

بررسی عددی دما و سرعت گاز در میکرو حسگر همگرا تحت تأثیر خزش حرارتی

بهروز بهروزی^۱ مجید قاسمی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۸/۲۲)

چکیده

در سال‌های اخیر مطالعات بر روی میکرو حسگرهای اکسید فلز برای تشخیص گازها در حال توسعه می‌باشد. این حسگرها دارای هزینه کمتر، اندازه کوچک‌تر و مصرف توان کمتری نسبت به حسگرهای دیگر می‌باشند. هدف از این مقاله بررسی عددی تأثیر میکروکانال همگرا بر روی دما و سرعت گاز ورودی تحت تأثیر خزش حرارتی می‌باشد. معادلات دیفرانسیلی غیرخطی حاکم بر مسئله بقای جرم، مومنتوم، انرژی و گونه‌ها می‌باشد که توسط کد تجاری حل شده‌اند. از آنجاییکه عدد نادسن بین 0.01 و 0.1 می‌باشد، از شرایط مرزی لغزش و معادلات ماکسول استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد هر چه به منبع حرارتی نزدیک می‌شویم سرعت و دما به بیشینه خود می‌رسد و در خروجی چون تأثیرات جریان معکوس وجود دارد مقدار سرعت و دما کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش ارتفاع ورودی میکروکانال و همگرایی بیشتر آن سرعت درون میکروکانال ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد و دما ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خزش حرارتی، شرایط لغزش، میکروکانال همگرا، میکرو حسگر

Numerical Investigation of Gas Temperature and Velocity at Converging Micro-sensor Under the Influence of Thermal Creeping

B. Behroozi M. Gassemi

Mechanical Engineering Department

K. N. Toosi University of Technology

(Received: 16/June /2019 ; Accepted:13/November/2019)

ABSTRACT

In recent years, research on metal oxide gas micro-sensors has been rapidly developed. These sensors are small in size, low cost in fabrication and consume little power. The purpose of the current study is to numerically investigate converge micro-channel 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. Since the Knudsen number is between 0.01 and 0.1, the slip boundary condition, Maxwell equation, is utilized. The result shows that flow velocity and temperature increases from the micro-channel inlet to the heat source and decreases from the heat source to the micro-channel outlet. Also as the inlet height and convergence increases, at the first flow velocity increases then decreases. This trend for temperature is reverse of the trend for flow velocity.

Keywords: Thermal Creep, Slip Condition, Converge Micro-Channel, Microsensor

۱- دانشجو دکتری (نویسنده پاسخگو): bbehroozi@mail.kntu.ac.ir

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): ghasemi@kntu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

a	ارتفاع ورودی میکروکانال (μm)
E	انرژی کل بر واحد حجم (Jm^{-3})
l	ارتفاع ورودی میکروکانال (μm)
J_i	شار گرمی نسبی ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
k	ضریب رسانش حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
Kn	عدد نادسن ($Kn = \frac{\lambda}{d}$)
k_2	ضریب بی‌بعد فاصله آزاد متوسط
L	طول میکروکانال (μm)
Ma	عدد ماخ ($Ma = \frac{u}{a}$)
P	فشار ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$)
Pr	عدد پرانتل ($Pr = \mu \frac{c_p}{k}$)
Re	عدد رینولدز ($Re = \frac{\rho u d}{\mu}$)
R_i	نرخ چشمه یا چاه گرمی ($\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$)
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})

علائم یونانی

γ	ضریب اتمیسیته ($\gamma = \frac{c_p}{c_v}$)
λ	فاصله آزاد متوسط (m)
μ	لزجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	ضریب اقامت
σ_T	ضریب همراهی انرژی
σ	تانسور تنش ویسکوز (Pa)
ϕ	اتلاف انرژی (J)
ω_i	کسر گرمی 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

۱- مقدمه

میکرو کانال یک حوزه پژوهشی نسبتاً جدیدی است که از دهه ۶۰ شروع و در اوایل دهه ۸۰ به صورت جدی مورد

بررسی قرار گرفته است. در ابتدا دستگاه‌های سیالاتی به صورت عمده تمرکز خود را بر روی جریان داخلی گاز و ابعاد میلی‌متری و کمتر از میلی‌متر معطوف کرده بودند. این دستگاه‌ها برای اقداماتی مشابه (تقویت، عملیات منطقی، اثرات دیود و غیره) به کار می‌رفتند [۱].

