

مقاله پژوهشی کامل تاریخ دریافت ۹۱/۷/۲۶ تاریخ پذیرش ۹۱/۱۲/۹ ارائه در سایت ۹۲/۳/۳۰

بررسی اثرات اتـلاف لزجـت روی انتقـال حـرارت سـیال گـازی در میکروکانال افقی با وجود رقت و هدایت محوری

رامیار مازوجی'، افراسیاب رئیسی'*

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه شهر کرد، شهر کرد ۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه شهر کرد، شهر کرد * شهر کرد، صندوق پستی ۱۱۵، raisi@eng.sku.ac.ir

چکیده – در این تحقیق هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان گازی درون یک میکروکانال به صورت عددی بررسی شده است. سرعت و دمای جریان ورودی به کانال یکنواخت است و شرط مرزی لغزش سرعت و پرش دما، با توجه به رژیم لغزشی جریان، روی دیواره کانال حاکم است. طول میکروکانال به اندازهٔ کافی بلند در نظر گرفته شده تا در انتها شرط توسعهیافتگی هیدرودینامیکی و دمایی برقرار باشد. گسستهسازی معادلات حاکم بر مینای حجم کنترل انجام شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شدهاند. اثرات پارامترهای مختلف، از جمله اتلاف لزجت، رقت، هدایت معوری و خزش بر انتقال حرارت بررسی شده است. طول بر مبنای حجم کنترل انجام شده و با استفاده از الگوریتم سیمپل حل شدهاند. اثرات پارامترهای مختلف، از جمله اتلاف لزجت، رقت، هدایت محوری و خزش بر انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که مقادیر عدد ناسلت در میکروکانالها با مقادیر آن در کانالهای با ابعاد معوری و خزش بر انتقال حرارت بررسی شده است. نتایج بیانگر آن است که مقادیر عدد ناسلت در میکروکانالها با مقادیر آن در کانالهای با ابعاد معول معول متفاوت است. در نظر گرفتن اتلاف لزجت، سبب ایجاد پرش چشمگیری در عدد ناسلت در میکروکانالها با مقادیر آن در کانالهای با ابعاد معول معول متفاوت است. در نظر گرفتن اتلاف لزجت، سبب ایجاد پرش چشمگیری در عدد ناسلت موضعی می شود که مقدار پرش، مستقل از عدد برینکمن می باشد. افزایش رقت، اتلاف لزجت، سبب ایجاد پرش چشمگیری در عدد ناسلت موضعی می شود که مقدار پرش، مستقل از عدد برینده می باند. افزایش وقای می در حالی که اثر رقت بر روی آن قوی و قابل ملاحظه بوده است.

Effect of viscous dissipation on gaseous flow heat transfer in a horizontal microchannel with rarefaction and axial conduction

R. Mazooji¹, A. Raisi^{2*}

1- MSc. Student, Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran 2- Assis. Prof., Mech. Eng., Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran * P. O. B. 115 Shahrekord, Iran. raisi@eng.sku.ac.ir

Abstract- Hydrodynamics and Heat transfer of a gaseous flow in microchannels is performed numerically. Velocity and temperature at the channel inlet is uniform and the rarefaction effect is imposed to the problem via velocity slip and temperature jump boundary conditions, according to the slip flow regime. The channel is sufficiently long to reach fully developed flow at the outlet. The numerical methodology is based on the control volume finite difference scheme and discrete equations are solved using SIMPLE algorithm. Effects of various parameters such as viscous dissipation, rarefaction, axial conduction and thermal creep on heat transfer have been considered. The results indicate that the Nusselt number in microchannels has a different value than in conventional channels. Local Nu number is found to experience a jump by the presence of viscous dissipation. The magnitude of the jump is independ of the Brinkman number values. Heat transfer is affected in two opposite directions by rarefaction increasing. Also, as Peclet number increases, there is a weak increase in fully developed Nu number values but there is significant effect of Kn number on it. **Keywords:** Microchannel, Slip flow, Rarefaction, Temperature Jump, Viscous Dissipation.

۱– مقدمه

در سالهای اخیر نیازهای تحقیقاتی و استفادههای تجاری از وسایل مکانیکی با ابعاد میکرو و نانو رواج بسیار زیادی یافته است. کانالها از مهمترین بخشهای این سیستمها هستند که به منظور انتقال سيال با اهداف مختلف مانند انتقال حرارت، جابجایی و سوخترسانی مورد استفاده قرار می گیرند. کانالهایی با این ابعاد در سیستمهای میکروالکترومکانیکال اهمیت ویژهای دارند. همچنین اهمیت بررسی سیستمهای مشابه جریان در میکروکانالها از جمله جریان در مویرگها و دیگر بافتهای حیاتی با ابعاد میکرو، باعث شده است تا این زمینه به یکی از زمینههای یرطرفدار تبدیل شود. یکی دیگر از مواردی که باعث شده جریان گاز در میکروکانالها اهمیت یابد، وجود تشابه نسبی بین جریان در ابعاد میکرو و جریانهای کم فشار در صنایع هوافضا میباشد. در کانالهای با ابعاد ماکرو سرعت و دمای سیال روی سطح جامد، برابر با سرعت و دمای دیواره میباشد، اما این شرایط برای جریان گازهای رقیق در میکروکانالها برقرار نیست. در جریان گاز در میکروکانالها، سیال برروی دیوارهٔ کانال با یک سرعت مماسی محدود میلغزد. همچنین بین دمای سیال و دیواره نیز یک پرش دمایی وجود دارد. با وجود شرایط ذکر شده، محققان به این نتیجه رسیدهاند که هر چند فرضیات پیوستگی به علت اثرات رقت برقرار نیست، اما معادلات ناویراستوکس با اعمال شرط مرزی لغزشی در محدودهی جریان لغزشی قابل استفاده است. برخلاف ماكروكانالها كه رژيم جريان گاز به اثرات سرعت و لزجت (عدد رینولدز) و قابلیت تراکمپذیری (عدد ماخ) ربط داده می شود، در میکروکانال ها مهم ترین یارامتر، رقت می باشد که با عدد نادسن کمیتگذاری و رژیم جریان نیز به این خاصیت ارجاع داده می شود. می توان رژیم جریان را با توجه به شکل ۱ بر حسب عدد نادسن دستهبندی کرد:

Kn=0.0001 0.	.001 0.01	0.1 1	10 100
جريان پيوسته	رژیم	رژیم گذرا	جريان
عدد نادسن [۱]	جریان طرسی گازی بر حسب	جریانهای ا	مولعولی آراد شکل ۱ انواع رژیم

