

بررسی جریان لغزشی گازی بواسطه خزش حرارتی درون میکروکانال

آرین اسبقی^۱، مجید قاسمی^۲

۱- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی

چکیده

امروزه کاهش مصرف انرژی اهمیت روزافزونی پیدا کرده است و همسو با تلاش در جهت افزایش کارایی سیستم‌ها و کاهش قیمت تولید، تقاضا برای ساخت تجهیزات در ابعاد کوچک‌تر، رو به گسترش می‌باشد. در این میان میکروکانال‌ها که در طیف وسیعی از تجهیزات مورد استفاده قرار می‌گیرند از این قاعده مستثنی نبوده و تحقیقات گسترده‌ای در این راستا صورت پذیرفته است. این تحقیقات در زمینه میکروکانال‌ها به بررسی نحوه عبور سیال و معادلات حاکم بر جریان می‌پردازد. در جداره‌های کانال با ابعاد میکرون، اغلب با پدیده‌های پرش حرارتی و لغزش سرعت مواجه می‌شویم. در نتیجه وجود این پدیده‌ها در نواحی نزدیک به دیواره کانال، دیگر قادر به استفاده از معادلات ناویر-استوکس و انرژی که در ابعاد ماکرو به کار می‌روند نخواهیم بود و نیاز است تا شرایط مرزی جدیدی در راستای تحلیل صحیح جریان بکار برده شود. در این مقاله سعی بر آن است تا پارامترهای موثر و معادلات حاکم بر رژیم‌های گوناگون معرفی گردند، همچنین به معرفی عدد نادسن که در تقسیم‌بندی رژیم‌های مختلف جریان نقش بسزایی ایفا می‌کند پرداخته و از این میان به بسط و توصیف رژیم جریان لغزشی، یکی از پرکاربردترین رژیم‌های حاکم بر میکروکانال‌ها خواهیم پرداخت و در نهایت معادلات حاکم بر این رژیم به همراه شرایط مرزی موجود همچون لغزش سرعت و پرش حرارتی معرفی خواهند شد. در پایان نیز به معرفی پدیده خزش حرارتی پرداخته و نشان داده خواهد شد که چگونه بدون داشتن اختلاف فشار، تنها با بهره از گرادیان دمایی قادر به برقراری جریان در طول کانال خواهیم بود.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال، جریان لغزشی، خزش حرارتی

St_a_asbaghi@azad.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد علم و پیشرفت تکنولوژی شاهد گسترش روزافزون سیستم‌هایی با ابعاد میکرو و نانو هستیم، این سیستم‌ها بدلیل کاربردهای وسیعی که در رشته‌های مختلف همچون سرمایه‌ش، دارورسانی، سنسورهای گازی و ... دارند از محبوبیت چشم‌گیری برخوردار هستند. هرچه زمان به پیش می‌رود و سیستم‌های پیچیده‌تری ظهور می‌یابند، ابعاد این سیستم‌ها نیز به سمت کوچک‌تر شدن سوق پیدا می‌کند که این روند دارای نقاط قوت برجسته‌ای می‌باشد و از طرفی به پیچیده شدن محاسبات می‌انجامد.

زمانی که ابعاد دستگاه به مقیاس میکرو نزدیک می‌شود (دستگاه میکروفلوئیدیک)، نسبت سطح به حجم بطور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. بنابراین پدیده‌های سطحی بر دیگر پدیده‌ها غلبه می‌کنند [۱]. به عنوان مثال مبدل‌های حرارتی یا مخلوط‌کن‌ها در ابعاد میکرونی، انتقال جرم و حرارت بیشتری نسبت به سیستم‌های ماکرو با همان ظرفیت ارائه می‌دهند. همچنین این وسائل دارای مزایایی همانند قیمت پایین ساخت، ابعاد کوچک و مصرف کم انرژی می‌باشند.