تجزیه و تحلیل آلاینده‌ها در یک فضای واقعی اتفاق می‌افتد، که اغلب ثابت نگه‌داشتن پارامترهایی مانند دما، حجم و سرعت جریان دشوار می‌باشد. این پارامترها باید برای به‌دست آوردن تجزیه تحلیل در شرایط محیطی مختلف کنترل شود [۲]. دستگاه‌های کوچک از سامانه‌های متعارف تجزیه تحلیل جریان بسیار کوچک‌تر می‌باشند و انتظار می‌رود که برای کنترل پارامترهای گاز مفیدتر باشند [۳]. با پیشرفت علم، مطالعات بر روی کوچک کردن ابعاد این نوع کانال‌ها باعث به‌وجود آمدن میکرو حسگرها شده است. میکرو حسگرهای اکسید فلز برای تشخیص گازهایی از قبیل O_3 ، SO_2 ، CO_2 ، NO ، NH_3 ، CH_4 و غیره بکار می‌روند. این میکرو حسگرها دارای اندازه کوچک‌تر، ارزان‌تر و توان کمتر می‌باشند [۴].

بنداهان و همکاران [۵] در سال ۲۰۰۷ به بررسی حسگرهای مبتنی بر WO_3 برای تشخیص اوزون پرداختند. در مساله آن‌ها لایه نازک WO_3 بر روی بستر Si-SiO_2 و همراه با میکروالکترو پلاتین پراکنده شده است. در این مساله آن‌ها به بررسی دمای کاری حسگر به صورت تحلیلی و تجربی پرداختند. آن‌ها در این مقاله نشان دادند که پاسخ حسگر به ازن و بهره‌وری جذب به دمای کاری بستگی دارد. آن‌ها نشان دادند از دمای ۴۲۳ کلوین تا ۵۲۳ کلوین دقت و حساسیت حسگر افزایش می‌یابد و دمای ۵۲۳ کلوین بیشترین حساسیت برای حسگر می‌باشد؛ همچنین با افزایش دما از ۵۲۳ کلوین تا ۶۷۳ کلوین دقت و حساسیت حسگر کاهش می‌یابد.

چانگ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۴ به طراحی، ساخت و تست حسگر نیتریک اسید پرداختند. در این کار از ۱۵ حسگر به منظور بهبود سیگنال برای تشخیص غلظت NO استفاده شده است. دمای کاری در این تست ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در حسگر آن‌ها حساسیت‌های پایین‌تر از ppm در حدود ۵۰۰ ppb اندازه‌گیری شده است.

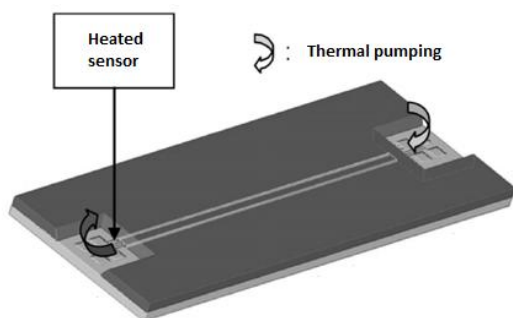
مارتینی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ به توسعه یک میکروسیستم برای تجزیه و تحلیل گاز با استفاده از

و سرعت سیال پرداختند. آن‌ها نشان دادند 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.

۲- مقدمه

در این کار به بررسی عددی جریان سیال و انتقال حرارت درون میکروکانال همگرا تحت خزش حرارتی به صورت پایا پرداخته می‌شود. در این میکرو حسگر جهت تشخیص مقدار گاز دی اکسید کربن موجود در هوا از جریان دوجزئی هوا و دی اکسید کربن استفاده شده است. میکرو حسگرهای استفاده شده تاکنون با کانال ثابت بوده‌اند که در این کار برای بهبود پارامترها و روش‌های ساخت از میکروکانال‌های همرا استفاده شده است. در این مساله عدد ناسن در محدوده ۰/۰۰۱ و ۰/۱ می‌باشد که در این محدوده شرایط لغزشی حاکم می‌باشد.

شکل ۱ شماتیک خزش حرارتی در این میکرو حسگرها را نشان می‌دهد. در این میکرو حسگرها از یک گرماساز استفاده شده است که در خروجی جریان هوا قرار داده شده است تا بتواند دما را در خروجی میکروکانال ثابت نگه دارد. اختلاف دمایی ایجاد شده در ورودی میکروکانال و خروجی آن باعث ایجاد اختلاف چگالی هوا می‌شود که این باعث ایجاد جریان از سمت سردتر (جریان با چگالی بالاتر) به سمت گرم‌تر (جریان با چگالی کمتر) می‌شود. این پدیده خزش حرارتی نامیده می‌شود. مخلوط جریان هوا و آمونیاک در هنگام عبور از روی بستر اکسید تنستن باعث ایجاد واکنش می‌شود که این واکنش منجر به تغییر مقاومت در میکرو حسگر می‌گردد. اختلاف مقاومت ایجاد شده باعث تشخیص میزان آمونیاک در هوا می‌گردد.