^{1.} MEMS

از کارهای شاخص و تأثیرگذار در رژیم جریان لغزشی میتوان به کارهای ذیل اشاره کرد. در اوایل دهه ۱۹۸۰، توکرمن و پیز [۳،۲] مسألهٔ انتقال حرارت جابجایی با بازده بالا را برای مدارات مجتمع الکتریکی مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که ضریب انتقال حرارت جابجایی برای جریان آرام درون میکروکانالها بیشتر از مقدار آن در جریان متلاطم در ابعاد معمول میباشد. پس از این تحقیق و موفقیتهای حاصل از آن، مطالعات پیرامون میکروکانالها به شدت اوج گرفت. نتایج این تحقیق را میتوان از جمله تأثیرگذارترین مطالعات در انتقال حرارت میکروکانالها دانست. در راستای کارهای تجربی، تعدادی از محققان مدلهای تحلیلی و عددی را برای مطالعهٔ جریان در میکروکانالها ارائه نمودند.

از نخستین کارها که در این زمینه توسط ایبرت و اسپارو [۴] انجام شد، تعیین افت فشار و افت سرعت در سیال گازی جاری در میکروکانال مستطیلی و حلقوی بود. آنها دریافتند که تأثیر لغزش روی توزیع سرعت باعث مسطحتر شدن آن نسبت به جریان پیوسته میشود. همچنین گرادیان فشار محوری تحت شرایط لغزشی کاهش مییابد. بیسکوک فشار محوری تحت شرایط لغزشی وابسته به زمان در هندسه-فشار میکرو را به صورت عددی مدل کردند. شیوهٔ عددی آنها بر های میکرو را به صورت عددی مدل کردند. شیوهٔ عددی آنها بر اساس روش المانهای طیفی- موهومی^۲ بود. در این تحلیل از آنها بر اهمیت ضریب تطابق تأکید داشتند و سرعت لغزشی بزرگ در دیواره را ناشی از کوچکی عدد نادسن و ضریب تطابق هیدرودینامیکی میدانستند.

زو و لیو [۶] جابجایی اجباری آرام را برای جریان گاز درون میکروکانال با مقطع دلخواه و با شرط مرزی شار حرارتی ثابت، شرط لغزش سرعت و پرش دمایی به طور تئوری مورد مطالعه قرار دادند. آنها عدد ناسلت میانگین و پروفیل دما را برای سیال غیر قابل تراکم، بدست آوردند. سپس مطالعهٔ خود را بر روی مقاطع مستطیلی و مثلثی که کاربرد بیشتری دارند، متمرکز کردند. ستین و همکارانش [۷] در سال ۲۰۰۶ انتقال حرارت در میکرولولهها و میکروکانالهای دوبعدی را با فرض جریان لغزشی و صرفنظر از هدایت محوری برای حالتهای دما ثابت

^{2.} Spectral Element Method

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در . . .

برای جریان در فشارهای پایین و سرعتهای بالا و همچنین در میکروکانالهای طویل اهمیت مییابد، توسط ایشان مورد مطالعه قرار گرفتهاست. هاتیاراچی و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۸ جریان لغزشی آرام سهبعدی در یک میکروکانال مستطیلی را بهروش حجم محدود بررسی کردند. آنها متوجه شدند که یک وابستگی بین ضریب اصطکاک کاملاً توسعهیافته، بهعنوان تابعی از عدد نادسن و ضریب هندسی وجود دارد. آنها همچنین اثرات رقت را روی عدد ناسلت آزمایش کردند.

کولین [۹] در سال ۲۰۱۲ انواع روشهای تحلیلی و عددی را برای مطالعهٔ جابجایی در میکروکانالها مرور کرده است. وی مطالعات خود را بر روی اثرات رقت تحت شرایط مرزی شار ثابت و دما ثابت انجام داده و ترمهای هدایت و اتلاف لزجت و روشهای حل آنها را نیز بررسی کرده است. وی تأکید نموده که برای در نظرگیری و مطالعهٔ همهٔ پارامترهای مؤثر بر رژیم لغزشی، نیاز به دادههای آزمایشگاهی در سالهای آینده بیشتر انخرشی، نیاز به دادههای آزمایشگاهی در سالهای آینده بیشتر احساس خواهد شد. قاضیزاده و رنکسیزبولوت [۱۰] در سال مقطع مستطیلی بررسی کردند. آنها در مطالعه یکانال با خواص ثابت سیال به این نتیجه رسیدند که ضریب اصطکاک محلی و ضریب انتقال حرارت متناسب با هندسه مسأله و نسبت ابعاد^۲ تغییر خواهد کرد.

در تحقیق پیش و اثر پارامترهای مختلف از جمله اتلاف لزجت و هدایت محوری در جریان سیال گازی رقیق به صورت توأم بررسی شده است. همچنین مطالعه اثر خزش دمایی بر روی سرعت لغزشی در مجاورت دیواره و همچنین بررسی انتقال حرارت سیال در حالات مختلف سطح مشترک جامد و سیال و در رقتهای گوناگون، از جملهٔ کارهایی است که این تحقیق را نسبت به تحقیقات گذشته شاخص تر می کند.

۱– بیان مسأله

در این تحقیق بررسی جریان لغزشی هوا درون میکروکانالی مطابق شکل ۲ در نظر میباشد. جریان هوا با سرعت یکنواخت u_i و دمای یکنواخت T_i وارد میکروکانال میشود. ورودی میکروکانال بهصورت عایق بوده و پس از رسیدن به توسعهیافتگی هیدرودینامیکی، دمای یکنواخت دیواره اعمال

مهندىسى مكائيك ھەرسى شهربور ١٣٩٢. دورة ١٣ شمارة ۶ www.SID.ir

می شود. طول قسمت عایق $L_1 = 0.1 L$ می باشد. لغزش سرعت و پرش دمایی به اقتضای رژیم لغزشی جریان، در مرزها اعمال شده اند.

با بررسیهای صورت گرفتهٔ عددی، طول میکروکانال برای آن که شرایط توسعهیافتگی دمایی و هیدرودینامیکی درانتهای آن و در محدودهٔ 100 > 8 > 1 برقرار باشد، بهصورت $L/D_H = 40$ قطر هیدرولیکی میکروکانال میباشد. جریان آرام، پایدار و خواص ترموفیزیکی ثابت فرضشده است.

