مجله مهندسی مکانیک مدرس، تیر 1396، دوره 17، شماره 4، ص‌ص 154-160

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی تأثیر قطر و ضخامت دیواره میکرو کانال بر دما و سرعت گاز ورودی تحت تأثیر خزش حرارتی

بهروز بهروزی[1]، مجید قاسمی[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق‌پستی 1999-19395، ghasemi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 بهمن 1395

پذیرش: 15 اسفند 1395

ارائه در سایت: 19 فروردین 1396

کلید واژگان:

میکروکانال

خزش حرارتی

شبیه‌سازی دمایی

شرایط لغزش

چکیده

با توسعه ابعاد ریز در سیستم‌های مکانیکی، علاقه بشر به تأثیر این مقیاس کوچک‌تر کردن ابعاد این نوع کانال‌ها سبب به‌وجود آمدن میکروسنسورها شده است. میکروسنسورهای اکسید فلز برای تشخیص گازهایی مانند O_3، SO_2، CO_2، NO، NH_3، CH_4 و غیره به‌کار می‌روند. این میکروسنسورها دارای اندازه کوچک‌تر، ارزان‌تر و توان کمتر است. هدف از این مقاله بررسی عددی تأثیر قطر و ضخامت دیواره بر دما و سرعت گاز ورودی تحت تأثیر خزش حرارتی است. معادلات دیفرانسیلی غیرخطی حاکم بر مسئله بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌هاست که توسط کد تجاری حل شده‌اند. کانال به صورت دوبعدی فرض شده و از آن‌جایی‌که عدد نادسن بین 0.01 و 0.1 است، از شرایط مرزی لغزش و معادلات ماکسول استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت دیواره دمای گاز ورودی افزایش و سرعت گاز کاهش می‌یابد، همچنین با افزایش قطر کانال دمای گاز ورودی کاهش و سرعت گاز افزایش می‌یابد.

Effect of Micro-Channel Wall Thickness and Diameter on Inlet Gas Temperature and Velocity under the Influence of Thermal Creeping

Behrooz Behroozi[1], Majid Ghassemi[1*]

1- Faculty of Mechanical Engineering, Khaje Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
* P.O.B. 19395-1999 Tehran, Iran, ghasemi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 24 January 2017
Accepted 05 March 2017
Available Online 08 April 2017

Keywords:
micro- channel
thermal creep
thermal simulation
slip condition

ABSTRACT

With the development of micro-mechanical systems, researchers have become interested in concentrating on the small-scale impact on the flow and heat transfer in micro-channels. A micro-channel is required for a gas sensor to guide the gas flow. Reducing the size of channel has led scientists to concentrate on micro-sensor. Metal oxide gas micro- sensors are used to detect gases such as O_3, SO_2, CO_2, NO, NH_3, CH_4, etc. Metal oxide gas micro-sensors are small in size, cheaper to fabricate and consume little power. The purpose of the current study is to numerically investigate the micro-channel wall thickness and diameter on gas inlet temperature under the influence of thermal creeping. The governing nonlinear differential equations, mass, momentum, energy, and species, are coupled and solved by a commercial code. The channel is assumed to be two dimensional. Since the Knudsen number is between 0.01 and 0.1, the slip boundary condition, Maxwell equation, is utilized. The result shows that as wall thickness increases the gas inlet temperature increases and temperature difference between gas inlet and outlet decreases. On the other hand, as channel diameter decreases the gas inlet temperature increases.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر مطالعات بر میکروسنسورهای اکسید فلز برای تشخیص گازهایی از قبیل O_3، SO_2، CO_2، NO، Cl_2، NH_3 و ترکیبات آلی فرار و سایر گازهای قابل اشتعال در حال توسعه است. این سنسورها دارای هزینه کمتر، اندازه کوچک‌تر و مصرف توان کمتری نسبت به سنسورهای دیگر است [1].

تجزیه و تحلیل آلاینده‌ها در یک فضای واقعی اتفاق می‌افتد که اغلب ثابت نگه داشتن پارامترهایی مانند دما، حجم و سرعت جریان دشوار است. این پارامترها باید برای به‌دست‌آوردن تجزیه تحلیل در شرایط محیطی مختلف کنترل شود [2]. دستگاه‌های کوچک از سیستم‌های متعارف تجزیه تحلیل جریان بسیار کوچک‌تر است و انتظار می‌رود که برای کنترل پارامترهای گاز مفیدتر باشند [3].

آشکارسازهای گاز قابل اشتعال به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌های نفت، معادن و فلزات، نیروگاه‌های شیمیایی، نیروگاه‌های ذوب و دیگر سایت‌های صنعتی و همچنین خانه‌ها، هتل‌ها و محل‌های داخلی دیگر که برای حفاظت از زندگی بشر و ایمنی تولید نقش مهمی دارند استفاده می‌شوند.

