



## استفاده از یک حلگر دی اس ام سی به منظور بررسی اثرات صفحات/دیواره‌های پیش گرم در میکروتراستر

حمید پرهیزکار<sup>1\*</sup>، اصغر ابراهیمی<sup>2</sup>، الیاس لکزیان<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، hparhiz@mut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 مرداد 1395

پذیرش: 14 مهر 1395

ارائه در سایت: 05 آبان 1395

کلید واژگان:

حلگر دی اس ام سی

افزایش دمای دیواره‌ها و صفحات پیش گرم

عدد نادنس موضعی

تراست و ضربه مخصوص میکروتراستر

حساسیت‌سنجی

### چکیده

در پژوهش حاضر یک حلگر دی اس ام سی مورد استفاده قرار می‌گیرد تا اثرات افزایش دمای دیواره‌ها و جایگذاری صفحات پیش گرم را بر پارامترهای عملکردی سیستم‌های میکروپیشراننده مورد بررسی قرار دهد. حلگر با استفاده از عدد نادنس موضعی که بر مبنای گرادینان تغییرات خواص سیال است، رژیم جریان پیوسته و رقیق را مجزا می‌نماید. شرایط مرزی ورودی و خروجی بر اساس روش مشخصه‌ها تعیین می‌شود. به منظور تضمین دقت شبیه‌سازی، ابعاد سلول‌ها، تعداد ذرات در هر سلول و مطالعه شبکه انجام می‌گیرد. سه سیستم میکروپیشراننده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در هر سه نوع، سیستم، شامل یک کانال و یک نازل همگرا-واگرا است. سیستم اول یک میکروپیشراننده گاز سرد، سیستم دوم یک میکروپیشراننده با دیواره‌های کانال پیش گرم و سیستم سوم یک میکروپیشراننده حاوی صفحات پیش گرم در داخل کانال است. سیستم اول به عنوان حالت مرجع در نظر گرفته می‌شود و دوسیس‌تم دیگر با آن مقایسه می‌شوند. در میکروتراستر دوم، افزایش دمای دیواره‌ها باعث افزایش سرعت جریان خروجی و ضربه مخصوص می‌شود. در سیستم سوم صفحات پیش گرم منجر به افزایش دمای جریان پایین دست شده و ضربه مخصوص نیز افزایش می‌یابد. مقدار تراست برای سیستم سوم به دلیل کاهش قابل ملاحظه دبی جرمی کاهش می‌یابد در حالی که دبی جرمی میکروپیشراننده نوع دوم نسبت به نوع سوم کمتر کاهش پیدا می‌کند و تراست آن در مقایسه با سیستم اول و سوم افزایش می‌یابد. بنابراین میکروپیشراننده دوم پارامترهای عملکردی بالاتری نسبت به بقیه دارد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش دمای دیواره‌ها در تراستر نوع دوم باعث کاهش حساسیت نیروی پیشران و ضربه مخصوص به افزایش دما می‌شود

## Applying a DSMC solver to explore the effects of heater plates/wall heating in microthruster

Hamid Parhizkar\*, Asghar Ebrahimi, Elyas Lekzian

Aerospace Department, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 15875-1774 Tehran, Iran, hparhiz@mut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 August 2016

Accepted 05 October 2016

Available Online 26 October 2016

### Keywords:

DSMC Solver

Wall Heating and Heater Plates

Local Knudsen Number

Microthruster Thrust and Specific Impulse

Sensitivity Analysis

### ABSTRACT

In the present paper, a DSMC solver is utilized to study the effects of wall heating/heater plates on performance parameters of microthruster systems. The solver uses local Knudsen number based on the gradient of flow properties to distinguish the molecular and continuum region. This solver uses theory of characteristics for determination of inlet and outlet boundary conditions. Proper cell dimensions, number of particles per cell, and grid study are carried out to guarantee the accuracy of simulations. Three typical micropropulsion systems are studied. All three systems have a microchannel and a converging-diverging micronozzle. The first type is cold gas micropropulsion system, the second type is a microthruster with wall heated channel, the third type is microthruster with heater plates inside. The first type is considered as reference case and two other systems are compared with type1. It is observed that heating the walls in microthruster type2 accelerates the flow and increases the specific impulse of the system. In micropropulsion device type3, heater plates increase downstream temperature of convergent-divergent nozzle and also elevate the specific impulse. Due to considerable mass flow rate decrease of system type3, its thrust is decreased whereas mass flow rate of system type2 is not decreased as much as type3 and therefore the thrust of microthruster type2 is more than type1 and type3. Hence the second micropropulsion system configuration has higher performance parameters in comparison with two other systems. It is also observed that increasing wall temperature in microthruster type2 decreases the thrust and specific impulse sensitivity to temperature increase.

### 1- مقدمه

Please cite this article using:

H. Parhizkar, A. Ebrahimi, E. Lekzian, Applying a DSMC solver to explore the effects of heater plates/wall heating in microthruster, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 123-134, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

H. Parhizkar, A. Ebrahimi, E. Lekzian, Applying a DSMC solver to explore the effects of heater plates/wall heating in microthruster, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 123-134, 2016 (in Persian)

جریان در یک میکرونازل را مورد بررسی قرار دادند. آنها به بررسی اثرات فشار ورودی بر جریان داخل میکرونازل پرداختند. نتایج شبیه‌سازی آنها نشان داد که افزایش فشار ورودی باعث کاهش فاصله‌ی بین گلوگاه و نقطه چوک شدن جریان می‌شود.