۲- روابط حاکم

بر طبق آنچه که گذشت، در میکروکانالها رژیم جریان به عدد نادسن که بیانگر میزان رقت سیال میباشد رجوع داده میشود. جریان لغزشی در $^{-1}$ Kn > $^{-3}$ لرخ میدهد و برای مدل کردن آن از معادلات ناویراستوکس همراه با شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دمایی روی دیوارهها، استفاده میشود. بنابراین معادلات حاکم همان معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی مرسوم میباشد. با این توضیح که معادلهٔ انرژی شامل ترم هدایت محوری و ترم کامل اتلاف لزجت میباشد.

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \tag{1}$$

مومنتم در جهت x:

$$\frac{\partial}{\partial x^{*}} \left(u^{*}u^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial u^{*}}{\partial x^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial y^{*}} \left(u^{*}v^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial u^{*}}{\partial y^{*}} \right) = -\frac{\partial p^{*}}{\partial x^{*}} + \frac{1}{3} \frac{1}{\operatorname{Re}} \left(\frac{\partial^{2}u^{*}}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^{2}v^{*}}{\partial x^{*} \cdot \partial y^{*}} \right)$$
(7)



شکل ۲ دامنهٔ فیزیکی و محاسباتی مسأله

^{1.} Aspect Ratio

$$+\frac{3}{4}\frac{\mathrm{Kn}^{2}}{k_{2}^{2}\cdot\mathrm{Br}}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right)\frac{\partial T^{*}}{\partial x^{*}}\Big|_{\mathrm{W}}$$
 (A)

ترم دوم سمت راست معادله ۸ بیانگر اثر خزش حرارتی بر روی لغزش سرعت در دیوارهها میباشد. همچنین در مورد پرش دمایی از مدل اسمولوچوسکی استفاده میشود:

$$T_{\rm s}^{*} = -2\kappa {\rm Kn} \frac{\partial T^{*}}{\partial y^{*}} \bigg|_{\rm w} \tag{9}$$

$$\kappa = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{1}{\Pr}$$
(1.)

با توجه به تعریف پروفیل سرعت کاملاً توسعه یافته میتوان شرط توسعهیافتگی هیدرودینامیکی در انتهای میکروکانال را بهصورت زیر اعمال کرد.

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*}\Big|_{x^*=L} = 0 \quad , \quad v^* = 0 \tag{11}$$

همچنین برای اعمال شرط توسعهیافتگی حرارتی با توجه به دمای ثابت دیواره و تعریف دمای بیبعد در رابطه ۵ از عبارت زیر استفاده می شود:

$$\frac{\partial T^*}{\partial x^*}\Big|_{x^*=L} = 0 \tag{11}$$

شرط مرزی تقارن در خط مرکزی میکروکانال بهصورت رابطه (۱۳) برقرار است.

$$v^* \Big|_{y^* = \frac{1}{2}} = 0$$
 , $\frac{\partial u^*}{\partial y^*} \Big|_{y^* = \frac{1}{2}} = 0$ (17)

و بالاخره با توجه یکنواخت بودن سرعت و دمای ورودی، شرایط مرزی در ورودی میکروکانال به قرار زیر است: $u^* = 1$, $T^* = 1$ (۱۴)

۴- روش عددی

معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی به همراه شرایط مرزی گفته شده به روش تفاضل محدود مبتنی بر حجم کنترل جبری سازی شده اند [۱۳،۱۲]. برای راحتی محاسبات، حل در شبکهٔ جابجا شده صورت گرفته است. در این روش علاوه بر راحتی محاسبهٔ دبی ها روی وجوه حجم کنترل، به علت معلوم بودن سرعت روی سطوح، مقادیر فشار در نقاط اصلی شبکه مشخص می شود. برای حل همزمان کل معادلات حاکم،

$$\frac{\partial}{\partial x^{*}} \left(u^{*}v^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial v^{*}}{\partial x^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial y^{*}} \left(v^{*}v^{*} - \frac{1}{\operatorname{Re}} \frac{\partial v^{*}}{\partial y^{*}} \right) = -\frac{\partial p^{*}}{\partial y^{*}} + \frac{1}{3} \frac{1}{\operatorname{Re}} \left(\frac{\partial^{2}v^{*}}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^{2}u^{*}}{\partial x^{*} \cdot \partial y^{*}} \right)$$
(7)

انرژى:

$$u^{*} \frac{\partial T^{*}}{\partial x^{*}} + v^{*} \frac{\partial T^{*}}{\partial y^{*}} = \frac{1}{\operatorname{Re} \cdot \operatorname{Pr}} \left(\frac{\partial^{2} T^{*}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2} T^{*}}{\partial y^{2}} \right) + \frac{\operatorname{Br}}{\operatorname{Re} \cdot \operatorname{Pr}} \left[2 \left(\frac{\partial u^{*}}{\partial x^{*}} \right)^{2} + 2 \left(\frac{\partial v^{*}}{\partial y^{*}} \right)^{2} \\+ \left(\frac{\partial u^{*}}{\partial y^{*}} + \frac{\partial v^{*}}{\partial x^{*}} \right)^{2} \right] - \frac{2}{3} \frac{\operatorname{Br}}{\operatorname{Re} \cdot \operatorname{Pr}} \left(\frac{\partial u^{*}}{\partial x^{*}} + \frac{\partial v^{*}}{\partial y^{*}} \right)^{2}$$
(*)

برای بیبعدسازی معادلات حاکم و شرایط مرزی از پارامترهای زیر استفاده شدهاست.

$$u^{*} = \frac{u}{u_{m}}, v^{*} = \frac{v}{u_{m}}, x^{*} = \frac{x}{D_{H}}, y^{*} = \frac{y}{D_{H}},$$

$$P^{*} = \frac{P - P_{0}}{\rho u_{m}^{2}}, Pr = \frac{\mu c_{p}}{k}, Re = \frac{\rho u_{m} D_{H}}{\mu},$$

$$Br = \frac{\mu u_{m}^{2}}{k (T_{i} - T_{w})}, T^{*} = \frac{T - T_{w}}{T_{i} - T_{w}}, Kn = \frac{\lambda}{D_{H}} \quad (\Delta)$$

$$au(b) = \frac{\lambda}{2} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} \frac$$

$$T_m^* = \frac{\int u^T \, \mathrm{d}y}{\int u^* \, \mathrm{d}y^*} \tag{8}$$

حال با استفاده از درجه حرارت متوسط، میتوان عدد ناسلت را تعریف کرد [۸]:

$$Nu_{x} = -\frac{2\left(\frac{\partial T^{*}}{\partial y^{*}}\right)_{w}}{T_{m}^{*}}$$
(Y)

۳- شرایط مرزی

برای اعمال شرط مرزی لغزش سرعت در دیواره، از مدل ماکسول [۱۱]، مطابق معادله ۸ استفاده شده است.

$$u_{\rm slip}^* = u_{\rm s}^* - u_{\rm wall}^* = -\frac{2-\sigma}{\sigma} \operatorname{Kn} \frac{\partial u^*}{\partial y^*} \Big|_{\rm w}$$

۸۶ www.SID.ir

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در . . .