بِنداهان و همکاران [4] در سال 2007 به بررسی سنسورهای مبتنی‌بر WO_3 برای تشخیص اوزون پرداختند. در مسأله آن‌ها لایه نازک WO_3 بر بستر $Si\text{-}SiO_2$ و همراه با میکروالکترود پلاتین پراکنده شده است. در این مسأله

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

B. Behroozi, M. Ghassemi, Effect of Micro-Channel Wall Thickness and Diameter on Inlet Gas Temperature and Velocity under the Influence of Thermal Creeping, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 154-160, 2017 (in Persian)

آن‌ها به بررسی دمای کاری سنسور به صورت تحلیلی و تجربی پرداختند. ایشان در این مقاله نشان دادند که پاسخ سنسور به ازن و بهره‌وری جذب به دمای کاری بستگی دارد، همچنین از دمای 423-523 کلوین دقت و حساسیت سنسور افزایش می‌یابد و دمای 523 کلوین بیشترین حساسیت و کمترین پاسخ زمانی برای سنسور است که با افزایش دما از 523-673 کلوین دقت و حساسیت سنسور کاهش می‌یابد.

مِئولَنز و همکاران [5] در سال 2008 به بررسی فرآیند خزش حرارتی در یک میکروکانال مستطیل با عرض زیاد پرداختند. ایشان فشار در ورودی و خروجی را ثابت و یک گرادیان دما ثابت بین ورودی و خروجی در نظر گرفتند. عدد نادسن در مسأله کمتر از 0.25 و شرایط مرزی لغزش فرض شده است.

ایمان زحمتکش و همکاران [6] در سال 2011 به بررسی مخلوط گاز هلیوم و نئون در میکروکانال با شرایط لغزش سرعت و پرش دمایی پرداختند. آن‌ها برای میکروکانال پروفیل دما و سرعت را بررسی کردند.

مارتینی و همکاران [1] در سال 2012 یک میکروسیستم تشخیص گاز با یک تلمبه‌زنی یکپارچه گاز با خزش حرارتی را بررسی کردند. آن‌ها برای شبیه‌سازی حرارت میکرودستگاه خود از نرم‌افزار کامسول[1] استفاده کردند و چند تست مختلف را برای ارزیابی عملکرد میکروسیستم انجام دادند. آن‌ها ابعاد میکروسیستم خود را برای ایجاد شرایط خزش حرارتی تعیین کردند. نخستین تست‌های میکروسیستم تحت آمونیاک با غلظت بین 10-100 PPM در دمای 473 کلوین انجام شده است. تست‌های تشخیص گاز نشان می‌دهد که با انجام این تست‌ها جریان پایدارتر و مصرف الکتریکی کمتر حاصل می‌شود، همچنین با افزایش دما از 423 به 523 کلوین زمان پاسخ کاهش می‌یابد. پایدار شدن پاسخ به‌شدت به بالا بودن دما وابسته است و پاسخ سنسور با افزایش دما کاهش می‌یابد.

زیولیانگ لیو و همکاران [7] در سال 2013 با استفاده از روش لتیس-بولتزمن به بررسی جریان درون میکرو کانال با طول زیاد با گرادیان فشار و عدد نادسن متفاوت پرداختند. آن‌ها نتایج عددی خود که شامل پروفیل سرعت، توزیع فشار و شار جرمی را با داده‌های روش‌های دیگر مقایسه کردند. محمدرضا شتاب‌بوشهری و همکاران [8] در سال 2015 به بررسی اثر شرط مرزی پرش دمایی بر انتقال حرارت در صفحه موازی و چاه حرارتی میکروکانال پرداختند. آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار[2]منبع باز به حل معادلات کوپل‌شده پرداختند. هر دو شرط مرزی دمای دیواره ثابت و شار ثابت در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که پرش دمایی دیواره تأثیر قابل توجهی بر پروفیل انتقال حرارت و چاه حرارتی دارد.

دوریودهَن و همکاران [9] در سال 2015 به بررسی عددی و تجربی سه بعدی بر مایع تک‌فاز برای میکروکانال همگرا و واگرا برای خنک‌کننده الکترونیک پرداختند. هدف آن‌ها از این مطالعه به‌دست‌آوردن عدد ناسلت است. آن‌ها دمای سطح و توده مایع را برای به‌دست‌آوردن ضریب انتقال حرارت اندازه‌گیری کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که در شرایط یکسان انتقال حرارت در کانال همگرا 35% بیشتر از کانال واگراست. کار پمپ برای کانال همگرا و واگرا کمتر از کانال ساده است.

رحمتی‌پور و همکاران [10] به بررسی رفتار سیال ارگون در جریان کوئت پایدار درون نانوکانال‌های صاف و زبر با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و نرم‌افزار لمپس پرداختند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش سرعت دیواره لغزش سرعت سیال افزایش می‌یابد. به‌ازای مقادیر ثابت سرعت دیواره، افزایش ارتفاع کانال سبب کاهش لغزش سرعت سیال می‌شود. برای جریان کوئت پایدار کاهش چگالی دیوار، باعث کاهش لغزش سرعت سیال می‌شود. اعمال زبری‌های مستطیلی و مثلثی به دیوار پایین سبب کاهش لغزش سرعت سیال می‌شود، همچنین لغزش سرعت سیال با افزایش ارتفاع زبری بیشتر کاهش می‌یابد.