در مقاله حاضر، یک میکروتراستر که بر اساس اختلاف فشار کار می‌کند بررسی می‌شود. ابتدا روش شبیه‌سازی عددی حلگر دی‌اس‌ام‌سی توسعه داده شده، که جریان گذرنده از داخل میکروتراستر را شبیه‌سازی می‌کند، معرفی می‌شود. سپس شرایط مرزی‌ای که توسط ونگ و همکاران [17] برای شبیه‌سازی جریان در داخل یک میکروکانال مورد استفاده قرار گرفته است و به عنوان شرایط مرزی حلگر دی‌اس‌ام‌سی در نظر گرفته شده است معرفی می‌شود. سپس با استفاده از حلگر یک میکروکانال و یک میکرو-روزنه مدلسازی می‌شود و نتایج آن با نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی ونگ و همکاران مقایسه می‌شود. در مرحله بعد میکروتراستر مدلسازی می‌شود و اثرات افزایش دمای جریان با افزودن دمای دیواره میکروتراستر و همچنین افزودن صفحات گرم‌کننده جریان به داخل میکروتراستر بر رفتار جریان و پارامترهای عملکردی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## 2- تئوری مورد استفاده حلگر

حلگر از روش دی‌اس‌ام‌سی به منظور حل عددی معادلات بولتزمن استفاده می‌کند. این روش از حل آماری رفتار ذرات با استفاده از تئوری جنبشی دینامیک مولکولی گازها که توسط برد [18] ارائه شده است بهره می‌گیرد. در این روش، هر ذره نماینده تعداد زیادی از مولکول‌های سیال است. تعداد مولکول‌هایی که توسط یک ذره مدلسازی می‌شوند فاکتور مقیاس<sup>5</sup> نام دارند. در استفاده از روش دی‌اس‌ام‌سی دامنه شبیه‌سازی جریان سیال بایستی شبکه‌بندی شود. تقسیم‌بندی جریان به تعداد مشخصی سلول به منظور نمونه‌گیری از متغیرهای ماکروسکوپی و همچنین به منظور انتخاب دو ذره‌ای که احتمال برخورد با یکدیگر را دارند انجام می‌شود [19].

مبنای روش دی‌اس‌ام‌سی بر اساس این مساله استوار است که تعیین می‌کند که هر ذره در طول پیمایش میانگین مسیر آزاد مولکولی به یک ذره دیگر برخورد می‌کند (برخورد مولکولی) یا اینکه بدون برخورد به ذره‌ای دیگر به مسیر خود ادامه می‌دهد (حرکت بدون برخورد). این مساله در هر گام زمانی برای هر ذره مورد بررسی قرار می‌گیرد و این عملیات تا زمانی که جریان به حالت پایا برسد ادامه می‌یابد. هنگامی که جریان به حالت پایا رسید، مقادیر ماکروسکوپی جریان مانند فشار، دما، چگالی و سرعت با استفاده از سرعت‌های مولکولی تعیین می‌شوند. بنابراین، مبنای روش حل بر اساس: الف) تعیین حرکت بدون برخورد ذره، ب) تعیین برخورد ذرات، و پ) تولید متغیرهای ماکروسکوپی جریان استوار است. مدل ریاضی هر یک از این مراحل در ادامه بیان می‌شود.

### 2-1- حرکت بدون برخورد ذره

در هر گام زمانی ( $\Delta t$ )، هر ذره دارای یک سرعت مشخص است ( $c_i$ ). بنابراین فاصله‌ی ( $x_i$ ) که یک ذره می‌تواند بدون برخورد با ذره دیگر در یک گام زمانی طی کند بر اساس رابطه (1) قابل محاسبه است:

$$x_i = x_{i,0} + c_i \Delta t \quad (1)$$

### 2-2- برخورد ذره

با پیشرفت در فناوری‌های مورد نیاز برای ساخت یک قطعه در ابعاد میکرو و نانو، تعداد زیادی از ابزارآلاتی چون میکروکانال‌ها، ابزارآلات میکرونی جاذب گرما، میکروتوربین‌ها، میکروموتورها و میکروتراسترها توسعه یافتند. به دلیل برتری‌هایی که این سیستم‌های میکروالکترومکانیکی نسبت به وسایل مشابه خود در ابعاد ماکرو دارند کاربردهای بسیاری در زمینه‌های صنعتی و پزشکی پیدا کردند [1]. میکروسیستم‌ها حجم بسیار کمی اشغال می‌کنند و همچنین قابلیت کارکرد همزمان چندین عدد از آنها بر روی یک تراشه کوچک وجود دارد. در چنین حالتی، در صورت از کار افتادن یکی از این سیستم‌های کوچک، وظایف مربوط به سیستم از کار افتاده بین سایر سیستم‌های موجود بر روی تراشه تقسیم شده و به این ترتیب امکان از کار افتادن کامل سیستم بسیار کمتر می‌شود. از جمله دیگر فواید سیستم‌های میکروالکترومکانیکی این است که این وسایل انرژی کمی مصرف می‌کنند و دقت و حساسیت بسیار بالایی نیز دارند. علاوه بر کاربردهای بسیار زیاد این سیستم‌ها در زمینه‌های الکتریکی، سازه‌ای و حمل و نقل [2]، امکان استفاده از این وسایل در زمینه‌هایی مانند کنترل وضعیت ماهواره‌های کوچک با بهره‌گیری از میکروتراسترها [3-5] از جمله زمینه‌های جذاب تحقیقاتی و عملیاتی است.