الگوریتم نیمه ضمنی سیمپل استفاده شده است. همچنین در حل عددی مسأله، معیار همگرایی زیر تعریف و استفاده شده است (رابطه (۱۵)).

$$\sum_{j} \sum_{i} \left| \frac{\phi^{n+1} - \phi^{n}}{\phi^{n+1}} \right|_{(i,j)} \le 10^{-7}$$
(10)

که n تعداد تکرار و φ متغییر عمومی (x^*, v^*, T) را نشان میدهد. برای اجرای الگوریتم مورد نظر، برنامهای کامپیوتری به زبان فرترن نوشته شده است.

۵- نتایج و بحث

با توجه به حل عددی مورد استفاده، بررسی درستی عملکرد کد کامپیوتری و اثر تعداد نقاط شبکه بر روی خروجیهای برنامه اجتناب ناپذیر است. به همین منظور، نتایج عددی حاصل، با کارهای عددی مشابه توسط دیگران مقایسه شده است. توزیع عرضی سرعت در ناحیهٔ توسعه یافتهٔ میکروکانال با اعمال شرط مرزی لغزش سرعت، مشابه با شرایط مرجع [۱۴] استخراج شده و در شکل ۳ با هم مقایسه شدهاند. همچنان که مشاهده میشود، انطباق خوبی بهدست آمده است.

همچنین برای بررسی درستی نتایج در محاسبهٔ انتقال حرارت، از عدد ناسلت توسعه یافته مطابق با مسألهای که در مرجع [۷] حل شده است، استفاده شده است. اعداد ناسلت توسعه یافته در K = 1.667 و در اعداد نادسن مختلف با صرفنظر از اتلافات لزجت و هدایت محوری در یک میکروکانال با دیوارهٔ دما ثابت مشابه با مسألهٔ مرجع [۷] بهدست آمده و مقایسهٔ نتایج در جدول ۱ ارائه شده است.



ەپىندىسى ھكائىيىك ھەرسى شەربور ١٣٩٢. دورة ١٣ شمارة ۶ www.SID.ir

جدول ۱ اعداد ناسلت توسعه یافته در مرجع [۷] و برنامهٔ حاضر در

	$\kappa = 1.0$		
نتايج	حل عددی	عدد نادسن	
کار حاضر	ستین و همکاران [۷]	(Kn)	
V/24147	۲/۵۴۱	•/••	
۶/۹۲۶۲۰	۶/۹۲۵	•/•٢	
F/WV497	8/374	•/•۴	
۵/۸۸ ۱ ۱ ۲	۵/۸۸۲	•/•۶	
0/44122	0/441	•/•A	
۵/۰۵۶۷۶	۵/۰۵۸	•/\•	

همان طور که جدول ۱ نشان میدهد، اختلاف بسیار ناچیزی بین نتایج مرجع و مطالعهٔ حاضر وجود دارد.

پس از اطمینان از درستی کد کامپیوتری تهیه شده، به ادامه بررسیها پرداخته میشود.

با توجه به شکل ۴ که بیانگر عدد ناسلت توسعهیافتهٔ بهدست آمده از شبکههای مختلف میباشد، برای حل مسألهٔ حاضر یک شبکهٔ ۵۰۰۰۰ گرهای بهصورت یکنواخت مورد استفاده قرار گرفته که در واقع بهصورت 50×1000 میباشد. لازم به ذکر است حالتی که در آن به مطالعهٔ شبکه پرداخته شده، دارای رقت و پکلهٔ بالا و برینکمن غیرصفر میباشد.





۶-۱- هیدرودینامیک جریان هوا در میکروکانال
در این بخش پارامترهای هیدرودینامیکی جریان در میکروکانال
شامل سرعتهای محوری و عرضی و همچنین سرعت لغزشی

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در ...

رامیار مازوجی و همکار

در مجاورت دیواره و اثر خزش بر روی آن بررسی میشود. لازم به ذکر است که بررسیها، هم در ناحیهٔ ورودی و هم در ناحیهٔ کاملاً توسعه یافتهٔ هیدرودینامیکی انجام شدهاست.

۶-۱-۱- سرعت محوری

با افزایش عدد نادسن سرعت لغزشی در مرز افزایش یافته و به تبع أن سرعت در خط مركزي ميكروكانال كاهش مم يابد. افزایش عدد نادسن به منزلهٔ افزایش فاصلهٔ آزاد میانگین مولکولهای سیال نسبت به بعد طولی میکروکانال می باشد و درنتیجه به علت کاهش تعداد برخوردهای مولکولی، لغزش سرعت در دیواره افزایش و سرعت در خط مرکزی کاهش یافته است. در شکل ۵ پروفیل سرعت محوری در ۳ مقطع مختلف از ناحیه ورودی و توسعه یافته هیدرودینامیکی در نادسن های مختلف مشاهده میشود. در نزدیکترین مقطع به ورودی میکروکانال، سرعت بیشینه مقادیری نزدیک به سرعت یکنواخت ورودی دارد. همچنین در این مقطع، سرعت لغزشی در دیواره، بیشترین مقدار را نسبت به مقاطع دیگر را دارد. دلیل چنین رفتاری این است که لایه مرزی سرعت در حال شکل گیری است و هنوز به توسعه یافتگی نرسیده است. با افزایش x^* لایهٔ مرزی هیدرودینامیکی گسترش یافته و باعث افزایش سرعت در خط مرکزی و کاهش سرعت لغزشی در ديواره مي شود.

در مقطع 5.00 = x + x جریان کاملاً توسعه یافته است و سرعت خط مرکزی به بیشترین مقدار خود رسیده است. واضح است که بیشترین مقدار سرعت مرکزی در حالت عدم لغزش رخ میدهد (1.5 = u_{max}^*) و در نادست های غیرصفر همواره سرعت بیشینهٔ سیال از این مقدار کمتر است.