شکل (۱): جریان گاز درون میکرو حسگر [۱۲]

اصل پمپاژ یکپارچه پرداختند. این میکروسیستم می‌تواند پارامترهای آمونیاک را شناسایی و جریان گاز درون کانال را کنترل نماید. این میکرو وسیله شامل یک میکروکانال، حسگر گاز یکپارچه و یک گرماساز می‌باشد. از تنگستن تری اکسید به عنوان لایه حساس استفاده شده است. شبیه‌سازی حرارتی برای تخمین گرادین دما درون میکرو کانال انجام شده است.

ویچی و اراده و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۵ به بررسی سه بعدی جریان گازی درون میکرو کانال واگرا به صورت تجربی و عددی پرداختند. افت فشار استاتیک برای نرخ‌های مختلف جریان اندازه‌گیری شده و مشاهده شده که افت فشار با افزایش زاویه واگرایی کاهش می‌یابد. حل عددی معادلات ناویر استوکس و شرایط مرزی لغزش ماکسول نشان‌دهنده عدم وجود جریان برگشتی (با توجه به لغزش دیوار) در میکرو کانال واگرا می‌باشد. سرعت مرکزی و تنش برشی دیواره با افزایش زاویه واگرایی، کاهش می‌یابد.

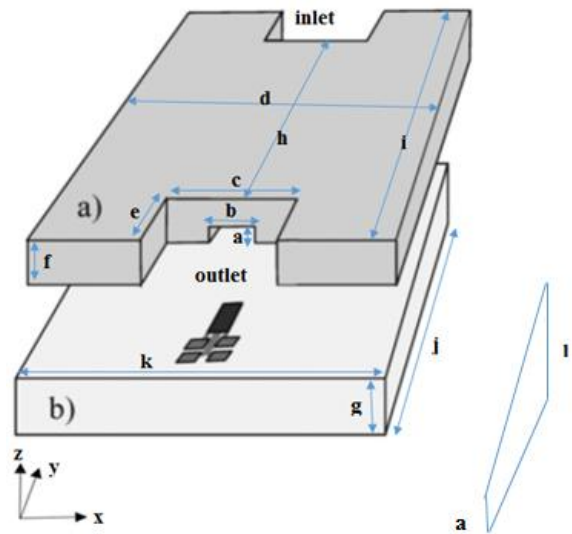
دوریوودهن و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۵ به بررسی عددی و تجربی سه بعدی بر روی مایع تک فاز برای میکروکانال همگرا و واگرا برای خنک‌کننده الکترونیک پرداختند. هدف آن‌ها از این مطالعه به دست آوردن عدد ناسلت می‌باشد. آن‌ها دمای سطح و توده مایع را برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت اندازه‌گیری کردند. بررسی‌های آن‌ها نشان می‌دهد که در شرایط یکسان انتقال حرارت در کانال همگرا ۳۵ درصد بیشتر از کانال واگرا می‌باشد. همچنین کار پمپ برای کانال همگرا و واگرا کمتر از کانال ساده می‌باشد.

مازوچی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۵ به بررسی عددی هیدرودینامیک و انتقال حرارت جریان گازی درون یک میکروکانال پرداختند. در کار آن‌ها 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 آن‌ها نشان می‌دهد که مقادیر عدد ناسلت در میکروکانال‌ها با مقادیر آن در کانال‌های با ابعاد معمول متفاوت است و همچنین افزایش رقت، انتقال حرارت را در دو جهت مخالف تحت تأثیر قرار می‌دهد.

بهروزی و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۷ به بررسی دوبعدی تأثیر قطر و ضخامت دیواره میکروکانال بر روی دما

۲-۱- هندسه مسئله

شماتیک میکروچسگر در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل محیط اطراف یک مربع به ابعاد ۱۰۰۰۰ میکرون در نظر گرفته شده است. در این مساله ارتفاع ورودی میکرو کانال ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میکرون انتخاب می‌شود. در این مساله جنس دیواره بالایی سیلیکون و دیواره پایینی پیرکس در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ پارامترهای هندسی میکروچسگر نشان داده شده است.



شکل (۲): شماتیک میکروچسگر.

جدول (۱): پارامترهای هندسی میکروچسگر.

۰/۵ mm	b	۰/۰۱ mm	a
۱/۸ mm	e	۵/۲ mm	d
۱۰ mm	h	۰/۰۵ mm	g
۵/۲ mm	k	۱۳/۶ mm	j
۲ mm	c	۱۳/۶ mm	i
۰/۰۵ mm	f		

۲-۲- 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.