هم زمان با پیچیده‌تر شدن این وسایل ابعاد آن‌ها نیز به سمت کوچک‌تر شدن سوق پیدا کرده و در اینجاست که قواعد و اصول پذیرفته شده در ابعاد ماکرو با مشکل روبرو می‌شوند. به عنوان

یک نمونه خوب می‌توان به اثر لغزش جریان اشاره کرد. در ابعاد ماکرو همیشه با دقت قابل قبولی با فرض عدم لغزش در دیواره روبرو هستیم. بدین معنی که سیال در مجاورت دیواره حرکتی نداشته و سرعتش برابر صفر می‌باشد اما در تجهیزات با ابعاد کوچک‌تر از میکرون، اثر لغزشی سیال بر دیواره فرض عدم لغزش را بی‌اساس می‌نماید و نشان می‌دهد که سیال در مجاورت جداره دارای سرعتی مخالف صفر بوده و اصطلاحاً بر روی دیواره می‌لغزد. همچنین زمانی که انتقال گرما و جرم داشته باشیم پرش حرارتی در مجاورت دیواره رخ خواهد داد که در بخش ۲-۲ به این موضوع بیشتر پرداخته خواهد شد [۲].

در این سال‌ها بمنظور بررسی ترکیبات آلی فرار همچون SO_2 ، NH_3 ، CO_2 و غیره تحقیقات بر روی میکروسنسورهای گازی از سرعت رشد بالایی برخوردار بوده است. بیشترین خواصی که در میکروسنسورهای گازی مورد بررسی قرار می‌گیرد پایداری نتایج ارائه شده و میزان حساسیت آن‌ها می‌باشد. کارایی میکروسنسورها بوسیله این شاخص‌ها تحلیل و بررسی می‌شود.

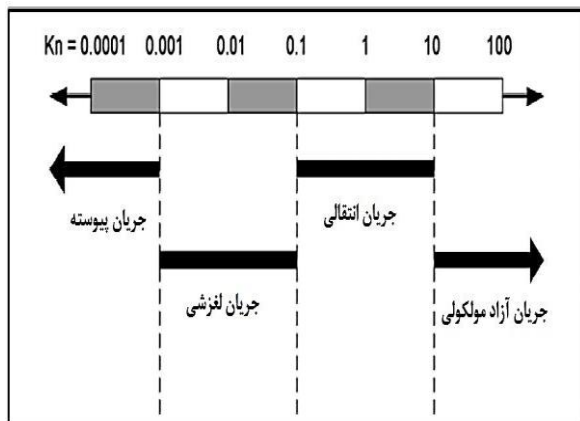
به طور معمول آنالیز آلایندة در اتمسفر واقعی صورت می‌پذیرد که در این شرایط ثابت نگه داشتن متغیرهای محیطی همچون دما، حجم و دبی جریان بسیار سخت می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل مجدد در شرایط محیطی گوناگون این متغیرها باید تحت کنترل باشند. میکروسنسورهای گازی نیاز دارند تا در شرایط معینی

داشته و توسط معادلات متفاوتی تحلیل می‌شود که در ادامه به معرفی آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲-۱- رژیم‌های مختلف جریان براساس عدد نادسن

برای اینکه در کانال‌ها تعادل ترمودینامیکی برقرار باشد، باید عدد نادسن (Kn) کمتر از یک باشد. عدد نادسن نقش مهمی در جریان‌های گازی در ابعاد میکرو و نانو ایفا می‌کند. از آنجایی که عدد نادسن تنها پارامتری نیست که در جریان‌های محدود و در ابعاد پایین باید مورد توجه قرار گیرد می‌توان به این نتیجه رسید که تشابه بین جریان‌های کم فشار و جریان‌های محدود می‌تواند کامل باشد. با این حال غیر معقول می‌باشد که رژیم‌های مختلف جریان را بصورت تابعی از عدد نادسن بیان نماییم [۶]. این دسته‌بندی را می‌توان بصورت زیر نشان داد:

- در بازه $Kn < 10^{-3}$ جریان به عنوان جریان پیوسته شناخته می‌شود. این جریان را می‌توان با دقت قابل قبولی بوسیله معادله تراکم‌پذیر ناویر-استوکس با شرایط مرزی مرسوم با در نظر گرفتن شرایط مرزی بدون لغزش مدل نمود.
 - در بازه $10^{-1} < Kn < 10^{-3}$ جریان یک جریان لغزشی معرفی می‌شود که هنوز بوسیله معادله ناویر-استوکس بیان می‌شود با این تفاوت که در مجاورت جداره باید لغزش سرعت و پرش حرارتی را اعمال نماییم. این شرایط مرزی جدید مشخص می‌نماید که اثر رقت ابتدا در دیواره مشاهده می‌شود.
 - در بازه $10 < Kn < 10^{-1}$ جریان یک جریان انتقالی محسوب می‌شود و شرط پیوستگی و استفاده از معادله ناویر-استوکس بیش از این قابل استفاده می‌باشد. اگرچه برخوردهای بین مولکولی هنوز هم باید مورد توجه قرار گیرند و قابل چشم‌پوشی نمی‌باشند.
 - در بازه $Kn > 10$ با یک جریان مولکولی آزاد روبرو هستیم و برخوردهای بین مولکولی در مقایسه با برخورد مولکول‌ها با دیواره قابل چشم‌پوشی می‌باشند [۷].
- در شکل ۲ می‌توان تقسیم‌بندی رژیم‌های گوناگون جریان را مشاهده نمود. شکل ۳ نیز معادلات و شرایط مرزی معتبر در بازه‌های مختلف را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- رژیم‌های جریان بر اساس عدد نادسن [۸]

به کار گرفته شوند که برای دستیابی به این هدف می‌توان آن‌ها را در دستگاه میکروفلوئیدیک تعبیه نمود. دستگاه‌های میکروفلوئیدیک بطور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل شیمیایی، بیوشیمیایی و نظارت بر محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. این دستگاه‌ها خیلی کوچکتر از سیستم‌های تحلیل جریان معمول بوده و انتظار می‌رود در کنترل پارامترهای گاز موثرتر عمل نمایند [۳]. زمانی که ابعاد کانال کوچک می‌شود، ابعاد مولکول‌ها و فواصل بین آن‌ها اهمیت می‌یابند و نیاز است تا پارامترهای جدیدی تعریف گردند. در بخش بعد به معرفی این پارامترها پرداخته و عدد نادسن که از شاخصه‌های مهم در جریان‌هایی با مقیاس نانو و میکرون می‌باشد را معرفی می‌نماییم.

۲- گازها در مقیاس نانو

جریان‌هایی که در ابعاد میکرو و نانو مورد بررسی قرار می‌گیرند نیازمند آن هستند تا مولفه‌های جدیدی در جهت مدل‌سازی تعاملات بین مولکولی تعریف گردند. در سطح مولکولی میانگین قطر مولکولی (d)، میانگین فضای بین مولکولی (δ) و پویش آزاد میانگین (λ) را در نظر خواهیم گرفت (شکل ۱) [۴].

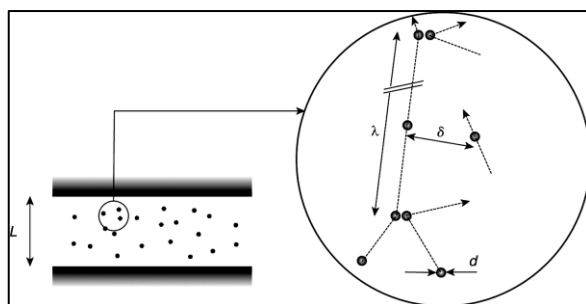
از دیگر مولفه‌های موثر در این مقیاس می‌توان به عدد بی‌بعد نادسن اشاره نمود که در مسائلی با مقیاس طولی بسیار کوچک و یا در زمان استفاده از گازهای بسیار رقیق بکار گرفته می‌شود. از این عدد به عنوان شاخصی برای اعتبار معادله پیوستگی استفاده می‌شود. عدد نادسن بصورت زیر تعریف می‌گردد:

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

در این معادله L طول مشخصه سیستم می‌باشد. که در جریان داخل کانال عموماً L همان قطر هیدرولیک یا ارتفاع کانال می‌باشد. λ نیز همانگونه که پیشتر معرفی گردید پویش آزاد میانگین می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۵]:

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho \sqrt{2RT/\pi}} \quad (2)$$

در معادله (۲) μ لزجت دینامیکی $[N.s/m^2]$ ، R ثابت جهانی گازها و برابر $R = 287 \text{ J/kg.K}$ ، ρ غلظت گاز با واحد $[kg/m^3]$ و T دما با واحد $[K]$ می‌باشند.