۶-۱-۲ سرعت عرضی

تغییرات سرعت عرضی * بر حسب * در شکل ۶ نشان داده شده است. نکتهٔ مهم آن است که مقادیر مؤلفهٔ عمودی سرعت در جریان لغزشی نسبت به جریان پیوسته کمتر است. یعنی با افزایش عدد نادسن مقدار سرعت عرضی دریک مقطع مشخص، کاهش میابد. زیرا در رقتهای بالاتر به دلیل کاهش برخورد مولکولی، سرعت لغزشی مماسی در دیوارهها افزایش مییابد و سرعت عمودی با کاهش مواجه می شود. هم چنین در

نزدیکترین مقطع به ورودی کانال، سرعت عرضی در مجاور دیواره، مقادیر بیشتری را به خود گرفته است و در مقطع کاملاً توسعه یافته مؤلفه عرضی سرعت طبق انتظار در همه مقادیر نادسن به صفر میرسد.



0.3 0.2 0.1 0.0 * > -0.1 Kn=0.005 Kn=0.01 Kn=0.05 -0.2 Kn=0.08 -0.3 0.5 0.0 0.1 0.2 * 0.30.4 الف- مقطع اول 120 x * = 0.120 0.3 0.2 0.1 0.0 *^ Kn=0.005 -0.1 Kn=0.01 Kn=0.05 -0.2 Kn=0.08 -0.3 $0.2 \quad v^* \quad 0.3$ 0.0 0.1 0.4 0.5 ب- مقطع دوم x * = 0.240 0.3 0.2 0.1 0.0 *_ -0.1 Kn=0.005 Kn=0.01 -0.2 Kn=0.05 Kn=0.08 -0.3 0.0 0.1 $0.2 v^* 0.3$ 0.4 0.5 ج- مقطع سوم 5.000 ج-**کل ۶** پروفیل سرعت عرضی در مقاطع مختلف

مقایسهٔ شکلهای ۵ و ۶ نشان میدهد که مؤلفهٔ سرعت عمودی در نادسنهای بالاتر، کاهش یافته در حالی که سرعت لغزشی

Re = 10, Br = 0.0, $\kappa = 1.667$

ەپەندىسى ھكائىيىك ھەرىس شەربور ١٣٩٢. دورة ١٣ شمارة ۶ www.SID.ir

در دیواره با افزایش مواجه شده است.

8-1-۳- اثر ترم خزش حرارتی

ترم دوم سمت راست معادلهٔ ۸ مربوط به خزش دمایی میباشد. در شکل ۷ تأثیر این ترم بر روی سرعت لغزشی در مجاورت دیواره قابل مشاهده است. خزش دمایی از گرادیان دمایی محوری ناشی میشود. همانطور که از شکل ۷ نمایان است، جریان در مجاورت دیواره و در حضور خزش حرارتی، با سرعت کمتری لغزش یافته است. واضح است که طبق مدل مورد استفاده، ترم خزش با توان دوم عدد نادسن متناسب بوده و در نتیجه در رژیم لغزشی اثر زیادی بر روی جریان در مجاورت دیواره نداشته است و تنها در ناحیهٔ ورودی میکروکانال اثر این ترم دیده شده است.

در اعداد نادسن خیلی بالا (جریان آزاد) گرادیان دمایی منجر به گرادیانهای فشار بالا در کانالها شده و اثر این ترم را در کاربردهای خلأ و ابزارهای میکروالکترومکانیکال شاخص تر میکند. در شکل ۷ اثر جزئی خزش در حد بالایی رژیم لغزشی یعنی ۸۵ Kn = 0.10 دیده شده و قابل صرفنظر بودن آن در کلیهٔ اعداد نادسن جریان لغزشی، منطقی بهنظر میرسد. انحراف سرعت لغزشی در بیشینه مقدار خود برای انحراف سرعت لغزشی در بیشینه مقدار خود برای میل میکند. در مورد تأثیر ترم خزش باید به این مهم نیز اشاره میل میکند. در مورد تأثیر ترم خزش باید به این مهم نیز اشاره کرد که خزش، طول ناحیهٔ ورودی را افزایش داده است. دلیل آن طویل بودن ناحیهٔ ورودی دمایی نسبت به طول ناحیهٔ ورودی هیدرودینامیکی با توجه به 6.0 Pr هوا می باشد.



بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در ...

۶-۲- پرش دمایی

در شکل ۸ مقدار پرش دمایی در دیوارهٔ میکروکانال در اعداد نادسن مختلف نشان داده شده است. واضح است که هر چه عدد نادسن کمتر باشد، جریان به سمت پیوسته بودن متمایل شده و طبق انتظار پرش دمایی در دیوارهها ضعیفتر میشود. با افزایش عدد نادسن، جریان گازی رقیقتر شده و با کاهش برخورد مولکولی مقادیر پرش دمایی افزایش مییابد. بیشترین پرش دمایی مقدار ۰/۴۲ بوده که مربوط به حد بالایی رژیم لغزشی میباشد.

در شکل ۹ تغییرات دمای مجاور دیواره با اعمال شرط مرزی پرش دمایی در پکلههای مختلف نشان داده شده است. در سرعتهای بالاتر پرش دمایی بیشتری رخ داده است و دلیل آن تأثیرگذاری بیشتر هممرتبه بودنِ مسیر آزاد مولکولی و طول مشخصهٔ جریان در میکروکانال است.



شکل **۸** دمای سیال در مجاورت دیواره با اعمال شرط مرزی پرش دمایی Pe = 10, Br = 0.0, $\kappa = 1.667$



 ${
m Kn}=0.05\;,\;{
m Br}=0.0\;,\;\kappa=1.667$ در پکلههای مختلف

همچنین در اعداد پکلهٔ بالاتر دمای سیال مجاور دیواره، در فاصلهٔ دورتری از ورودی میکروکانال به ثبات رسیدهاست.

تأثیر مقدار K بر مقدار پرش دمایی در یک نادسن مشخص، در شکل ۱۰ مشاهده میشود. پارامتر K بیانگر ویژگیهای سطح جامد و گاز میباشد. 0.0 = K حالت خاصی از جریان است که اثرات لغزش بدون پرش دمایی برروی جریان مشاهده میشود. همچنین 10.0=K حالت حدی دیگری است که پرش دمایی بزرگی بر روی دیواره مشاهده میشود. پرش دمایی بزرگی بر روی دیواره مشاهده میشود. که به سبب استفاده زیاد در کاربردهای مهندسی، بررسی میشود. همچنین در این شکل وابستگی طول ورودی به مقادیر K دیده میشود.

