber, A., Monemian Esfahani, A., Aghabaglou, F., Park, J.S., Ndao, S., Tamayol, A. and Yang, R., Microfluidic Systems with Embedded Cell Culture Chambers for High-Throughput Biological Assays. *ACS Applied Bio Materials*, 3(10), pp.6661-6671, (2020).
- [30] Peng, Y., Jiang, S., Xia, L., Yin, X., Yu, B. and Qian, L., Direct ink writing combined with metal-assisted chemical etching of microchannels for the microfluidic system applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, 315, p.112320, (2020).
- [31] Pinho, D., Carvalho, V., Gonçalves, I.M., Teixeira, S. and Lima, R., Visualization and measurements of blood cells flowing in microfluidic systems and blood rheology: A personalized medicine perspective. *Journal of Personalized Medicine*, 10(4), p.249, (2020).
- [32] Wang, S., Yang, X., Wu, F., Min, L., Chen, X. and Hou, X., Inner surface design of functional microchannels for microscale flow control. *Small*, 16(9), p.1905318, (2020).
- [33] Nikshad, A., Aghlmandi, A., Safaralizadeh, R., Aghebati-Maleki, L., Warkiani, M.E., Khiavi, F.M. and Yousefi, M., Advances of microfluidic technology in reproductive biology. *Life Sciences*, p.118767, (2020).
- [34] Hettiarachchi, H. D. M., Golubovic, M., Worek, W. M., and Minkowycz, W. J., "Three-Dimensional Laminar Slip-Flow and Heat Transfer in a Rectangular Microchannel with Constant Wall Temperature", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 21, No. 51, , pp. 5088-5096, (2008).
- [35] Maxwell, J. C., "On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Part 1, Vol. 170, , pp. 231-256, (1879).
- [36] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method*, Henk Kaarle, (1955).
- [37] Patankar, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publication Corporation, Washington, (1980).
- flow in microchannels. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*. Vol. 27(8), 1165-1176, (2000).
- [15] Judy, J., Maynes, D. and Webb, B.W., Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 45, 3477–3489, (2002).
- [16] Holden, M. A., Kumar, S., Castellana, E. T., Beskok, A. and Cremer, P. S., Generating fixed concentration arrays in a microfluidic device. *Sensors and Actuators B*. 92, 199–207, (2003).
- [17] Wu, H. Y. and Cheng, P., Friction factors in smooth trapezoidal silicon microchannels with different aspect ratios. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 46, 2519–2525, (2003).
- [18] Li, H. and Olsen, M. G., MicroPIV measurements of turbulent flow in square microchannels with hydraulic diameters from 200 μm to 640 μm . *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 27, 123–134, (2006).
- [19] Hrnjak, P. and Tu, X., Single phase pressure drop in microchannels. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 28, 2–14, (2007).
- [20] Silva, G., Leal, N. and Semiao, V., Micro-PIV and CFD characterization of flows in a microchannel: Velocity profiles, surface roughness and Poiseuille numbers. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 29, 1211–1220, (2008).
- [21] Wang, H. and Wang, Y., Measurement of water flow rate in microchannels based on the microfluidic particle image velocimetry. *Measurement*. 42, 119–126, (2009).
- [22] El-Genk, M. S. and Yang, I.-H., Numerical analysis of laminar flow in micro-tubes with a slip boundary. *Energy Conversion and Management*. 50, 1481–1490, (2009).
- [23] Alireza Akbarinia, Simulation and Modeling of Microfluidic Systems, zur Erlangung des akademischen Grades, Vom Fachbereich für Physik, Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Bremen, (02. Juli 2012).
- [24] Thaweskulchai, T. and Schulte, A., A Low-Cost 3-in-1 3D Printer as a Tool for the Fabrication of Flow-Through Channels of Microfluidic Systems. *Micromachines*, 12(8), p.947, (2021).
- [25] Nasser, B., Akar, S. and Naseri, E., Microchannels for microfluidic systems. In *Biomedical Applications of Microfluidic Devices* (pp. 37-75). Academic Press, (2021).
- [26] He, X., Wang, B., Meng, J., Zhang, S. and Wang, S., How to Prevent Bubbles in Microfluidic Channels. *Langmuir*, 37(6), pp.2187-2194, (2021).