مازوچی و همکاران [11] به بررسی عددی هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان گازی درون یک میکروکانال پرداختند. در کار ایشان سرعت و دمای جریان ورودی به کانال یکنواخت و شرط مرزی لغزش سرعت و پرش دما روی دیواره کانال در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر عدد ناسلت در میکروکانال‌ها با مقادیر آن در کانال‌های با ابعاد معمول متفاوت است و افزایش رقت انتقال حرارت را در دو جهت مخالف تحت تأثیر قرار می‌دهد.

2- بیان مسئله

مسأله مورد بررسی حل عددی دوبعدی تأثیر قطر و ضخامت دیواره میکروکانال بر دما و سرعت گاز ورودی تحت تأثیر خزش حرارتی به صورت پایاست.

2-1- هندسه مسئله

طرح‌واره میکروکانال همراه با محیط اطراف در شکل 1 نشان داده شده است. در این شکل محیط اطراف یک مربع به ابعاد 3000 میکرون در نظر گرفته شده است. در این مسأله قطر کانال 5، 10، 20، 50 میکرون و ضخامت دیواره میکروکانال 10، 20، 40، 100 انتخاب می‌شود. در مجموع برای 16 حالت پروفیل سرعت و انتقال حرارت مقایسه شده است. در این مسأله جنس دیواره بالایی سیلیکون و دیواره پایینی پیرکس در نظر گرفته شده است.

2-2- فرضیات مسئله، معادلات حاکم و شرایط مرزی

برای حل معادلات مربوط به جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند.

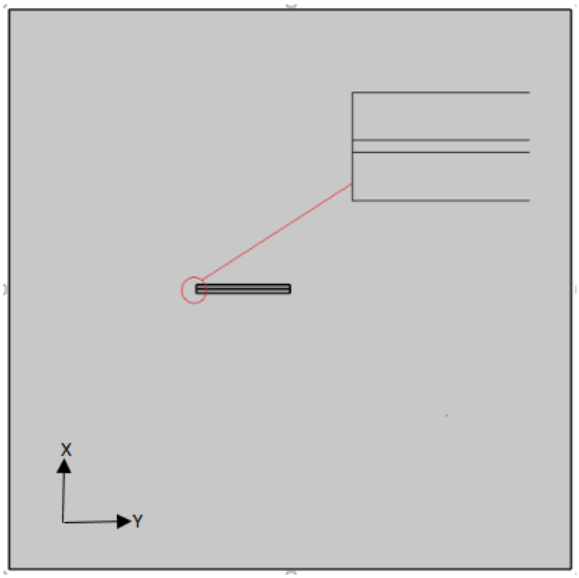

Fig. 1 micro-channel schematic with surrounding

شکل 1 شماتیک میکروکانال با محیط اطراف

[1] COMSOL
[2] Open foam

- جریان سیال و انتقال حرارت دوبعدی و پایاست.
- جریان سیال آرام و تراکم‌پذیر است.
- خواص ترموفیزیکی سیال وابسته به دماست.
- از زبری روی دیواره صرف‌نظر شده است.
- روی دیواره نفوذ جریان وجود ندارد.

براساس این فرضیات معادلات حاکم برای جریان گاز درون میکروکانال عبارتند از [5]:

معادله بقای جرم به صورت رابطه (1) است.

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

معادله بقای مومنتوم به صورت روابط (3,2) است.

$$\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{\partial \rho uv}{\partial y}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\frac{4}{3}\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial v}{\partial x} \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho v^2}{\partial y}+\frac{\partial \rho uv}{\partial x}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\frac{4}{3}\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\mu\frac{\partial u}{\partial y} \tag{3}$$

معادله بقای انرژی به صورت رابطه (4) است.

$$\frac{\partial}{\partial x}u(E+P)+\frac{\partial}{\partial y}v(E+P)=\frac{4}{3}\frac{\partial}{\partial x}\mu u\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial}{\partial x}\mu v\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}\mu u\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\mu v\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}k\frac{\partial T}{\partial x}\frac{\partial}{\partial y}\mu u\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{4}{3}\frac{\partial}{\partial y}\mu v\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial y}\mu u\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}\mu v\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y}k\frac{\partial T}{\partial y} \tag{4}$$

برای حل معادلات حالت چندجزئی از معادلات برای بقای گونه‌ها به صورت رابطه (5) استفاده شده است [12].

$$\nabla\cdot j_i+\rho(u\cdot\nabla)\omega_i=R_i \tag{5}$$

در آن j_i بردار شار جرمی نسبی، ω_i کسر جرمی و R_i عبارت چشمه یا چاه مربوط به تولید یا مصرف جزء i-ام است.