شکل ۱- پارامترهای موثر در ابعاد بین مولکولی [۴]

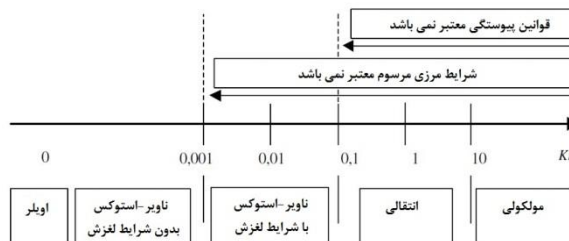
عدد نادسن رژیم‌های جریان را به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌نماید که در هر یک از این رژیم‌ها، جریان خواص منحصر- به فردی

در رابطه بالا، n جهت عمود بر دیواره و ξ ضریب لغزش می‌باشد.

ماکسول با استفاده از پایستگی مومنوم، به توسعه رابطه ۳ پرداخت [۱۱].

ماکسول سطح را در شرایطی بین دو حالت، یکی کاملاً جاذب و دیگری کاملاً دافع در نظر گرفت. بنابراین او فرض کرد که برای هر واحدی از سطح بخشی از مولکول توسط سطح جذب می‌گردد (بدلیل وجود زبری در دیوار یا بدلیل عملیات تبخیر-چگالش [۱۲]) که با σ نشان داده می‌شود. پس از آن، این بخشی از مولکول‌ها با سرعت مربوط و در دمای دیوار دوباره بازتابیده می‌شوند. بخش دیگری از مولکول‌ها $(1 - \sigma)$ به طور کامل توسط جدار منعکس می‌شوند. ضریب بدون بعد σ به نام ضریب تطابق مومنوم مماسی شناخته می‌شود. در جریان غیر لزج این ضریب برابر صفر می‌باشد و مومنوم مماسی مولکول‌های برخوردی با مولکول‌های بازتابیده شده برابر بوده و هیچ مومنومی به جدار منتقل نمی‌شود. به این نوع بازتاب، بازتاب منظم گفته می‌شود. بلعکس وقتی که $\sigma = 1$ باشد، مولکول‌های گاز تمام مومنوم خود را به جدار منتقل می‌کنند و بازتاب را، بازتاب دیفیوز (پخش شده) گویند.

با حذف ترم دوم از سمت راست رابطه ۴ (به دلیل حضور مشتق مرتبه دوم و کوچک بودن در مقایسه با ترم‌های دیگر) و استفاده از روابط ۱ و ۲، خواهیم داشت:



شکل ۳ - کاربرد معادلات و شرایط مرزی گوناگون بر اساس عدد نادسن [۸]
۲-۲-۲- شرایط مرزی در محدوده جریان لغزشی

در این مقاله تمرکز بر معرفی معادلات و شرایط مرزی در محدوده جریان لغزشی می‌باشد، چرا که در ابعاد پایین این نوع جریان از کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشد. همانطور که در بخش قبل اشاره شد در این نوع جریان هنوز معادلات ناویر-استوکس و انرژی در بخش عمده‌ای از کانال قابل استفاده هستند [۹] و تنها در محدوده‌ای در مجاورت کانال که به لایه مرزی نادسن شناخته می‌شود نیاز است که شرایط مرزی جدید تعریف گردد. در ادامه به معرفی معادلات مربوطه خواهیم پرداخت.

۲-۲-۱- شروط مرزی سرعت

همانگونه که ذکر گردید و در شکل ۴ قابل مشاهده است در جریان لغزشی سرعت در جداره مخالف صفر بوده و برای جریان گاز در جهت s (موازی با دیواره)، معادله سرعت لغزشی مرتبه اول با استفاده از تئوری کونت و واربورگ از رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۱۰].