در دهه 1960 میلادی پیشران‌های تولیدکننده نیروی پیشران کم، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند [6,7]. این تراسترها غالباً با الهام از ساختار مدل‌های ابعاد ماکرو آنها عمدتاً دارای یک نازل همگرا-واگرا بودند. سپس روش‌های عددی توسط رای [8] و همچنین بوید و همکاران [9] به منظور بررسی رفتار جریان در نازل‌های همگرا-واگرا در ابعاد میکرو ارائه گردید. بوید از روشی به نام دی‌اس‌ام‌سی<sup>1</sup> استفاده نمود و ثابت کرد که این روش به اندازه کافی دقیق هست تا جریان سیال را به ویژه در قسمت واگرای تراستری که به درون خلا تخلیه می‌شود مدلسازی و تحلیل نماید. نازل‌های کوچک توسط بایت [10] نیز مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. بایت میکرو نازلی را توسط معادلات ناویر-استوکس شبیه‌سازی نمود و مشاهده کرد که با کاهش عدد رینولدز، به دلیل افزایش ضخامت لایه مرزی، راندمان پیشران کاهش می‌یابد. یک میکروتراستر که در فضایی جی‌پی‌بی<sup>2</sup> مورد استفاده قرار گرفته بود توسط جفریت و همکاران [11] مطالعه گردید. آنها به بررسی اثرات تغییر فشار تخلیه بر رفتار جریان در میکروتراستر پرداختند. ایوانوف و همکاران [12] به مطالعه بررسی اثرات عدد رینولدز گلوگاه میکرونازل بر ضربه مخصوص پرداختند. آنها اثبات کردند که افزایش اثرات افت فشار منجر به بیش‌یابی نمودن مقدار ضربه مخصوص میکروتراستر می‌شود. الکسینکو و همکاران [13] با استفاده از روش ترکیبی دی‌اس‌ام‌سی و ناویر-استوکس<sup>3</sup> یک میکرونازل تقارن محوری سه‌بعدی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که انبساط گاز باعث افزایش ضربه مخصوص میکروتراستر می‌شود. زی [14] نشان داد که جریان در نازل‌های میکروالکترومکانیکی به صورت دقیق توسط روش دی‌اس‌ام‌سی مدلسازی می‌شود و استفاده از معادلات ناویر-استوکس حتی با اضافه کردن شرایط مرزی لغزشی به معادلات در شرایطی که میانگین عدد نادسن حدود 0.01 است برای نمونه خاص مورد مطالعه آنها نامعتبر می‌شود. اثرات زبری سطح در یک میکرو نازل توسط توره و همکاران [15] مورد مطالعه قرار گرفته است. آنها مشاهده کردند که زبری سطح منجر به ایجاد شوک در نزدیکی دیواره‌ها می‌شود. سان و همکاران [16] روشی ترکیبی از حجم محدود<sup>4</sup> و دی‌اس‌ام‌سی ابداع کردند و با استفاده از این روش

<sup>1</sup> DSMC

<sup>2</sup> GP-B

<sup>3</sup> Navier Stokes

<sup>4</sup> FVM

<sup>5</sup> Scaling Factor

$$N = \sum_1^{N_t} N_i \quad (a-9)$$

$$U_i = \frac{1}{N} \sum_1^{N_t} \sum_1^{N_i} |c_i| \quad (b-9)$$

$$T = \frac{m}{3k} \left( \frac{1}{N} \sum_1^{N_t} \sum_1^{N_i} |c^2| - |U^2| \right) \quad (c-9)$$

در رابطه فوق  $N_i$  تعداد ذرات در یک سلول در  $i$  امین نمونه‌گیری گام زمانی است و  $N$  تعداد کل ذرات نمونه‌گیری شده در کل زمان‌های نمونه‌گیری شده در سلول است.

#### 2-4- برخورد ذرات با دیواره‌ها و سطوح میانی

برخورد ذرات با دیواره‌های میدان (و صفحه‌های گرم‌کننده جریان در میکروتراستر) مستقل از سرعت ذره در برخورد با دیواره‌های میدان بوده و تابعی از دمای دیواره در نظر گرفته می‌شود. در این نوع برخورد مؤلفه‌های سرعت ذره‌ای که با دیواره برخورد می‌کند به صورت تصادفی تولید می‌شود و تابعی از دمای دیواره است:

$$c_x^* = \sqrt{-\log(R_f) V_{mp}} \sin \theta \quad (a-10)$$

$$c_y^* = \sqrt{-\log(R_f) V_{mp}} \quad (b-10)$$

$$c_z^* = \sqrt{-\log(R_f) V_{mp}} \sin \theta \quad (c-10)$$

که در روابط (10)، زاویه  $\theta$  (که برای مؤلفه‌های مماسی بردار سرعت ذره تعریف می‌شود) زاویه‌ای تصادفی بین صفر تا 360 درجه است که به صورت رابطه (11) تعیین می‌شود:

$$\theta = 2\pi R_f \quad (11)$$

مقدار  $V_{mp}$  که بیشترین سرعت محتمل ذره در شرایط تعادل ترمودینامیکی گاز می‌باشد به صورت رابطه (12) محاسبه می‌شود.