برای به‌دست‌آوردن توزیع دما در جسم جامد در دیواره میکروکانال از رابطه (6) استفاده می‌شود.

$$q=-k\nabla T \tag{6}$$

برای شرط مرزی سرعت از معادلات ماکسول مرتبه اول استفاده شده که به صورت رابطه (7) است[13].

$$u_s^*-u_{\mathrm{wall}}^*=\frac{2-\sigma}{\sigma}\mathrm{Kn}\frac{\partial u_s^*}{\partial n^*}\Big|_{\mathrm{w}}+\frac{3}{4\gamma k_2{}^2}\frac{\mathrm{Kn}^2\mathrm{Re}}{\mathrm{Ma}^2}\frac{\partial T^*}{\partial s^*}\Big|_{\mathrm{w}} \tag{7}$$

برای شرط مرزی دما نیز از معادلات ماکسول مرتبه اول استفاده شده که به صورت رابطه (8) است [13].

$$T^*-T_{\mathrm{wall}}^*=\frac{2-\sigma_T}{\sigma_T}\frac{2\gamma}{\gamma+1}\frac{\mathrm{Kn}}{\mathrm{Pr}}\frac{\partial T^*}{\partial n^*}\Big|_{\mathrm{w}} \tag{8}$$

بر دیواره خارجی میکروکانال شرط مرزی عدم لغزش و بر مرز محیط اطراف شرط مرزی باز[1] در نظر گرفته شده است.

فشار در ورود و خروج میکروکانال، فشار محیط است. در ورودی جریان گاز CO_2 با غلظت 0.05 جرم مولی وجود دارد. دمای خروجی 623 کلوین است.

2-3- روش حل

حل مسأله با استفاده از روش المان محدود و شبکه محاسباتی سازمان‌یافته در نرم‌افزار چند فیزیکی کامسول 5.2 انجام شده است. معادلات حاکم غیرخطی شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت خطی، گونه‌های شیمیایی و انرژی کاملا کوپل‌شده با یکدیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. نوع شبکه‌بندی به صورت مثلثی انتخاب می‌شود به طوری که توزیع شبکه محاسباتی به گونه‌ایی است که درون کانال و نزدیک دیواره که بیشترین حجم محاسبات در آن وجود دارد تعداد المان‌های بیشتری در این نواحی وجود داشته باشد. شکل 2 نحوه تولید شبکه محاسباتی در میکروکانال و محیط اطراف را نشان می‌دهد. تعداد کل شبکه محاسباتی برابر 341000 است. میزان خطای نسبی برای تمامی مراحل حل برابر 10^{-6} در نظر گرفته می‌شود.

3-نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی برای بررسی اثرات قطر و ضخامت میکروکانال بر سرعت و انتقال حرارت ارائه شده است. در ابتدا اعتبارسنجی و استقلال از شبکه مسأله حل شده بررسی گشته و سپس نمودارهای سرعت و انتقال حرارت بیان شده است.

1-3- اعتبارسنجی

برای بیان دقت و صحت روش حل از مقاله زحمتکش [6] استفاده شده است. در این مقاله شبیه‌سازی جریان دو جزئی گازهای هلیوم و نئون در یک میکروکانال با شرایط مرزی سرعت لغزشی و پرش دمایی بررسی شده است. دینامیک سیالات برای سیستم دو جزئی توسط معادلات ناویر استوکس، انرژی و انتقال جرم بیان شده است. در این مسأله یک میکروکانال به طول 4 میکرومتر و ارتفاع 1 میکرومتر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی این مسأله عبارتند از:

شرایط ورودی: فشار 300 کیلو پاسکال و دما 300 کلوین

شرایط خروجی: فشار 100 کیلو پاسکال

همچنین دما بر دیواره میکروکانال 350 کلوین و عدد نادسن کمتر از0.1 است. صحت‌سنجی پروفیل دما و سرعت در مقطع X/L=0.1 در شکل 3 و 4 آورده شده است.