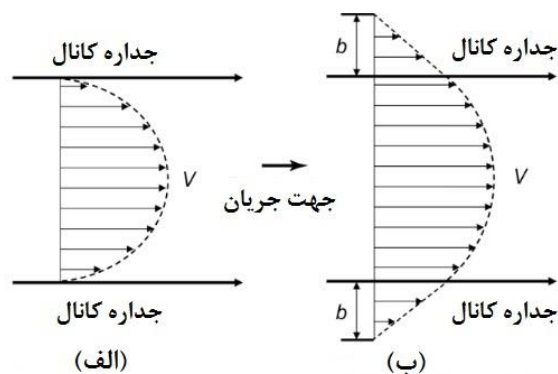
$$u_{slip} = u_s - u_{wall} = \xi \left. \frac{\partial u_s}{\partial n} \right|_w \quad (3)$$

$$u_{slip} = u_s - u_{wall} = \frac{2 - \sigma}{\sigma} \lambda_M \left(\frac{\partial u_s}{\partial n} - \frac{3}{2} \frac{\mu}{\rho T} \frac{\partial^2 T}{\partial s \partial n} \right)_w + \frac{3}{4} \left(\frac{\mu}{\rho T} \frac{\partial T}{\partial s} \right)_w \quad (4)$$

$$u_{slip} = u_s - u_{wall} = \frac{2 - \sigma}{\sigma} \lambda \left. \frac{\partial u_s}{\partial n} \right|_w + \frac{3}{4} \frac{\mu}{\rho T} \left. \frac{\partial T}{\partial s} \right|_w = \frac{2 - \sigma}{\sigma} \lambda \left. \frac{\partial u_s}{\partial n} \right|_w + \frac{3}{4} \frac{\lambda}{k_2} \sqrt{\frac{R}{T}} \left. \frac{\partial T}{\partial s} \right|_w \quad (5)$$

در زیر بی‌بعد شده رابطه ۵ نمایش داده شده است:

$$u_s^* - u_{wall}^* = \frac{2 - \sigma}{\sigma} Kn \left. \frac{\partial u_s^*}{\partial n^*} \right|_w + \frac{3}{4} \frac{Kn^2 Re_0}{\gamma k_2^2} \frac{\partial T^*}{\partial s^*} \bigg|_w \quad (6)$$



شکل ۴ - پروفایل سرعت در (الف) غیاب جریان لغزشی در جداره (ب) در حضور جریان لغزشی در جداره [۱۵]

که در آن، $u_s^* = \frac{u_s}{u_0}$ ، $T^* = \frac{T}{T_0}$ ، $n^* = \frac{n}{L}$ ، $s^* = \frac{s}{L}$ می‌باشد. ضریب تطابق به عوامل مختلفی که برخوردهای سطحی را تحت تاثیر قرار می‌دهند بستگی دارد. از این عوامل می‌توان به اندازه و جهت سرعت اشاره نمود. خوشبختانه این ضرایب برای هر ترکیب مشخصی از گاز و سطح ثابت می‌باشد [۱۳]. اندازه‌گیری‌های زیادی از σ انجام گرفته است [۱۴] که اکثر آن‌ها با اندازه‌گیری‌های غیرمستقیم ماکروسکوپی انجام گرفته و تعدادی نیز با تکنیک تشعشع مولکولی بصورت مستقیم صورت پذیرفته است. مقادیر σ بین ۰/۶ تا ۱ گزارش شده که عمدتاً در بازه ۰/۸۵ تا ۱ بوده است.

دو ظرف حاوی گاز یکسانی را در نظر بگیرید که در فشار برابری نگهداری می‌شوند ($P_1 = P_2$) اما دمای یک ظرف بیشتر از دیگری می‌باشد ($T_1 > T_2$). این دو ظرف را بوسیله کانالی به یکدیگر متصل می‌نماییم (شکل ۵). اگر ارتفاع کانال (h) بسیار بزرگتر از مقدار پویش آزاد میانگین (λ) باشد شرایط تعادلی اجازه نخواهند داد سیال در کانال به جریان درآید. حال اگر ارتفاع کانال هم اندازه مقدار پویش آزاد باشد باید تاثیر گاز رقیق نیز در نظر گرفته شود و برخورد مولکول‌های گاز با جداره نیز مورد بررسی قرار گیرد که این امر باعث پیچیده شدن شرایط تعادلی می‌گردد. از همین روی به منظور ساده‌سازی مساله ما شرایط جریان آزاد مولکولی را در نظر گرفته و ارتفاع کانال را بسیار کمتر از λ در نظر می‌گیریم. در این رژیم جریان، برخوردهای بین مولکولی در مقایسه با برخورد مولکول‌ها با سطح قابل چشم‌پوشی بوده و می‌توان تحلیل پیش رو را قابل قبول دانست. فرض می‌کنیم چگالی سیال با چگالی مولکولی -مقدار مولکول‌ها در واحد حجم- متناسب باشد ($\rho \propto n$). همچنین از معادله حالت داریم:

$$P = \rho RT \quad (10)$$

همچنین میانگین سرعت گازها برابر است با [۱۷]:

$$\bar{c} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}} = \sqrt{3RT} \quad (11)$$

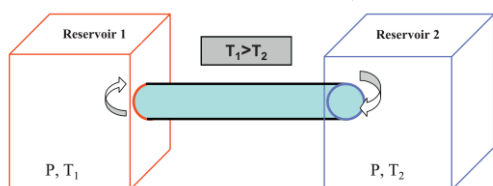
در نتیجه $T \propto \bar{c}^2$ می‌باشد. دبی جرمی در دو خروجی گرم و سرد کانال برابر است با:

$$mn_1\bar{c}_1 \text{ و } mn_2\bar{c}_2 \quad (12)$$

که در این روابط m جرم مولکول‌های گاز می‌باشد. با استفاده از روابط بالا می‌توان تحلیل کرد که [۱۸]:

$$\frac{mn_1\bar{c}_1}{mn_2\bar{c}_2} \approx \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{0.5} = \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.5} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{0.5} \leq 1 \quad (13)$$

و این تحلیل نشان می‌دهد که جریان از سمت سرد به سمت گرم جریان پیدا می‌کند. رینولدز اولین کسی بود که پی به این پدیده برد. او این پدیده را تعرق حرارتی نامید. تقریباً در همان زمان ماکسول نیز بطور مستقل در حال گسترش تئوری خزش حرارتی بود. در اوایل قرن بیستم نیز نادسن با بهره از ایده تعرق حرارتی موفق به ساخت کمپرسور مولکولی شد [۱۹].



شکل ۵ - مدل ساده خزش حرارتی [۲۰]

۲-۲-۲- شروط مرزی دمایی

بعدها پواسون بوسیله فرض تشابه بدلیل حضور لغزش سرعت، رابطه ۷ را برای پرش دمایی در جداره پیشنهاد داد [۴]. پرش دمایی به اینصورت تعریف می‌گردد که برخلاف جریان‌های پیوسته، دمای سیال در مجاورت دیواره برابر دمای جداره نبوده که این اختلاف را اصطلاحاً پرش دمایی نامند.

$$T - T_{wall} = \zeta \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w \quad (7)$$

در رابطه ۷، ζ فاصله پرش دمایی می‌باشد. بعدها کنارد با استفاده از تعادل انرژی روی دیواره، به توسعه رابطه ۷ پرداخت [۱۲].

$$T - T_{wall} = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{k}{\mu c_v} \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w \quad (8)$$

در رابطه (۸)، γ ضریب اهمیسته، k ضریب هدایت حرارتی، μ ویسکوزیته دینامیکی، c_v ظرفیت گرمای ویژه در حجم ثابت و σ_T ضریب تطابق انرژی می‌باشند. همچون شرایط مرزی سرعت در مواردی که با لغزش روبرو هستیم می‌توان ضریب تطابق انرژی را اینطور در نظر گرفت که بخشی از مولکول‌ها که با σ_T نشان داده می‌شوند با جداره تماس بلند مدتی دارند و انرژی حرارتی‌شان با دیواره به تعادل می‌رسد. بنابراین این مولکول‌ها زمانیکه دوباره بازتابیده می‌شوند دمایی برابر دمای دیوار خواهند داشت. بخش دیگر $1 - \sigma_T$ در زمان بازتابش انرژی حرارتی خود را بطور ضمنی حفظ می‌نمایند.