$$V_{mp} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} \quad (12)$$

#### 2-5- شرایط مرزی ورودی و خروجی

بر اساس تئوری مشخصه‌ها، شرایط مرزی ورودی بر اساس روابط (13) محاسبه می‌شوند:

$$(u_{in})_j = u_j + \frac{P_{in} - P_j}{\rho_j a_j} \quad (a-13)$$

$$(v_{in})_j = v_j \quad (b-13)$$

$$(w_{in})_j = w_j \quad (c-13)$$

اگر راستای اعمال فشار در جهت  $y$  و یا  $z$  باشد نگاه محاسبه مقدار سرعت با اعمال فشار ورودی بر سلول مجاور آن در جهت مربوطه محاسبه می‌گردد. در شرایط مرزی ورودی دو پارامتر ماکروسکوپی فشار ورودی و دمای ورودی لحاظ می‌شوند. در شرایط مرزی خروجی، فقط مقدار فشار خروجی لحاظ شده و مقادیر سرعت، دما و چگالی محاسبه می‌شوند.

$$(\rho_e)_j = \rho_j + \frac{P_e - P_j}{a_j} \quad (a-14)$$

$$(u_e)_j = u_j + \frac{P_j - P_e}{\rho_j a_j} \quad (b-14)$$

$$(v_e)_j = v_j \quad (c-14)$$

$$(T_e)_j = \frac{P_e}{(\rho_e)_j R} \quad (d-14)$$

به منظور محاسبه برخورد ذره به یک ذره دیگر، تعداد حداکثر ذراتی که احتمال برخورد با ذره مورد نظر را دارند با استفاده از روش ان-تی-سی محاسبه می‌شود:

$$N_{\text{collision,max}} = \frac{N(N-1)F_{\text{NUM}}(\sigma_T c_T)_{\text{max}} \Delta t}{2V_c} \quad (2)$$

که در رابطه فوق،  $N$  تعداد ذرات در سلول،  $F_{\text{NUM}}$  فاکتور مقیاس،  $(\sigma_T c_T)_{\text{max}}$  بیشینه مقدار سطح مقطع برخورد ضریب سرعت نسبی ذره در سلول است. همچنین  $V_c$  حجم سلول می‌باشد. سپس احتمال برخورد در سلول با گزینش تصادفی هر جفت از ذرات به صورت رابطه (3) تعیین می‌شود.

$$\frac{(\sigma_T c_T)}{(\sigma_T c_T)_{\text{max}}} > R_f \quad (3)$$

در رابطه (3)،  $R_f$  یک مقدار تصادفی بین صفر و یک است. با انتخاب تصادفی جفت ذره، اگر رابطه بالا ارضا شود، فرض می‌شود که برخورد اتفاق افتاده است و سپس مقادیر سرعت‌های ذرات پس از برخورد محاسبه می‌شود. با بهره‌گیری از معادلات بقای انرژی و مومنتم خطی، مقادیر سرعت‌های ذرات پس از برخورد محاسبه می‌شوند. با استفاده از معادله بقای مومنتم، اثبات می‌شود که سرعت نسبی ذرات انتخابی که با اندیس  $i$  و  $j$  مشخص می‌شوند، قبل و پس از برخورد ثابت می‌مانند:

$$|c_r| = |c_r^*| = |c_i - c_j| = |c_i^* - c_j^*| \quad (4)$$

سپس موقعیت‌های مکانی برخورد با تعریف زاویه برخورد ( $\varepsilon$ ) و زاویه انحراف ( $\chi$ ) در صفحه برخورد دو ذره به صورت روابط (5,6) مشخص می‌شوند.

$$\varepsilon = 2\pi R_{f,1} \quad (5)$$

$$\cos \chi = 2R_{f,1} \left( \frac{\beta}{\alpha} \right) - 1 \quad (6)$$

اکنون مقادیر سرعت‌های نسبی پس از برخورد با تبدیل مختصات کارتزین به مختصات صفحه‌ای که در آن برخورد بین دو ذره اتفاق افتاده است محاسبه می‌شود:

$$u_r^* = \cos \chi u_r + \sin \chi \sin \varepsilon (v_r^2 + w_r^2)^{\frac{1}{2}} \quad (a-7)$$

$$v_r^* = \cos \chi v_r + \frac{\sin \chi (c_r w_r \cos \varepsilon - u_r v_r \sin \varepsilon)}{(v_r^2 + w_r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (b-7)$$

$$w_r^* = \cos \chi w_r + \frac{\sin \chi (c_r v_r \cos \varepsilon - u_r w_r \sin \varepsilon)}{(v_r^2 + w_r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (c-7)$$

با بهره‌گیری از تساوی سرعت‌های نسبی ذرات قبل و پس از برخورد، مقادیر سرعت‌های پس از برخورد به صورت روابط (8) محاسبه می‌شوند.

$$c'_i = \frac{1}{2} [(c_i + c_j) + c'_r] \quad (a-8)$$

$$c'_j = \frac{1}{2} [(c_i + c_j) - c'_r] \quad (b-8)$$

#### 2-3- نمونه‌گیری

پس از مشخص نمودن مقادیر سرعت‌های پس از برخورد، مقادیر ماکروسکوپی برای هر سلول استخراج می‌شود. چون روش استخراج مقادیر ماکروسکوپی از سرعت‌های پس از برخورد ذرات استخراج می‌شوند و این مقادیر خود بر اساس مقادیر تصادفی به‌دست آمده‌اند، لذا فرایند نمونه‌گیری متغیرهای ماکروسکوپی حتی پس از رسیدن جریان به حالت پایا هر قدر بیشتر ادامه یابد، مقدار انحرافات ناشی از جواب به‌دست‌آمده کمتر خواهد شد. مقادیر سرعت و دمای جریان بر اساس روابط (9) محاسبه می‌شوند.