- جریان سیال و انتقال حرارت سه‌بعدی و پایا می‌باشد.
- جریان سیال آرام و تراکم‌پذیر می‌باشد.
- خواص ترموفیزیکی سیال وابسته به دما می‌باشد.
- از زبری روی دیواره صرف‌نظر شده است.
- روی دیواره نفوذ جریان وجود ندارد.

بر اساس این فرضیات، معادلات حاکم برای جریان گاز درون میکروکانال عبارت‌اند از:

معادله بقای جرم [۱۳]

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} = 0 \quad (۱)$$

معادله بقای مومنتوم [۱۳]

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} = & -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \quad (۲)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho uv}{\partial x} = & -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v}{\partial y} \\ & - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial u}{\partial x} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad (۳)$$

معادله بقای انرژی [۱۳]

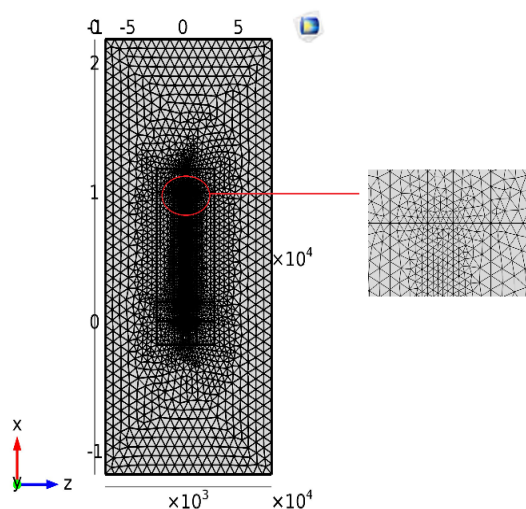
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} u(E + P) + \frac{\partial}{\partial y} v(E + P) \\ = & \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu u \frac{\partial u}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \mu u \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu v \frac{\partial u}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial x} k \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu u \frac{\partial u}{\partial y} \\ & + \frac{4}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu v \frac{\partial v}{\partial y} \\ + \frac{\partial}{\partial y} \mu u \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \mu v \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k \frac{\partial T}{\partial y} \end{aligned} \quad (۴)$$

برای حل معادلات حالت چندجزئی از معادلات برای بقای گونه‌ها استفاده شده است [۱۴].

$$\nabla \cdot j_i + \rho(u \cdot \nabla)\omega_i = R_i \quad (۵)$$

که 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 می‌باشد.

برای به‌دست آوردن توزیع دما در جسم جامد در دیواره میکروکانال از رابطه ۶ استفاده می‌شود [۱].



شکل (۳): توزیع شبکه محاسباتی در کل ناحیه محاسباتی و نزدیک دیواره

۳- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی برای بررسی عددی جریان و انتقال حرارت درون میکروچسگر همگرا ارائه شده است. در ابتدا اعتبار سنجی و استقلال از شبکه مساله حل شده بررسی گشته و سپس نمودارهای سرعت و انتقال حرارت ذکر شده است.

۳-۱- اعتبار سنجی

برای بیان دقت و صحت روش حل، از مقاله زحمتکش و همکاران [۱۵] استفاده شده است. در این مقاله شبیه سازی جریان دوجزئی گازهای هلیوم و نئون در یک میکروکانال با شرایط مرزی سرعت لغزشی و پرش دمایی بررسی شده است. دینامیک سیالات برای سیستم دوجزئی توسط معادلات ناویر استوکس، انرژی و انتقال جرم بیان شده است. در این مساله یک میکروکانال به طول ۴ میکرومتر و ارتفاع ۱ میکرومتر در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی این مساله عبارتند از:

شرایط ورودی: فشار ۳۰۰ کیلو پاسکال و دما ۳۰۰ کلوین
شرایط خروجی: فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال

همچنین دما بر روی دیواره میکروکانال ۳۵۰ کلوین می باشد. لازم به ذکر است که عدد نادسن کمتر از ۰/۱ می باشد. صحت سنجی پروفیل دما و سرعت در مقطع $\frac{X}{L} = 0.1$ در شکل ۴ و ۵ آورده شده است.

$$q = -k\nabla T \quad (۶)$$

برای شرط مرزی سرعت از معادلات ماکسول مرتبه اول استفاده شده است که به صورت رابطه ۷ می باشد [۱].

$$u_s^* - u_{wall}^* = \frac{2 - \sigma}{\sigma} Kn \frac{\partial u_s^*}{\partial n^*} \Big|_w + \frac{3}{4\gamma k_2^2} \frac{Kn^2 Re}{Ma^2} \frac{\partial T^*}{\partial s^*} \Big|_w \quad (۷)$$

برای شرط مرزی دما نیز از معادلات ماکسول مرتبه اول استفاده شده است که به صورت رابطه ۸ می باشد [۱].