در زیر بی بعد شده رابطه ۸ نمایش داده شده است:

$$T^* - T_{wall}^* = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{Kn}{Pr} \frac{\partial T^*}{\partial n^*} \Big|_w \quad (9)$$

۳-۲-۲- شروط مرزی فشار

برای برقراری جریان داخل کانال همیشه نیاز به وجود گرادیان فشار نمی‌باشد. ما نیز در اینجا فشار در دو سر کانال را برابر فشار اتمسفر فرض کرده و با ایجاد اختلاف دمایی جریان را برقرار می‌سازیم. این امر باعث حذف ملزوماتی همچون پمپ از دستگاه میکروفلوئیدیک ما شده و به ساده و ارزان‌تر شدن آن می‌انجامد. در بخش بعد به توضیح پدیده خزش حرارتی خواهیم پرداخت که چگونه کمک می‌نماید تا اختلاف دما در دو سر کانال، جریان گاز را برقرار سازد.

۳- پدیده خزش حرارتی

در گازهای رقیق می‌توان با استفاده از ایجاد اختلاف دمایی در دو سر کانال سیال را وادار به خزش در راستای کانال از دمای پایین به سمت دمای بالاتر نمود که به این پدیده اصطلاحاً خزش حرارتی یا پدیده فراتراوش گفته می‌شود. در ادامه با یک مثال به درک بهتر این پدیده خلاف انتظار می‌پردازیم [۱۶].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در زمینه دستگاه‌های میکروفلوئیدیک دانش تئوری در مبحث جریان‌های گازی در مقایسه با جریان مایعات دارای پیشرفت‌های بیشتری می‌باشد. با در نظر گرفتن گاز به عنوان سیال در جریان مشکلات پیش‌رو راحت‌تر شناسایی می‌شوند. در نتیجه کوچک‌تر شدن ابعاد دستگاه‌های گوناگون دقت را می‌توان مهمترین عامل موثر در نظر گرفت. در این حالت ما قادریم که از مقایسه قدرتمند اما نه کاملاً مشابه مابین جریان با ابعاد میکرونی و جریان‌هایی با فشار پایین که بطور گسترده‌ای در بیش از ۵۰ سال مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند -خصوصاً در کاربردهای هوافضا- استفاده نماییم. زمانی که ذرات با مقیاس نانو در سیال گازی وجود دارند مجبور خواهیم بود برای بررسی دقیق‌تر، ابعاد کانال را به سمت میکرون سوق دهیم. اما باید به خاطر داشت که در ابعاد میکرون معادلات شناخته شده در مقیاس ماکرو ممکن است دیگر قابل کاربرد نباشند. به همین منظور در ابتدا به معرفی پارامترهای بین مولکولی موثر پرداخته شد و با استفاده از آن‌ها عدد نادسن معرفی گردید. این عدد اعتبار معادله پیوستگی را مشخص می‌نماید و در تشخیص نوع رژیم جریان بسیار سودمند بوده و جریان را به چهار رژیم پیوسته، لغزشی، انتقالی و مولکولی تقسیم‌بندی می‌نماید. در هر یک از این رژیم‌ها معادلات خاصی بر جریان حاکم می‌باشد. در میکروکانال‌ها بسته به ارتفاع کانال معمولاً جریان در رژیم لغزشی قرار داشته و باعث می‌شود که در نزدیکی جداره‌های کانال، لایه مرزی به نام لایه مرزی نادسن تشکیل گردد. در این ناحیه معادلات ناویر-استوکس دیگر معتبر نمی‌باشند و نیاز است تا شرایط مرزی جدیدی برای محاسبه ممنتوم و انرژی معرفی گردند که در بخش ۲-۲ به معرفی این شرایط مرزی پرداخته شد. همچنین فشار در مرزهای ورودی و خروجی کانال فشار اتمسفر محلی بوده و اختلاف فشار نقشی در برقراری جریان نداشته و گرادین دمای که به دو سر کانال اعمال می‌شود با تشکیل پدیده خزش حرارتی باعث ایجاد جریان در کانال می‌شود. این پدیده یکی از عوامل موثر در بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌باشد. بهینه‌سازی انرژی در جوامع علمی و صنعتی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و سنسورهای گازی نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشند و پدیده خزش حرارتی به ساده‌سازی سیستم و کاهش انرژی مصرفی این دستگاه‌ها کمک می‌نماید. البته وقوع این پدیده مستلزم عوامل گوناگونی می‌باشد که می‌توان با شبیه‌سازی عددی به بهینه‌ترین بازه دمایی که بتواند جریان پیوسته و پایسته‌ای را ایجاد نماید دست یافت.