## 4- صحنه‌گذاری

سه مساله در هنگام شبیه‌سازی بایستی در نظر گرفته شود تا نتایج دقیقی حاصل شود: اندازه سلول، گام زمانی حل، و تعداد ذرات در هر سلول. اندازه سلول بایستی کسری از طول پویش آزاد مولکولی باشد تا امکان انتخاب جفت ذراتی را که با یکدیگر برخورد می‌کنند در زمان انتخاب تصادفی ذرات فراهم آورد. گام زمانی بایستی کمتر از متوسط زمان برخورد مولکولی انتخاب شود تا حرکت ذره از برخورد آن ذره با ذرات دیگر مجزا شود. حداقل تعداد ذرات در هر سلول باید بیست ذره باشد تا برخوردهای تکراری یک ذره با مرز لحاظ نشود. اکنون با در نظرگیری مسائل فوق، شبیه‌سازی یک جریان میکرو-پویسوله و یک میکرووروزنه انجام می‌گیرد.

## 4-1- جریان میکرو-پویسوله

طول کانال 5 میکرومتر و عرض آن 1 میکرومتر است. کانال با یک شبکه باسازمان با 150 سلول در راستای  $x$  و 35 سلول در راستای  $y$  تقسیم‌بندی می‌شود. بر اساس شکل 1 فشار ورودی و خروجی به ترتیب برابر با 150 و 50 کیلوپاسکال است. دمای ورودی و دمای دیواره‌ها 300 کلوین است. گاز داخل میدان نیتروژن بوده و طول پویش آزاد مولکولی آن در فشار 150 کیلوپاسکال و دمای 300 کلوین (کمینه دمای میدان) برابر با  $3.6 \times 10^{-8}$  متر است. طول هر سلول در هر دو راستای  $x$  و  $y$ ،  $3 \times 10^{-8}$  متر است. بنابراین طول هر سلول کمتر از طول پویش آزاد مولکولی است. متوسط زمان برخورد مولکولی برای گاز نیتروژن در شرایط فشار و دمای پیش‌گفته برابر با  $7 \times 10^{-11}$  ثانیه است و گام زمانی حل برابر با  $2 \times 10^{-11}$  ثانیه در نظر گرفته شده است. اکنون میدان مورد استفاده با استفاده از حلگر شبیه‌سازی می‌شود. سرعت ذرات پس از برخورد به دیواره تابعی از دمای دیواره است و بر اساس توزیع ماکسول محاسبه می‌شود. شکل‌های 2 و 3 مطالعه شبکه را بر روی میکروکانال نشان می‌دهند. شکل 2 توزیع فشار در راستای خط مرکزی کانال و شکل 3 پروفیل سرعت در راستای محور  $y$  در یک مقطع به فاصله 0.33 از ورودی کانال را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که به ازای سه شبکه (شبکه‌بندی شماره 1:  $35 \times 50$  سلول، شبکه‌بندی شماره 2:  $35 \times 150$  سلول، شبکه‌بندی شماره 3:  $70 \times 150$  سلول) توزیع فشار و سرعت برای شبکه شماره 2 و 3 شبیه به یکدیگر است.

همچنین نتایج به‌دست‌آمده برای این دوشبکه‌بندی با نتایج ونگ و همکاران تطابق دارد. بنابراین شبکه‌بندی شماره 2 به اندازه کافی دقیق است و با استفاده از این شبکه‌بندی، حل به شبکه بستگی ندارد. رفتار شبه خطی توزیع فشار در راستای خط میانی میدان که به صورت آزمایشگاهی توسط

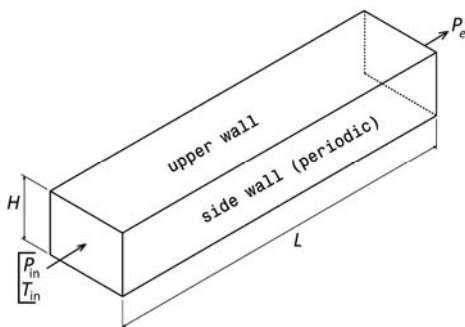


Fig. 1 Boundary conditions and geometry parameters of microchannel  
شکل 1 شرایط مرزی و پارامترهای هندسی میکروکانال

با استفاده از سرعت‌های ورودی و خروجی، شار ذرات (در ورودی و خروجی میدان) در هر گام زمانی با میانگین‌گیری بر روی کل مرز ورودی و خروجی مطابق رابطه (15) محاسبه می‌شود:

$$\dot{N} = \frac{n v_{mp}}{F_{NUM}} \Delta t A_{cell} \times \frac{\exp(-s^2 \cos^2 \theta) + \sqrt{\pi} s \cos \theta \{1 + \operatorname{erf}(s \cos \theta)\}}{2\sqrt{\pi}} \quad (15)$$