8-3- بررسی اثرات اتلاف لزجت

۶-۳-۱- اثرات اتلاف لزجت بر روی عدد ناسلت محلی در برینکمن مثبت

برای نشان دادن اثرات عدد برینکمن که در کانالهای طویل و در ابعاد میکرو اهمیت می ابد، معادلهٔ انرژی شامل ترم اتلاف لزجت به روش عددی حل شده است. عدد ناسلت محلی بر حسب پارامتر طول بی بعد $\frac{2}{5}$ در ناحیهٔ دما ثابت دیواره، برای عددهای نادسن مختلف و برای برینکمن های مختلف شامل ۰ و عددهای نادسن مختلف و برای برینکمن های مختلف شامل ۰ و آمدهاست. برای پوشش کامل رژیم لغزشی حل ها در بازهٔ آمدهاست. 0.0 < Kn < 0.1





در بین پارامترهای بررسی شده بر روی پرش دمایی که در

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در ...

قسمت ۶ -۲ آورده شده (رقت، کایا و یکله)، تأثیر مقدار کایا در رژیم لغزشی شاخصتر از سایر موارد بوده است. از روابط بخش ۳ واضح است که عدد ناسلت در رژیم جریان لغزشی تابعی از عدد نادسن و پارامتر k میباشد. عدد نادسن بیانگر اثر رقت و پارامتر K بیانگر ویژگیهای سطح جامد و گاز مىباشد.

شکلهای ۱۱ و ۱۲ تغییرات ناسلت محلی بر حسب طول بی بعد را در مقادیر مختلف κ و مقادیر مثبت برینکمن نشان میدهند. مقادیر مثبت برینکمن بیانگر آن است که سیال تحت دمای یکنواخت دیواره، سرد می شود.



شکل ۱۱ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی بعد تح در برینکمن های



شکل ۱۲ عدد ناسلت محلی برحسب طول بی بعد $\frac{z}{2}$ در برینکمن های Pe = 5 , $\kappa = 1.667$ مثبت و رقتهای مختلف

Pe = 5 , Kn = 0.08 مثبت و کاپاهای مختلف

طبق انتظار با اعمال دمای ثابت دیواره و در حالت بدون اتلاف لزجت، عدد ناسلت مقادیر بزرگی را در ناحیه ورودی اختيار كرده است. اين مقادير در طول ميكروكانال كاهش يافته و سیس به ثبات می رسد. در حالت عدد برینکمن غیر صفر، ناسلت یک پرش را از ۶/۲۵۹۸ در Br = 0.0 به مقدار در حالت $\kappa = 0.0$ در حالت $\mathrm{Br} = 0.1$ در است. $\mathrm{Br} = 0.1$ این یدیده بر اهمیت در نظر گرفتن اتلاف لزجت تأکید دارد. یکی از نتایج این نمودار، کاهش مقادیر Nu موضعی در اثر افزایش عدد K می اشد به طوری که در K = 0.0 که پرش دمایی در مجاورت دیواره رخ نمیدهد، ناسلت محلی بعد از نقطه پرش به مقدار بالای ۱۵/۹۷ میرسد.

نتيجهٔ مهم ديگر آن که عدد برينکمن تنها بر روى محل وقوع پرش تأثير گذاشته است نه بر مقدار ناسلت توسعهيافته. مقدار ناسلت توسعه یافته در حالت با اتلاف لزجت فارغ از مقدار عدد برینکمن، نسبت به حالت بدون اتلاف لزجت دارای پرشی مى باشد. نقطهٔ پرش با افزايش عدد برينكمن به ناحيهٔ ورودى میکروکانال متمایل می شود. این امر مؤید این نتیجه است که برای کانالهای کوتاه اثر عدد برینکمن ضعیفتر و قابل چشمیوشی است. در حالی که برای کانالهای طویل، باید اثر اتلاف لزجت حتى براى مقادير كوچک برينكمن در نظر گرفته شود. برای $\kappa = 1.667$ عدد ناسلت توسعه یافته از ۶/۲۵۹۸ به ۱۰/۴۲۲۶ یرش یافته که نشاندهندهٔ ۶۶٪ افزایش می باشد. در حالی که در $\kappa = 0.0$ از مقدار ۷/۷۴۴۷ به ۱۵/۹۷۰۳ بوده و این پرش به میزان ۱۰۱٪ بودهاست. درنتیجه می توان گفت اهمیت پرش عدد ناسلت با افزایش κ کاهش می یابد. همچنین با افزایش عدد κ ، محل پرش، از ورودی میکروکانال فاصله گرفته است.

در نظر گرفتن اتلاف لزجت در معادله انرژی مانند وجود یک منبع گرمایی در داخل سیال عمل کرده و هرچه عدد برینکمن افزوده شود اثر این ترم در طولهای کمتری از ورودی کانال خود را نشان میدهد و متمایل شدن نقطهٔ پرش به ورودی ميكروكانال نيز به همين سبب ميباشد.

در شکل ۱۲ اثر میزان رقت بر روی عدد ناسلت محلی در برینکمن صفر و مقادیر مثبت آن نشان داده شده است. میزان پرش عدد ناسلت در مقادیر کمتر نادسن چشمگیرتر بوده و می توان گفت بیشترین پرش عدد ناسلت در اثر اتلاف لزجت،

> مهندسی مکانیک مدرس شهریور ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۶ www.SID.ir

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در . . .

رامیار مازوجی و همکار

در جریان پیوسته و کمترینِ آن در حد بالایی رژیم لغزشی (Kn = 0.10) رخ میدهد.

افزایش رقت برخورد مولکولهای سیال و سطح جامد را کمتر کرده و با کاهش گرادیان دمایی در مجاورت دیواره نرخ انتقال حرارت را کمتر از حالتهای جریان پیوسته خواهد کرد. البته افزایش سرعت لغزشی در اثر رقت سیال گازی، باعث افزایش جزئی عدد ناسلت خواهد شد ولی در نهایت سایر پارامترها هستند که تعیین کننده میباشند. ملاحظه میشود که در حالت بررسی شده اثر متقابل افزایش سرعت لغزشی و پرش دمایی درنهایت با کاهش عدد ناسلت همراه بوده است. همچنین با افزایش رقت، محل پرش از ورودی کانال فاصله گرفته است.