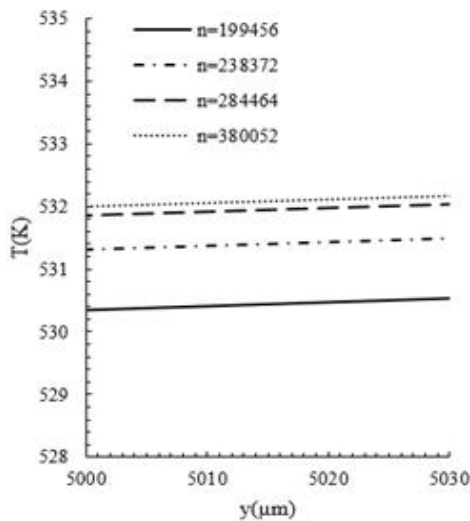
$$T^* - T_{wall}^* = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{Kn}{Pr} \frac{\partial T^*}{\partial n^*} \Big|_w \quad (۸)$$

بر روی دیواره خارجی میکروکانال شرط مرزی عدم لغزش و بر روی مرز محیط اطراف شرط مرزی باز (open boundary) در نظر گرفته شده است.

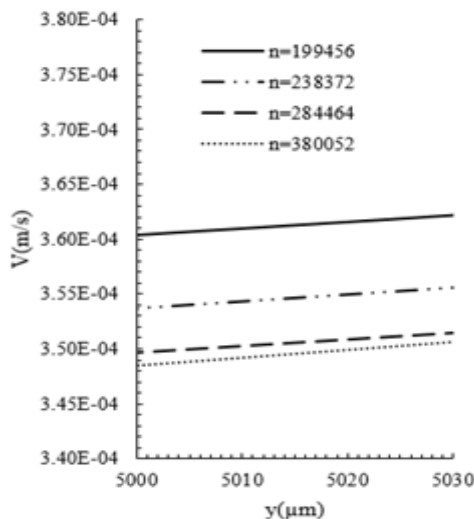
فشار در ورود و خروج میکروکانال، فشار محیط می باشد. در ورودی جریان گاز NH3 با غلظت ۰/۰۵ جرم مولی وجود دارد. دمای خروجی ۶۲۳ کلوین می باشد.

۳-۲- روش حل

حل مساله با استفاده از روش المان محدود و شبکه محاسباتی سازمان یافته در نرم افزار چند فیزیکی کامسول 5.2 انجام شده است. معادلات حاکم غیرخطی شامل معادلات بقای جرم، اندازه حرکت خطی، گونه های شیمیایی و انرژی کاملاً کوپل شده با یکدیگر مورد استفاده قرار می گیرند. نوع شبکه بندی به صورت مثلثی انتخاب می شود به طوری که توزیع شبکه محاسباتی به نحوی می باشد که درون کانال و نزدیک دیواره که بیشترین حجم محاسبات در آن وجود دارد تعداد المان های بیشتری در این نواحی وجود داشته باشد. شکل ۳ نحوه تولید شبکه محاسباتی در میکروکانال و محیط اطراف را نشان می دهد. تعداد کل شبکه محاسباتی برابر ۲۸۴۴۶۴ می باشد. میزان خطای نسبی برای تمامی مراحل حل برابر ۶-۱۰ در نظر گرفته می شود.



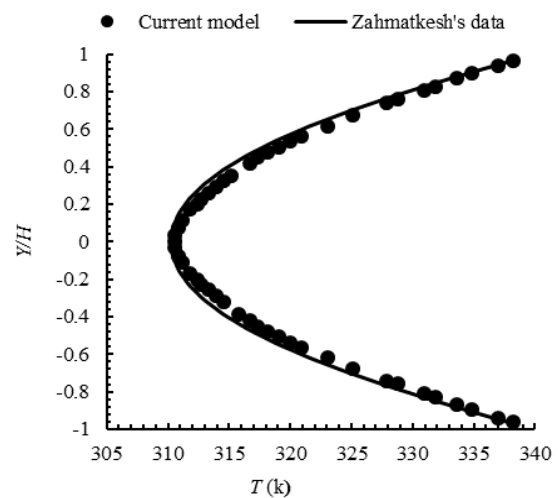
شکل (۶): بررسی شبکه برای سلول‌های با تعداد مختلف (دما)