در رابطه (15)، مقدار نسبت سرعت  $(s)$ ، بر اساس سرعت ورودی و خروجی به صورت روابط (16) محاسبه می‌شود:

$$s = \frac{u_{in}}{\sqrt{\frac{2kT_{in}}{m}}} \quad (a-16)$$

$$s = \frac{u_e}{\sqrt{\frac{2kT_e}{m}}} \quad (b-16)$$

## 3- الگوریتم حل

الگوریتم حل به این ترتیب است: داده‌های ورودی شامل فشار ورودی و خروجی، دمای ورودی، داده‌های مربوط به شبکه‌بندی میدان در هر سه راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$ ، و ابعاد میدان محاسباتی اخذ می‌شوند. سپس مقدار اولیه دلخواهی برای سیال داخل میدان شامل سرعت‌ها و دما در نظر گرفته می‌شود. در مرحله بعد، شرایط مرزی در زمان صفر در ورودی و خروجی میدان اعمال می‌شوند. سپس ذرات حرکت داده می‌شوند و محاسبات مربوط به برخورد ذرات با دیواره‌ها و برخوردهای بین ذرات انجام می‌شود. در مرحله بعد مقادیر سرعت‌های پس از برخورد مشخص شده و سپس حرکت ذرات در داخل میدان و برخورد با دیواره‌ها و برخوردهای بین ذرات تا رسیدن به شرایط پایا تکرار می‌شود. به منظور کاهش پراکندگی آماری روش حل دی‌اس‌ام‌سی، محاسبات، قدری پس از رسیدن به شرایط پایا نیز انجام می‌گیرد. سپس در هر سلول نمونه‌گیری انجام می‌شود و تمام متغیرهای ماکروسکوپی شامل دما، فشار، سرعت، و چگالی مشخص می‌شوند [20].

حلگر توسعه داده شده دارای دو ویژگی است: به منظور گزینش صحیح‌تر جفت ذره انتخابی به منظور در نظرگیری شانس برخورد، شبکه زیرسلولی در هر گام زمانی اصلاح می‌شود. دقت تقسیم‌بندی زیرسلول‌ها در هر گام زمانی تابعی از تعداد ذرات در هر زیرسلول است. به این منظور تعداد ذرات در هر زیرسلول به نحوی تغییر می‌کند که متوسط فاصله جدایی مولکولی در برخورد مولکولی (فاصله بین مولکول‌ها در دستگاه مرکز جرم) به متوسط طول پویش آزاد مولکولی در هر سلول همواره کمتر از یک باشد. همچنین مجزا کردن رژیم جریان پیوسته و رقیق با تعریف عدد نادسن محلی صورت می‌گیرد. در نواحی‌ای که رژیم جریان پیوسته است، شروع انتخاب تعداد زیرسلول‌ها برابر با نواحی رقیق در نظر گرفته می‌شود.

همچنین مقدار گام زمانی برای هر سلول متغیر است (تا مساله حرکت آزاد و برخورد مولکولی که مبنای روش حل دی‌اس‌ام‌سی است، کاملاً دقیق شبیه‌سازی شود) اما یک گام زمانی کلی تعریف می‌شود که تمام متغیرهای زمانی میدان حل بر اساس آن محاسبه شوند. انتخاب این گام زمانی کلی به منظور مقایسه کردن این پارامتر با متوسط زمان برخورد مولکولی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پژوهش مورد نظر با برنامه نویسی در نرم‌افزار فرتن 90 انجام شده است. استفاده از این زبان برنامه‌نویسی در محاسبات حجیم و سنگین روش‌های عددی مهندسی مانند روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو متداول است.

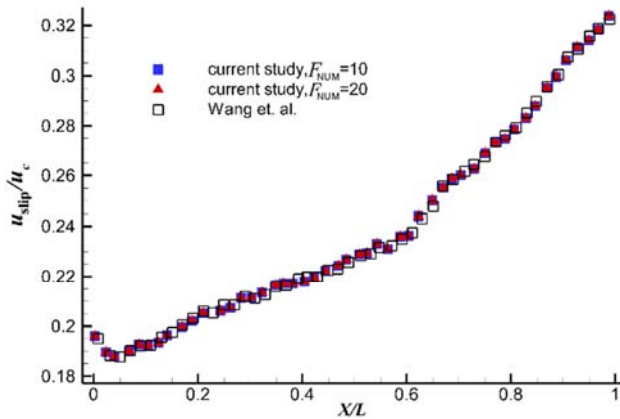


Fig. 4 Pressure distribution along channel centerline using grid 1, grid 2, grid 3

شکل 4 توزیع فشار در راستای خط میانی میدان با استفاده شبکه شماره 1، شبکه شماره 2، شبکه شماره 3

دیواره‌های بالا و پایین میدان به صورت دیفیوژیو است و دیواره‌های جانبی به صورت پرئودیک در نظر گرفته می‌شوند. شبیه‌سازی به ازای چهار فشار ورودی مختلف که در جدول 1 بیان شده است انجام می‌شود.

شبکه‌بندی برای تمام نمونه‌ها یکسان است و طول هر سلول در هر دو راستای  $x$  و  $y$  برابر با  $1 \times 10^{-8}$  متر است. کمترین طول پویس آزاد مولکولی و کمترین زمان متوسط برخورد مولکولی در نمونه چهارم اتفاق می‌افتد و به ترتیب برابر با  $1.8 \times 10^{-8}$  متر و  $3.7 \times 10^{-11}$  ثانیه است. طول هر سلول کمتر از کمینه طول پویس آزاد مولکولی و گام زمانی حل که برابر با  $2.0 \times 10^{-11}$  می‌باشد کمتر از کمینه متوسط زمان برخورد مولکولی است. به منظور مطالعه استقلال حل از شبکه، توزیع فشار در راستای خط میانی میدان برای هر چهار نمونه انجام شد و مطالعه شبکه برای نمونه سوم و چهارم به ازای سه شبکه‌بندی (شبکه 1:  $1000 \times 400$ ، شبکه 2:  $2000 \times 400$ ، و شبکه 3:  $2000 \times 800$  سلول) در شکل 6 نمایش داده شده است. شبکه شماره 2 و 3 توزیع فشار یکسانی به دست می‌دهند. بنابراین مطالعات با شبکه‌بندی شماره 2 ادامه می‌یابد.