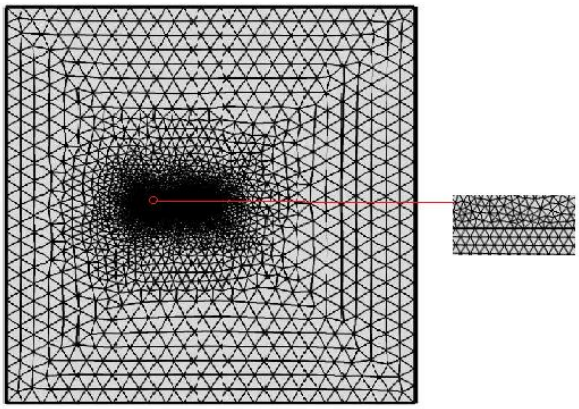

Fig. 2 Mesh distribution a- whole computational domain b- near the wall

شکل 2 توزیع شبکه محاسباتی در کل ناحیه محاسباتی و نزدیک دیواره

[1] Open boundary

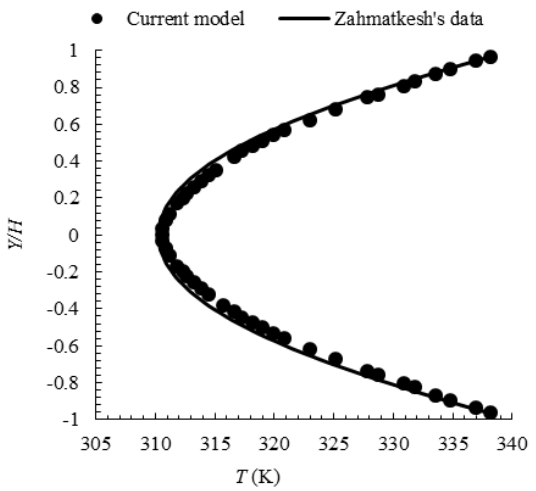

Fig. 3 Simulated Temperature profiles at X/L=0.1

شکل 3 پروفیل دما در مقطع X/L=0.1

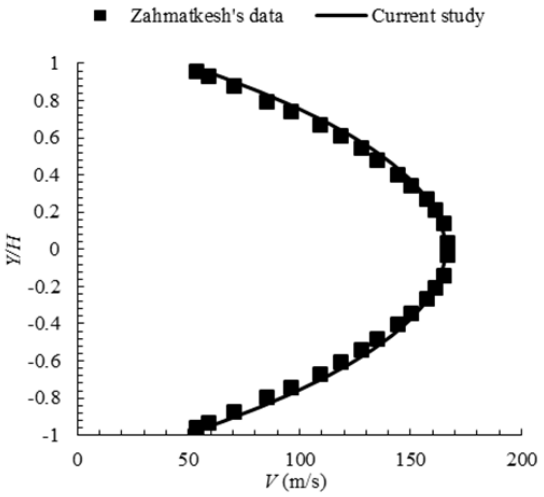

Fig. 4 Simulated velocity profiles *at* X/L=0.1

شکل 4 پروفیل سرعت در مقطع X/L=0.1

3-2- استقلال نتایج از شبکه

سلول‌های محاسباتی با حداقل 0.85 و 0.2 میکرومتر به ترتیب 59000-485000 برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی ایجاد شد. نتایج دما بر خط افقی در وسط میکروکانال در شکل 5 ملاحظه می‌شود. براساس شکل 5 تمامی پاسخ‌ها تقریباً بر یکدیگر منطبق هستند به گونه‌ای که تمایز بین آن‌ها مشخص نیست. جهت بررسی دقیق‌تر اثر اندازه و تعداد سلول‌های محاسباتی بخشی از شکل 5 بزرگ‌نمایی و در شکل 6 ترسیم شده است. پس از ملاحظه نمودار بزرگ‌نمایی شده می‌توان دریافت که فاصله بین منحنی‌های با تعداد سلول 341000 -485000 کمتر از فاصله بین سایر منحنی‌هاست. در این پژوهش مبنای حل عددی بر پایه استفاده از سلول‌های محاسباتی با تعداد 341000 گذاشته شده است.

3-3- بررسی پروفیل سرعت و دما برای مسأله تعریف‌شده

در این بخش ابتدا به بررسی سرعت و انتقال حرارت برای میکروکانال با قطر 10 میکرومتر و ضخامت جداره 40 میکرومتر پرداخته می‌شود. شکل‌های 7 و 8 پروفیل دما و سرعت جریان را در طول میکروکانال برای قطر 10 میکرومتر و ضخامت 40 میکرومتر نشان می‌دهند. دما در ورودی میکروکانال به میزان

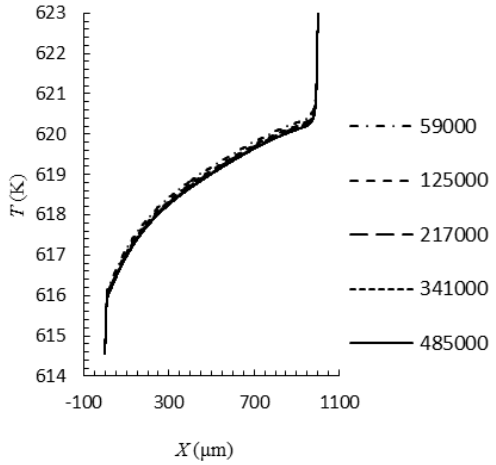

Fig. 5 Mesh study results for different cells number

شکل 5 نتایج بررسی شبکه برای سلول‌های با تعداد مختلف

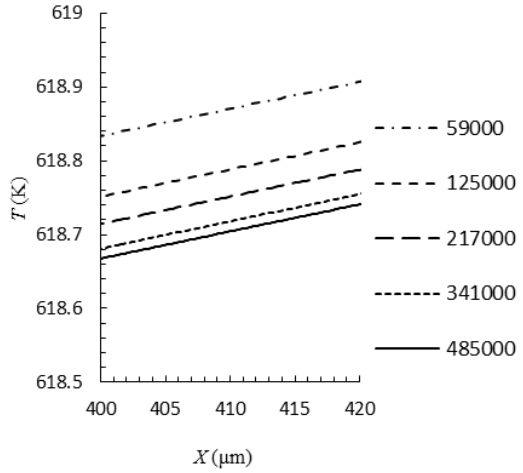

Fig. 6 Zoom of mesh study results for different cells number

شکل 6 بزرگ‌نمایی بررسی شبکه برای سلول‌های با تعداد مختلف

1.5 کلوین و در خروجی میکروکانال 2.5 کلوین تحت تأثیر ورود و خروج جریان قرار می‌گیرد. سرعت جریان در طول میکروکانال افزایش می‌یابد به‌طوری که در خروجی کانال بیشترین سرعت وجود دارد.