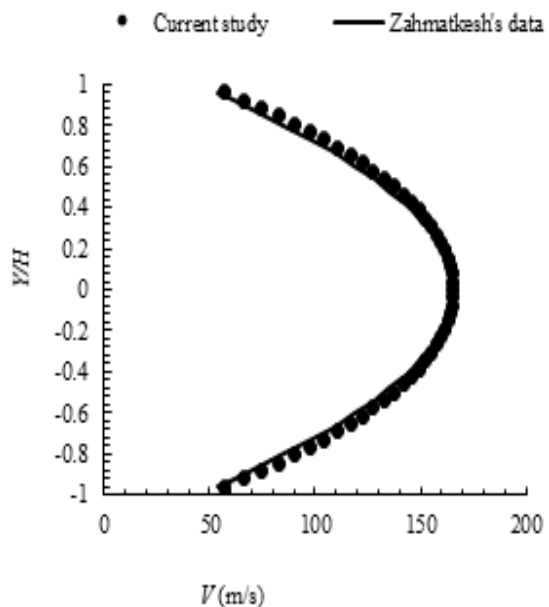
شکل (۷): بررسی شبکه برای سلول‌های با تعداد مختلف (سرعت)

۳-۳- بررسی پروفیل سرعت و دما برای مساله تعریف شده

در این بخش ابتدا به بررسی سرعت و دما برای میکروکانال با ارتفاع ثابت ۱۰ میکرومتر در طول ۱۰ میلی‌متر پرداخته می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ پروفیل دما و سرعت جریان را در طول میکروکانال نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است مقدار سرعت از ۰/۱۶۲ میلی‌متر بر ثانیه در ورودی میکروکانال تا مقدار ۲/۵۹۳ میلی‌متر بر ثانیه در $y=۸۵۴۰$ میکرومتر (جاییکه گرماساز قرار دارد) افزایش می‌یابد و پس از آن تا انتهای میکروکانال سرعت



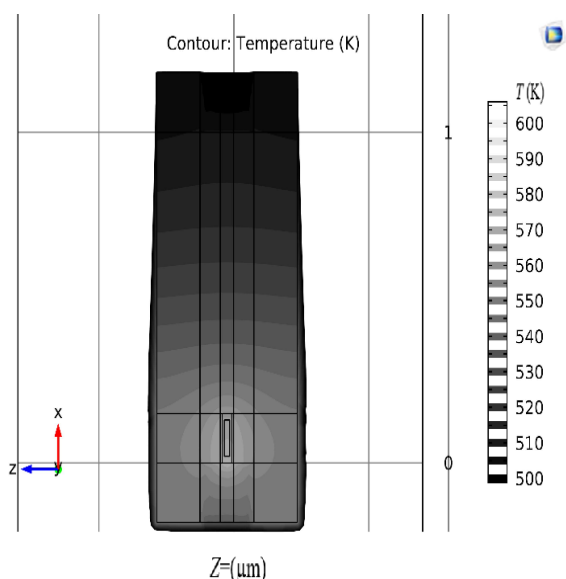
شکل (۴): پروفیل دما در مقطع $X/L=0.1$



شکل (۵): پروفیل سرعت در مقطع $X/L=0.1$

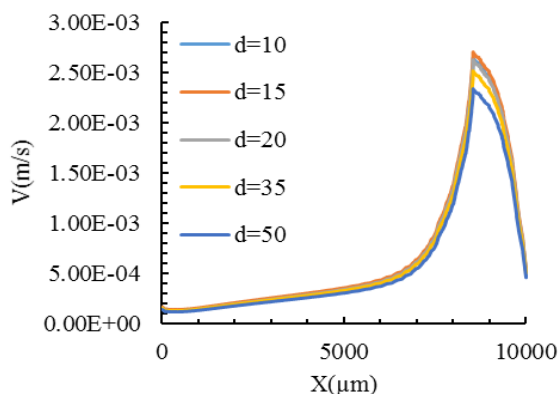
۳-۲- استقلال نتایج از شبکه

برای بررسی استقلال نتایج از شبکه محاسباتی، سلول‌های محاسباتی با حداقل ۰/۸۵ و ۰/۲ میکرومتر به ترتیب ۱۹۹۴۵۶ الی ۳۸۰۰۵۴ ایجاد گردید. نتایج دما بر روی خط افقی در وسط میکروکانال در شکل ۶ و ۷ ملاحظه می‌گردد. همان‌گونه که از شکل ۶ مشخص است فاصله بین منحنی‌های با تعداد سلول ۲۸۴۴۶۴ الی ۳۸۰۰۵۲ کمتر از فاصله بین سایر منحنی‌هاست. در این پژوهش مبنای حل عددی بر پایه استفاده از سلول‌های محاسباتی با تعداد ۲۸۴۴۶۴ گذاشته شده است.