۶-۳-۲- اثرات اتلاف لزجت بر روی عدد ناسلت محلی در برینکمن منفی

شکلهای ۱۳ و ۱۴ نشاندهندهٔ تغییرات عدد ناسلت محلی در اعداد منفی برینکمن میباشند. با توجه به تعریف عدد برینکمن، در این حالت، سیال گرمادهی میشود. واضح است که نقاط منفردی^۱ وجود دارند که در آنها دمای سیال با دمای دیواره برابر خواهد شد. در این نقاط مکانیزم انتقال حرارت معکوس خواهد شد و کانالی که برای سردسازی دیواره (یعنی گرم شدن سیال) طراحی شده است، شروع به گرم کردن دیواره میکند و این از نتایج مهم حضور اتلاف لزجت در مسألهٔ حاضر میباشد. مکانیزم اشاره شده باعث شده که در ادامهٔ طول میروکانال مسأله به همان مسألهٔ برینکمنِ مثبت تبدیل شده و کل منحنیها به همان مقادیر ناسلت توسعه یافتهٔ قبلی برسد.

وقتی عدد برینکمن فارغ از علامت آن، بزرگ می شود، محل نقطهٔ منفرد به ورودی میکروکانال نزدیکتر شده است، به این دلیل که در طول کمتری از میکروکانال دمای میانگین سیال به دمای دیوارهٔ جامد خواهد رسید و مکانیزم انتقال حرارت معکوس خواهد شد.

تمامی نتایج و بحثهای بیان شده در مورد اعداد برینکمن مثبت و ارتباط بین محل پرش و عدد نادسن و عدد کاپا در اینجا (برینکمن منفی) نیز صادق است و از تکرار بیان آنها خودداری می شود.

برای نشان دادن اثرگذاری مقدار رقت بر روی مقدار و محل پرش، منحنی تغییرات ناسلت محلی برای هر سه مقدار ممکن برینکمن در شکل ۱۴ رسم شدهاست.



شکل ۱۳ عدد ناسلت محلی برحسب طول بیبعد ⁵ در برینکمنهای منفی و کاپاهای مختلف و Pe = 5 , Kn = 0.08



شکل ۱۴ عدد ناسلت محلی برحسب طول بیبعد ²خ با اتلاف لزجت و بدون اتلاف لزجت در رقتهای مختلف و Pe = 5, K = 1.667

با افزایش رقت، بزرگی پرش عدد ناسلت کاهش یافته است. بهعنوان مثال برای Kn = 0.005 ناسلت از ۷/۳۳۸۰ به ۱۵/۰۷۳۴ پرش کرده که نشاندهندهٔ ۱۰۵٪ افزایش است و در Kn = 0.08 ناسلت از مقدار ۶/۲۵۹۸ به ۱۰/۴۲۲۷ پرش نموده که نشاندهندهٔ ۶۶٪ پرش می باشد. با افزایش رقت، محل پرش و محل نقطهٔ منفرد از ورودی فاصله گرفته است.

^{1.} Singular

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در ...

۴-۶- بررسی عدد ناسلت توسعه یافته

شکل ۱۵ عدد ناسلت کاملاً توسعه یافته را بهعنوان تابعی از Kn و Br در K = 1.667 = K نشان میدهد. ملاحظه میشود که عدد ناسلت توسعهیافته با افزایش رقت کاهش مییابد و این کاهش با حضور اتلاف لزجت با شیب بیشتری صورت میپذیرد. این اثر بهدلیل کاهش گرادیان دما در مجاورت دیواره، با اعمال شرایط مرزی پرش دمایی ظاهر میشود. در شکل ۱۵ خط شرایط مرزی پرش دمایی ظاهر میشود. در حالت کلاسیک بدون اتلاف لزجت، بدون اثرات رقت و بدون هدایت محوری میباشد، معیار مناسبی برای مشاهدهٔ اثرات پارامترهای نامبرده بر انتقال حرارت میکروکانال است.

مقادیر ناسلت توسعه یافته در رژیم جریان لغزشی و با حضور ترم اتلاف لزجت در پکلههای مختلف در جدول ۲ آورده شده است. این جدول در نگاه اول بیانگر افزایش چشم گیر عدد ناسلت نسبت به حالت بدون اتلاف لزجت میباشد. در این جدول میتوان دید که وابستگی به عدد پکله زیاد نبوده در حالی که در طول رژیم جریان لغزشی، عدد ناسلت شاهد افت بالایی بوده است. طبق جدول ۲ در نادسن و برینکمن ثابت، عدد ناسلت خیلی کم از عدد پکله تأثیر پذیرفته است. البته این تابعیت در نادسنهای کمتر، قوی تر بوده است.

عدد ناسلت توسعه یافته با افزایش عدد نادسن از ۲ نظر تحت تأثیر قرار می گیرد. یکی این که با افزایش سرعت لغزشی انتقال حرارت افزایش یافته و دیگر این که با افزایش پرش دمایی در دیواره، انتقال حرارت کاهش مییابد.



شکل 1۵ عدد ناسلت توسعهیافته برحسب عدد نادسن با احتساب Pe = 5, κ = 1.667 اتلاف لزجت و بدون اتلاف لزجت در

جدول ۲ اعداد ناسلت توسعه یافته با احتساب اتلاف لزجت در پکله

 $\kappa = 1.667$, $\mathrm{Br} = +0.01$ و اعداد نادسن مختلف

Pe = 20	Pe = 10	Pe = 5	Pe = 2	Kn
14/8348	10/0779	10/08	10/08	•/••
17/9180	13/7666	13/2616	13/2619	•/•٢
11/2114	17/4812	17/4222	17/4222	•/•۴
1./8026	۱۱/۳۵۵۸	11/3813	11/3813	•/•۶
9/3414	1.14118	1./419.	1./4188	•/•٨
٨/۵۶۰۷	٩/۶٠٧۶	9/8174	٩/۶١٧۵	•/١•

این دو مکانیزم در جهتهای مخالف، عدد ناسلت توسعه یافته را تحت تأثیر قرار میدهند که اثر نهایی افزایش نادسن، به دیگر پارامترهای مؤثر از جمله برینکمن و کاپا وابسته است. در محدودهٔ بررسی شده در مسألهٔ حاضر، کاهش گرادیان دمایی اثر غالب بوده و عدد ناسلت را با کاهش مواجه می سازد.