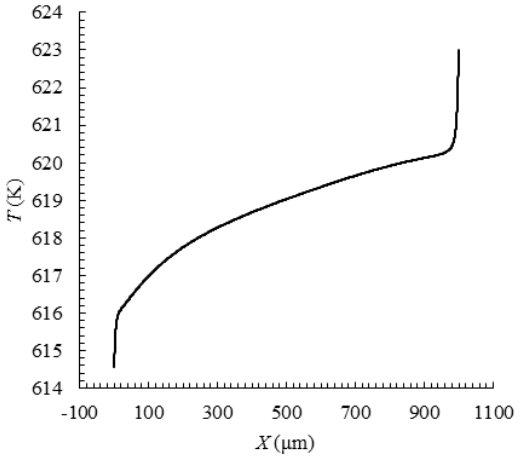

Fig. 7 Temperature distribution along the microchannel for D=10 μm and A=40 μm

شکل 7 توزیع دما در طول میکروکانال برای قطر 10 میکرومتر و ضخامت 40 میکرومتر

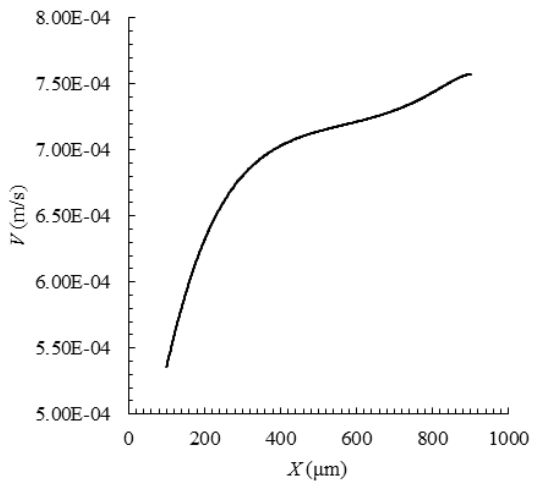

Fig. 8 Velocity distribution along the micro-channel for D=10 μm and A=40 μm

شکل 8 پروفیل سرعت در طول میکروکانال برای قطر 10 و ضخامت 40 میکرومتر

شکل 9 کانتور دما در میکروکانال و محیط اطراف نشان می‌دهد. دمای بیشینه در خروجی میکروکانال 623 کلوین و دمای کمینه در محیط اطراف و در سمت ورودی میکروکانال 293 کلوین است. در فاصله 3 میلی‌متری در سمت خروجی میکروکانال دما به 450 کلوین می‌رسد.

مطابق شکل 10 سرعت لغزشی روی دیواره در وسط میکروکانال در پیرکس 0.27 mm/s و در سیلیکون 0.23 mm/s است و مطابق شکل 11 دما روی دیواره پیرکس 618 کلوین و روی دیواره سیلیکون 620 کلوین و همچنین میزان پرش دمایی بر دیواره سیلیکون و پیرکس نشان داده شده است.

در نهایت به مقایسه قطر و ضخامت میکروکانال پرداخته شده است. در شکل 12 مقادیر مختلف دما در ورودی میکروکانال نشان داده شده است. با افزایش دما (در محدوده 573- 673 کلوین) زمان پاسخ میکروسنسور کاهش می‌یابد [4]. مطابق داده‌های به‌دست‌آمده نتایج زیر حاصل می‌شود.

- دمای ورودی با افزایش قطر میکروکانال کاهش می‌یابد.
- دمای ورودی با افزایش ضخامت میکروکانال افزایش می‌یابد.
- شیب کاهش دما به ازای افزایش قطر میکروکانال با افزایش ضخامت میکروکانال کاهش می‌یابد.