خطوط جریان و کانتور فشار برای نمونه اول از جدول 1 در شکل 7 نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که جدایش جریان در پشت سوراخ روزنه اتفاق می‌افتد. این مساله به صورت آزمایشگاهی توسط لی و همکاران [22] مشاهده شده است.

توزیع سرعت در راستای خط میانی میکرو-روزنه در شکل 8 برای چهار

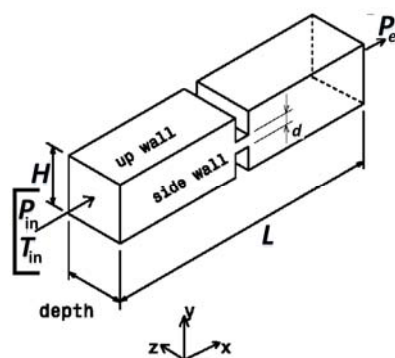


Fig. 5 Geometry parameters and boundary conditions of micro-orifice channel

شکل 5 پارامترهای هندسی و شرایط مرزی میکرو-روزنه

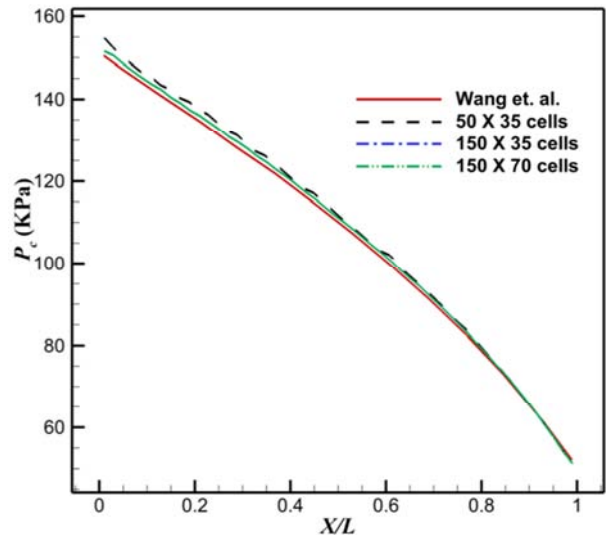


Fig. 2 Pressure distribution along channel centerline using grid 1, grid 2, grid 3

شکل 2 توزیع فشار در راستای خط میانی میدان با استفاده شبکه شماره 1، شبکه شماره 2، شبکه شماره 3

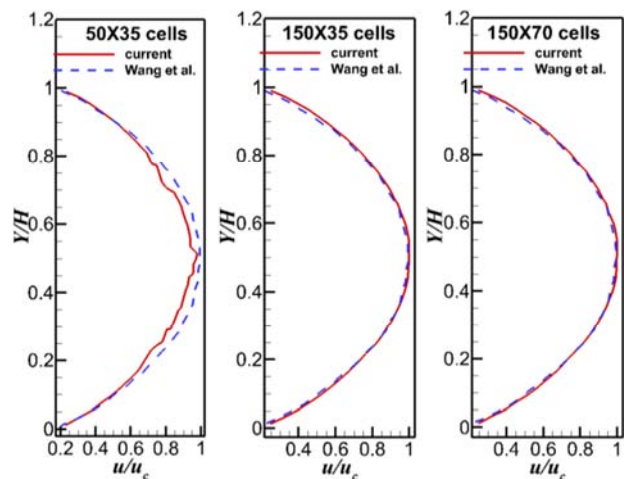


Fig. 3 Velocity profile at about 0.33 channel length from inlet using grid 1, grid 2, grid 3

شکل 3 پروفیل سرعت به فاصله 0.33 طول کانال از ورودی با استفاده از شبکه شماره 1، شبکه شماره 2، شبکه شماره 3

بان و همکاران [21] مشاهده شده است، در شکل 2 نیز مشاهده می‌شود. شکل 4 توزیع سرعت بی‌بعد شده توسط سرعت در میانه کانال را به ازای دو فاکتور مقیاس 10 و 20 نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که هر دو فاکتور مقیاس نتایج تقریباً یکسانی را به دست می‌دهند. بنابراین مطالعات با انتخاب فاکتور مقیاس 20 که هزینه محاسباتی کمتری نیز دارد قابل قبول است.

#### 2-4- جریان میکرو-روزنه

پارامترهای هندسی میکرو-روزنه در شکل 5 نمایش داده شده است. بر اساس شکل ارتفاع میدان 4 میکرومتر، طول میدان 20 میکرومتر، عمق میدان 0.05 میکرومتر و فاصله سوراخ روزنه 1 میکرومتر است. گاز داخل کانال نیتروژن است و جریان در حالت پایا است. میدان به 2000 سلول در راستای  $x$ ، 400 سلول در راستای محور  $y$  و 5 سلول در راستای محور  $z$  تقسیم‌بندی می‌شود. دمای ورودی و دمای دیواره‌های میدان 300 کلوین است. برخورد ذرات با

بر اساس دو شبیه‌سازی انجام شده می‌توان نتیجه‌گرفت که حلگر توسعه یافته دقیق است و در مرحله بعد از این حلگر برای شبیه‌سازی جریان در میکروپیشران‌ش استفاده می‌شود.