۵- مراجع

- [1] Nieto, C., H. Power, and M. Giraldo, *Boundary element solution of thermal creep flow in microfluidic devices*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2012. 36(7): p. 1062-1073.
- [2] Zade, A.Q., M. Renksizbulut, and J. Friedman, *Heat transfer characteristics of developing gaseous slip-flow in rectangular microchannels with variable physical properties*. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011. 32(1): p. 117-127.
- [3] Martini, V., et al., *Microfluidic gas sensor with integrated pumping system*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2012. 170: p. 45-50.
- [4] Kandlikar, S., et al., *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. 2005: Elsevier.
- [5] Amiri-Jaghargh, A., H. Niazmand, and M. Renksizbulut, *Effects of Thermal Creep on Cooling of Microflows in Short Microchannels with Constant Wall Temperature*. International Journal of Modern Physics C, 2012. 23(11): p. 1250072.
- [6] Dongari, N., Y. Zhang, and J.M. Reese, *Modeling of Knudsen layer effects in micro/nanoscale gas flows*. Journal of Fluids Engineering, 2011. 133(7): p. 071101.
- [7] Bushehri, M.R.S., H. Ramin, and M.R. Salimpour, *A new coupling method for slip-flow and conjugate heat transfer in a parallel plate micro heat sink*. International Journal of Thermal Sciences, 2015. 89: p. 1.۱۸۴-۷۴.
- [8] Kakaç, S., et al., *Microscale Heat Transfer-Fundamentals and Applications: Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Microscale Heat Transfer-Fundamentals and Applications in Biological and Microelectromechanical Systems, Cesme-Izmir, Turkey, 18-30 July, 2004*. Vol. 193. 2006: Springer Science & Business Media.
- [9] Anderson, J.D. and J. Wendt, *Computational fluid dynamics*. Vol. 206. 1995: Springer.
- [10] Kundt, A. and E. Warburg, IX. *On friction and heat-conduction in rarefied gases*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1875. 50(328): p. 53-62.
- [11] Maxwell, J.C., *On stresses in rarified gases arising from inequalities of temperature*. Philosophical Transactions of the royal society of London, 187: 9p. 231-256.
- [12] Kennard, E.H., *Kinetic theory of gases, with an introduction to statistical mechanics*. 1938.
- [13] Schaaf, S.A., *Mechanics of rarefied gases*. Encyclopedia of Physics, Fluid Dynamics II, 1963.
- [14] Agrawal, A. and S. Prabhu, *Survey on measurement of tangential momentum accommodation coefficient*. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2008. 26(4): p. 634-645.
- [15] Zhang, W.-M., G. Meng, and X. Wei, *A review on slip models for gas microflows*. Microfluidics and nanofluidics, 2012. 13(6): p. 882-845.



- [16] Karniadakis, G., A. Beskok, and N. Aluru, *Microflows and nanoflows: fundamentals and simulation*. Vol. 29. 2006: Springer Science & Business Media.
- [17] Vincenti, W.G. and C.H. Kruger, *Introduction to physical gas dynamics*. Introduction to physical gas dynamics, by Vincenti, Walter Guido; Kruger, Charles H. New York, Wiley [1965], 1965. 1.
- [18] Cercignani, C., R. Illner, and M. Pulvirenti, *The mathematical theory of dilute gases*. Vol. 106. 2013: Springer Science & Business Media.
- [19] Knudsen, M., *Eine revision der gleichgewichtsbedingung der gase. Thermische molekularströmung*. Annalen der Physik, 1909. 336(1): p. 205-229.
- [20] Martini-Laithier, V., et al., *Ammonia detection by a novel Pyrex microsystem based on thermal creep phenomenon*. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014. 192: p. 714-719.