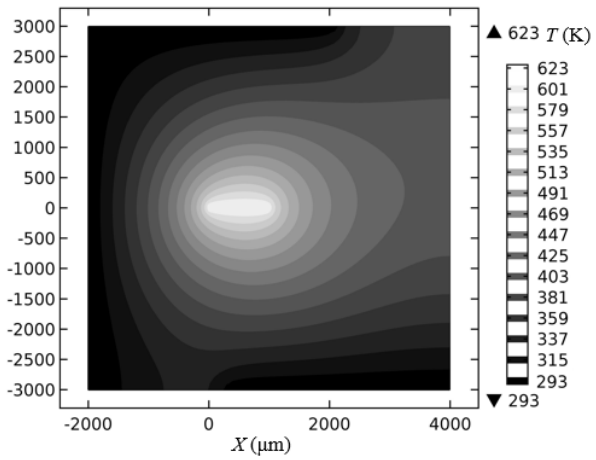

Fig. 9 Temperature distribution (K) for micro-channel and surrounding

شکل 9 توزیع دما برای میکروکانال و محیط اطراف

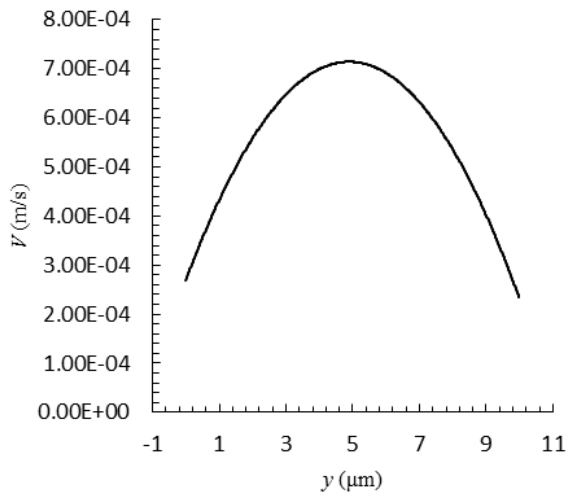

Fig. 10 Velocity distribution at micro-channel height and in the middle of the micro-channel

شکل 10 توزیع سرعت در ارتفاع میکروکانال و در وسط میکروکانال

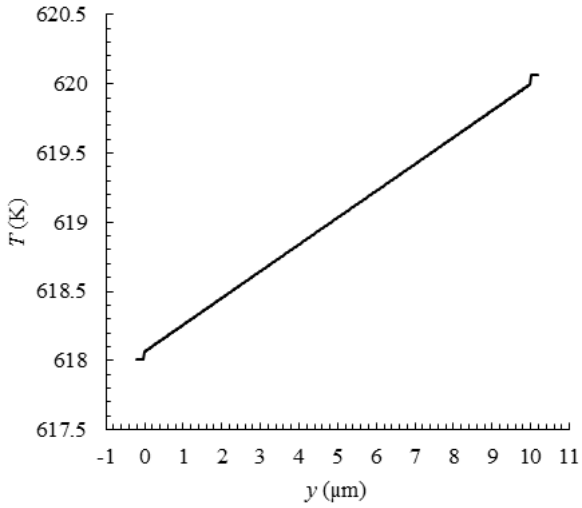

Fig. 11 Temperature distribution at micro-channel height and in the middle of the micro-channel

شکل 11 پروفیل دما در ارتفاع میکروکانال و در وسط میکروکانال

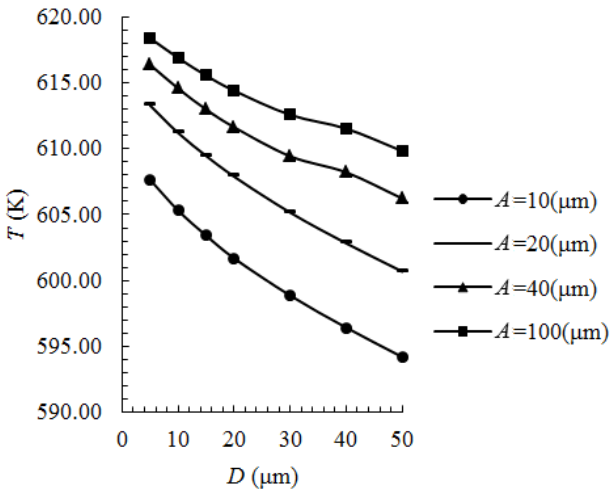

Fig. 12 Temperature profiles for different diameter and thickness

شکل 12 پروفیل دما برای قطر و ضخامت متفاوت

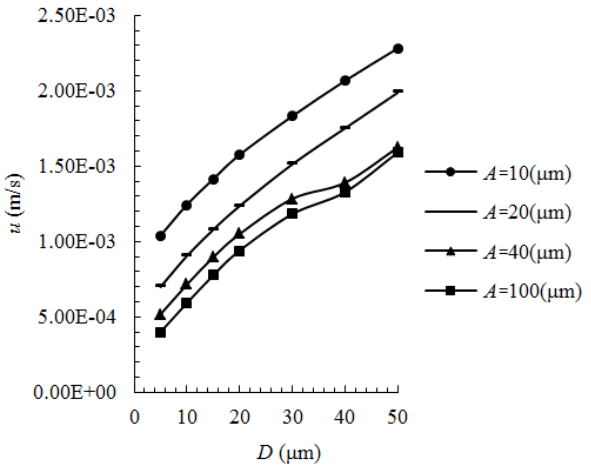

Fig. 13 Velocity profiles for different diameter and thickness

شکل 13 پروفیل سرعت برای قطر و ضخامت متفاوت

- شیب کاهش دما به ازای افزایش ضخامت میکروکانال با افزایش قطر میکروکانال افزایش می‌یابد.

در شکل 13 مقادیر مختلف سرعت بیشینه در وسط میکروکانال نشان داده شده است. مطابق داده‌های به‌دست‌آمده نتایج زیر حاصل می‌شود.