۶- نتیجهگیری

در این تحقیق با مطالعهٔ جریان سیال گازی درون یک میکروکانال با دمای یکنواخت دیواره مشخص شد که ویژگیهای هیدرودینامیکی و انتقال حرارت با آنچه که در ابعاد ماکرو رخ میدهد بهطور قابل ملاحظهای متفاوت است. مختصری از نتایج حاصل در زیر آمده است:

افزایش عدد نادسن، سرعت لغزشی در دیواره را افزایش
 داده و سرعت در خط مرکزی را کاهش میدهد. همچنین
 افزایش عدد نادسن سرعت عرضی را در ناحیهٔ ورودی
 کاهش میدهد.

- با افزایش نادسن پرش دمایی در مجاورت دیواره بزرگتر میشود و مقادیر آن بهشدت متأثر از عدد کاپا میباشد.

- ترم خزش در رژیم جریان لغزشی که عدد نادسن در محدودهٔ 0.00 kn <0.1 میباشد، تأثیر ضعیفی بر روی سرعت لغزشی در دیوارهها دارد.

- عدد برینکمن غیرصفر بهطور چشم گیری عدد ناسلت را به مقدار بالاتری جهش میدهد. مقدار جهش مستقل از مقدار برینکمن میباشد.

– عدد ناسلت توسعه یافته در مورد اعداد مثبت و منفیِ برینکمن یکسان بوده در حالی که رفتار عدد ناسلت محلی کاملاً متفاوت از هم است.

- نقطهٔ پرش با افزایش عدد برینکمن به ناحیهٔ ورودی

ەپىندىسى مكائىيك ھەرسى شەربور ١٣٩٢. دورة ١٣ شمارة ۶ www.SID.ir

۸- مراجع

- Gad-el-Hak, M., "The Fluid Mechanics of Microdevices-The Freeman Scholar Lecture", *Journal* of Fluids Engineering, Vol. 121, No. 5, 1999.
- [2] Tuckerman, D. B. and Pease, R.F.W., "Optimized Convective Cooling using Microma-chined Structure", *J. Electrochem. Soc*, Vol. 3, No. 129, 1982.
- [3] Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., "High-Performance Heat Sinking for VLSI", *IEEE Electron Device Letter*, Vol. 5, No. 2, 1981, pp. 126-129.
- [4] Ebert, W. A., and Sparrow, E. M. "Slip Flow in Rectangular And Annular Ducts", *J. Basic Engineering*, Trans. of the ASME, Vol. 87, 1965, pp. 1018-1024.
- [5] Beskok, A., and Karniadakis, G. E., "Simulation of Heat and Momentum Transfer in Complex Micro Geometries", *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 4, No. 8, 1994, pp. 647-655.
- [6] Zhu, X., and Liao, Q., "Heat Transfer For Laminar Slip Flow in a Microchannel of Arbitrary Cross Section With Complex Thermal Boundary Condition", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 26, 2005, pp. 1246-1256.
- [7] Cetin, B., Yuncu, H., and Kackac, S., "Gaseous Flow in Microchannels with Viscous Dissipation", *Int.J. Transfer Phenom.*, Vol. 4, No. 8, 2006, pp. 297-315.
- [8] 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, 2008, pp. 5088-5096.

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در . . .

میکروکانال متمایل می شود. به عبارتی دیگر برای کانالهای کوتاه اثر عدد برینکمن ضعیفتر و قابل چشمپوشی است. در حالیکه برای کانالهای طویل، باید اثر عدد برینکمن حتی برای مقادیر کوچک آن در نظر گرفته شود.

- افزایش عدد نادسن با کاهش گرادیان دمایی و افزایش سرعت لغزشی، انتقال حرارت را از دو جهت مخالفِ هم تحت تأثیر قرار میدهد.

- عدد ناسلت توسعه یافته به صورت ضعیفی با افزایش پکله، زیاد شده درحالی که اثر رقت برروی آن قوی می باشد.

۷- فهرست علايم

Br = $\left(\mu u_m^2 / k (T_i - T_w)\right)$ عدد برینکمن Br ظرفیت گرمایی ویژه c_{p} قطر هيدروليكي D_H فاصلة صفحات موازى Η ضريب هدايت حرارتي k $Kn = (\lambda/D_{H})$ عدد بی بعد نادسن Kn طول ميكروكانال L تعداد تکرار در حل عددی n Nu= hD_{h}/k عدد ناسلت Nu عدد ناسلت توسعه بافته Nu_D $Nu_x = hD_h / k$ عدد ناسلت موضعی Nu_x فشار Р فشار اتمسفر P_{θ} عدد یکله Pe=Re · Pr Pe $\Pr = \mu c_n / k$ عدد یرانتل Pr Re = $\rho u_m D_H / \mu$ عدد رينولدز Re دمای سیال Т سرعت محورى u سرعت عرضى v جهت محورى ميكروكانال x جهت عرضي ميكروكانال y $\xi = x^* / \operatorname{Re} \cdot \operatorname{Pr}$ متغییر بیبعد طولی ξ نسبت حرارتی ویژہ γ متغيير وابسته بي بعد φ معیار پرش دمایی روی مرز κ

مهندسی مکانیک مدرس شهریور ۱۳۹۲، دورهٔ ۱۳ شمارهٔ ۶

بررسی اثرات اتلاف لزجت روی انتقال حرارت سیال گازی در ...

- [12] Versteeg, H. K., and Malalasekera, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method, Henk Kaarle, 1955.
- [13] Patankar, S. V., "Numerical heat transfer and fluid flow", Hemisphere Publication Corporation, Washington, 1980.
- [14] Barber, R. W., and Emerson, D. R., "A Numerical Study of Low Reynolds Number Slip Flow in the Hydrodynamic Development Region of Circular And Parallel Plate Ducts", Centre for Microfluidics, Department of Computational Science and Engineering, CLRC Daresbury Laboratory, Daresbury, Warrington,. 2002.
- [9] Colin, S., "Gas Microflows in the Slip Flow Regime: A Critical Review on Convective Heat Transfer", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 134, No. 020908-1, 2012.
- [10] Qazi Zade, A., Renksizbulut, M., and Friedman, J., "Heat Transfer Characteristics of Developing Gaseous Slip-Flow in Rectangular Microchannels with Variable Physical Properties", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No. 1, 2011, pp. 117-127.
- [11] Maxwell, J. C., "On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Part 1, Vol. 170, 1879, pp. 231-256.