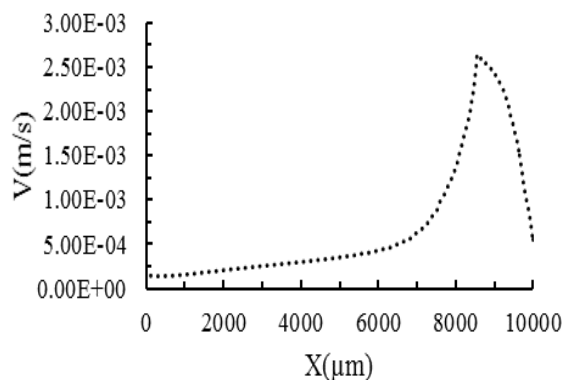
شکل (۱۰): توزیع دما برای میکرو حسگر

شکل ۱۱ توزیع سرعت درون میکرو کانال برای ارتفاع ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه سرعت برای قطر ورودی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میکرومتر به ترتیب ۲/۶۵۲، ۲/۷۰۵، ۲/۶۲۵، ۲/۵۱۹ و ۲/۳۳۴ میلی‌متر بر ثانیه در $y=8540$ می‌باشد. هر چه ارتفاع ورودی یا به عبارتی همگرایی افزایش می‌یابد مقدار سرعت ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. با افزایش ارتفاع ورودی میزان دبی ورودی افزایش می‌یابد که باعث افزایش سرعت می‌باشد و از طرفی با افزایش قطر ورودی سرعت لغزشی کاهش می‌یابد به طوری که اگر قطر ورودی بیشتر از ۶۰ میکرومتر باشد جریان عدم لغزش درون کانال حاکم می‌شود و سرعت درون میکروکانال به شدت کاهش می‌یابد.

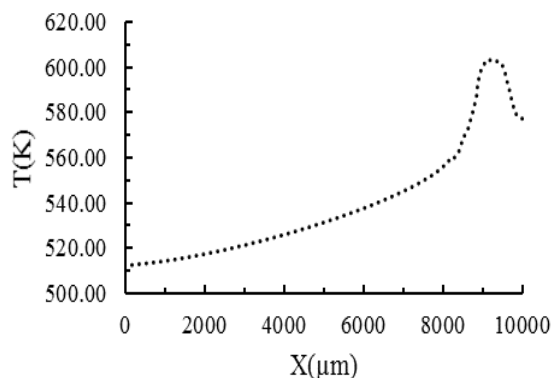


شکل (۱۱): توزیع سرعت در میکروکانال برای ارتفاع ورودی متفاوت.

جریان تا ۰/۵۵۱ میلی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. این تغییرات سرعت به دلیل اختلاف چگالی به وجود آمده در طول کانال اتفاق می‌افتد. به طوری که در جایگاه گرماساز قرار دارد به دلیل اینکه چگالی کمترین مقدار را دارا می‌باشد مقدار سرعت بیشینه می‌شود. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است مقدار دما از ۵۱۲/۲۸ کلوین در $y=0$ (ورودی میکروکانال) تا میزان ۶۰۳/۵۱ کلوین در $y=9105$ (جایگاه گرماساز قرار دارد) افزایش می‌یابد و پس از آن تا انتهای کانال به مقدار ۵۵۷/۴۹ کلوین کاهش می‌یابد.



شکل (۸): پروفیل سرعت در طول میکروکانال برای ارتفاع ۱۰ میکرومتر



شکل (۹): توزیع دما در طول میکروکانال برای ارتفاع ۱۰ میکرومتر.

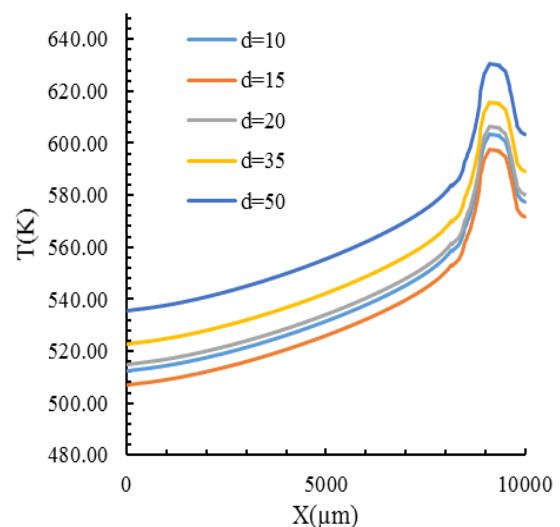
شکل ۱۰ شمارگر دما در میکروکانال و محیط اطراف از نمای بالا نشان می‌دهد. دمای ماکسیمم در خروجی میکروکانال ۶۰۳/۵۱ کلوین (در محل منبع حرارتی) و دمای مینیمم در ورودی میکروکانال ۵۱۲/۲۸ کلوین می‌باشد.