- سرعت با افزایش قطر میکروکانال افزایش می‌یابد.
- سرعت با افزایش ضخامت میکروکانال کاهش می‌یابد.
- شیب افزایش سرعت به ازای افزایش قطر میکروکانال با افزایش ضخامت میکروکانال کاهش می‌یابد.
- شیب افزایش سرعت به ازای افزایش ضخامت میکروکانال با افزایش قطر میکروکانال افزایش می‌یابد.

4- جمع‌بندی

براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که در فاصله 3 میلی‌متری در سمت خروجی میکروکانال دما به 450 کلوین می‌رسد، بنابراین باید مسائل مربوط به ایمنی را در نظر گرفت. با افزایش قطر میکروکانال و کاهش ضخامت میکروکانال دمای ورودی میکروکانال کاهش و پاسخ زمانی میکروسنسور افزایش می‌یابد.

5- فهرست علایم

A	ضخامت میکروکانال (μm)
E	انرژی کل بر واحد حجم (Jm^{-3})
H	ارتفاع میکروکانال (μm)
j_i	شار جرمی نسبی ($kgm^{-2}s^{-1}$)
k	ضریب رسانش حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
Kn	عدد نادسن ($Kn = \lambda/d$)
k_2	ضریب بی‌بعد فاصله آزاد متوسط
L	طول میکروکانال (μm)
Ma	عدد ماخ ($Ma = u/a$)
P	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل ($Pr = \mu(c_p/k)$)
Re	عدد رینولدز ($Re = \rho ud/\mu$)
R_i	نرخ چشمه یا چاه جرمی ($kgm^{-3}s^{-1}$)
t	زمان (s)
T	دمای مطلق (K)
u	سرعت در جهت x (ms^{-1})
v	سرعت در جهت y (ms^{-1})
V	اندازه سرعت (ms^{-1})

علایم یونانی

γ	ضریب اتمیسیته ($\gamma = c_p/c_v$)
λ	فاصله آزاد متوسط (m)
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ضریب اقامت
σ_T	ضریب همراهی انرژی
ϕ	اتلاف انرژی (J)
ω_i	کسر جرمی جزء i ام

زیرنویس‌ها

n	جهت عمود بر فاصله در طول کانال
i	شمارنده جزء
s	جهت فاصله در طول کانال
w	دیواره
wall	دیواره

6- مراجع

[1] V. Martini, S. Bernardini, M. Bendahan, K. Aguir, P. Perrier, I. Graur, Microfluidic gas sensor with integrated pumping system, *Sensors and Actuators B*, Vol. 170, No.1, pp. 45– 50, 2012.

[2] S.I. Ohira, K. Toda, Micro gas analyzers for environmental and medical applications, *Analytica Chimica Acta*, Vol. 619, No. 2, pp. 143-156, 2008.

[3] P.S. Dittrich, K. Tachikawa, A. Manz, Micro total analysis latest advancements and trends, *Analytical Chemistry*, Vol. 78, No. 12, pp. 3887–3908, 2006.

[4] M. Bendahan, J. Gu´erin, R. Boulmani, K. Aguir, WO3 sensor response according to operating temperature: Experiment and modeling, *Sensors and Actuators B*, Vol. 124, No. 1, pp. 24-29, 2007.

[5] J.G. Méolans, I.A. Graur, Continuum analytical modeling of thermal creep, *Mechanics B*, Vol. 27, No. 6, pp. 785-809, 2008.

[6] I. Zahmatkesh, M. M. Alishahi, H. Emdad, New velocity-slip and temperature-jump boundary conditions for Navier–Stokes computation of gas mixture flows in microgeometries, *Mechanics Research Communications*, Vol. 38, No. 6, pp. 417-424, 2011.

[7] X. Liu, Z. Guo, A lattice Boltzmann study of gas flows in a long microchannel, *Computers and Mathematics with Applications*, , Vol. 65, No. 2, pp. 186-193, 2013.

[8] M. R. Shetab Bushehri, H. Ramin, M.R. Salimpour, A new coupling method for slip-flow and conjugate heat transfer in a parallel plate micro heat sink, *Thermal Sciences*, , Vol. 89, No.1, pp. 174-184, 2015.

[9] V.S. Duryodhan, A. Singh, S.G. Singh, A. Agrawal, Convective heat transfer in diverging and converging microchannels, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, No.1, pp. 424-438, 2015.

[10] H. Rahmatipour, A. R. Azimian, Molecular dynamics simulation of Couette flow behavior in smooth and rough nanochannels, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 7, pp. 119-130, 2015. (in Persian فارسی)

[11] R. Mazooji, A. Raisi, Effect of Viscous dissipation on gaseous flow heat transfer in a horizontal microchannel with rarefaction and axial conduction, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 83-95, 2013. (in Persian فارسی)

[12] M. Kamvar, M. Ghassemi, Performance analysis of coplanar single chamber solid oxide fuel cell with oxygen-methane-nitrogen mixture under steady state conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-38, 2017. (in Persian فارسی).

[13] S. G. Kandlikar, S. Garimella, D. Li, S. Colin, M. R. King, *Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels*, First Edittion, pp. 9-86, Chennai: Elsevier, 2006.