به دلیل سهولت در ساخت میکروکانال ارتفاع ورودی ۲۰ میکرومتر پیشنهاد می‌شود که در این ارتفاع، دما و سرعت مشابه ارتفاع ثابت ۱۰ میکرومتر با مرجع [۷] می‌باشد.

۷- مراجع

1. Kandlikar, S. G., Garimella, S., Li, D., Colin, S., King, M. R., "Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels", Chennai: Elsevier, pp. 9-86, 2006.
2. Ohira, S.I., Toda, K., "Micro gas analyzers for environmental and medical applications", *Analytica Chimica Acta*, Vol. 619, No. 1, pp. 143-156, 2008.
3. Dittrich, P.S., Tachikawa, K., Manz, A., "Micro total analysis latest advancements and trends", *Analytical Chemistry*, Vol. 78, No. 12, pp. 3887-3908, 2006.
4. Martini, V., Bernardini, S., Bendahan, M., Aguir, K., Perrier, P., Graur, I., "Microfluidic gas sensor with integrated pumping system", *Sensors and Actuators B*, Vol. 170, No. 1, pp. 45-50, 2012.
5. 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.
6. Chang, C.W., Maduraiveeran, G., Xu, J.C., Hunter, G.W., Dutta, P.K., "Design, fabrication, and testing of MEMS-based miniaturized potentiometric nitric oxide sensors", *Sensors and Actuators B*, Vol. 204, No. 1, pp. 183-189, 2014.
7. Martini, V., Graur, I., Bernardini, S., Aguir, K., Perrier, P., Bendahan, M., "Ammonia detection by a novel Pyrex microsystem based on thermal creep phenomenon", *Sensors and Actuators B*, Vol. 192, No. 1, pp. 714-719, 2014.
8. V. Varade, V.S. Duryodhan, A. Agrawal, A.M. Pradeep, A. Ebrahimi, E. Roohi, "Low Mach number slip flow through diverging microchannel", *Computers & Fluids*, Vol. 111, No.1, pp. 46-61, 2015.
9. V.S. Duryodhan, A. Singh, S.G. Singh, A. Agrawal, "Convective heat transfer in diverging and converging microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, No.1, pp. 424-438, 2015.
10. R. Mazooji, A. Raisi, "Effect of Viscous dissipation on gaseous flow heat transfer in a horizontal microchannel with rarefaction and

شکل ۱۲ توزیع دما درون میکروکانال برای ارتفاع ورودی متفاوت را نشان می‌دهد. مقدار بیشینه دما برای قطر ورودی ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میکرومتر به ترتیب به ترتیب ۶۰۳/۵۱، ۵۹۷/۴۷، ۶۰۶/۵۳، ۶۱۵/۵۸ و ۶۳۰/۶۷ کلوین در $y=9105$ می‌باشد. دمای در ورودی کانال به ترتیب ۵۱۲/۲۸، ۵۰۷/۱۶، ۵۱۴/۸۴، ۵۲۲/۵۲ و ۵۳۵/۳۳ کلوین می‌باشد. با افزایش ارتفاع ورودی میکروکانال مقدار دما درون میکروکانال ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.



شکل (۱۲): توزیع دما در میکروکانال برای ارتفاع ورودی متفاوت.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تغییرات ارتفاع ورودی میکروکانال و تأثیر همگرایی آن بر روی سرعت و دما پرداخته شده است. در این کار نتایج زیر حاصل می‌شود.

هر چه به منبع حرارتی نزدیک می‌شویم سرعت و دما به بیشینه خود می‌رسد (به دلیل کمینه مقدار چگالی جریان) و در خروجی چون تأثیرات جریان معکوس وجود دارد مقدار سرعت و دما کاهش می‌یابد.

با افزایش ارتفاع ورودی میکروکانال و همگرایی بیشتر آن سرعت درون میکروکانال ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

با افزایش ارتفاع ورودی میکروکانال و همگرایی بیشتر آن دما درون میکروکانال ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

- axial conduction”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 83-95, 2013. (in Persian)
11. 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 فارسی)
 12. V. Martini, S. Bernardini, M. Bendahan, K. Aguir, , P. Perrier, I. Graur., “Fabrication and characterization of gas detection microfluidic System”, *Procedia Engineering*, vol. 5, No. 1, pp. 1188–1191, 2010.
 13. J.G. Méolans, I.A. Graur, “Continuum analytical modeling of thermal creep”, *European Journal of Mechanics B*, Vol. 27, No. 6, pp. 785-809, 2008.
 14. 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).
 15. Zahmatkesh I., Alishahi M.M., Emdad H., “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.