### 5- توضیح مساله میکروتراستر

در این بخش با استفاده از حلگر دی‌اس‌ام‌سی، سه سیستم میکروتراستری شبیه‌سازی می‌شوند. شکل 9 پارامترهای هندسی این میکروتراسترها را نمایش می‌دهد. در نوع اول یک میکروتراستر گاز سرد شبیه‌سازی می‌شود. در میکروتراستر نوع دوم دمای دیواره‌های کانال میکروتراستر تا 900 کلوین افزایش می‌یابد. ایده این نوع از میکروتراستر از نمونه آزمایشگاهی ساخته شده توسط کوندو و همکاران [23] گرفته شده است. آنها دمای دیواره‌ها را با نانوسیم‌های داغ افزایش داده‌اند. در نوع سوم میکروتراستر تعدادی صفحه‌های گرم‌کننده جریان که دمای آنها 900 کلوین است در داخل کانال میکروتراستر جاگذاری می‌شوند. ایده این نوع میکروتراستر از مدل آزمایشگاهی هیت و همکاران [24] اخذ شده است. جزئیات ابعاد و اندازه‌های سه نوع میکروتراستر فوق در جدول 2 بیان شده است.

هر سه نوع میکروتراستر ذکر شده دارای یک کانال ورودی هستند که به یک نازل همگرا-واگرا متصل شده است. به منظور در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای مختلف جریان در خروج از میکرونازل، ناحیه‌ای به نام ناحیه حائل<sup>1</sup> به انتهای میکرونازل متصل شده است [25]. سیال عامل داخل هر سه نوع میکروتراستر نیتروژن است. فشار ورودی 100 کیلوپاسکال، دمای ورودی 300 کلوین به هر سه نوع میکروتراستر اعمال می‌شود. به دلیل اینکه جریان در خروجی میکروتراستر مافوق صوت است، فشار خروجی‌ای به عنوان شرط مرزی خروجی در نظر گرفته نمی‌شود.

### 5-1- نوع اول: میکروپیشران‌ش گاز سرد

انتخاب اولیه تعداد سلول‌ها به منظور شبکه‌بندی میدان حل بر مبنای فشار و دمای ورودی میدان انجام می‌شود. در فشار ورودی 100 کیلوپاسکال و دمای ورودی 300 کلوین، طول پویس آزاد مولکولی برابر با  $5.3 \times 10^{-8}$  متر و متوسط زمان برخورد مولکولی  $1.12 \times 10^{-10}$  ثانیه است. بر این اساس شبکه‌ای که حداقل طول هر سلول آن برابر با  $5 \times 10^{-8}$  متر باشد انتخاب می‌شود.

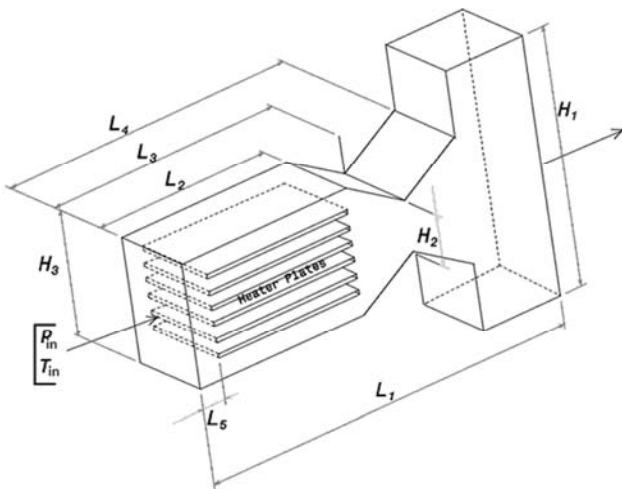


Fig. 9 Geometry parameters of microthruster

شکل 9 پارامترهای هندسی میکروتراستر

<sup>1</sup> Buffer

نمونه مختلف که در جدول 1 ذکر شد مشاهده می‌شود. همچنین در شکل 8 نتایج شبیه‌سازی حاضر با نتایج به دست آمده توسط ونگ و همکاران مقایسه شده است.

جدول 1 فشار ورودی برای میکرو-روزنه

Table 1 Inlet pressures for micro-orifice	
فشار ورودی (کیلوپاسکال)	
150	نمونه اول
200	نمونه دوم
250	نمونه سوم
300	نمونه چهارم

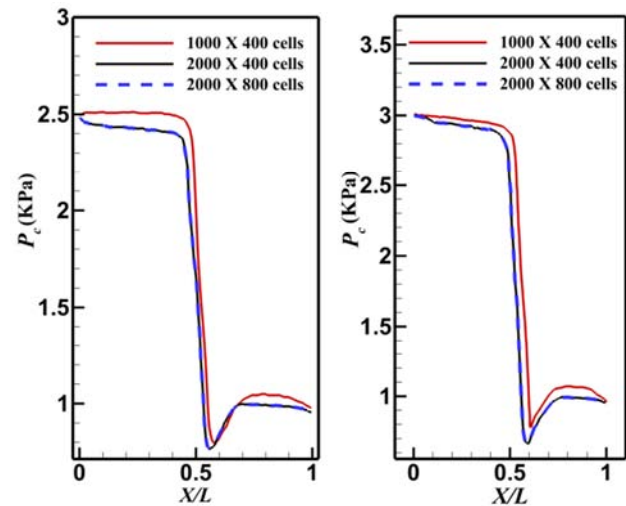


Fig. 6 Pressure distribution along centerline (case 3 & 4)

شکل 6 توزیع فشار در راستای خط میانی میکرو-روزنه (نمونه سوم و چهارم)

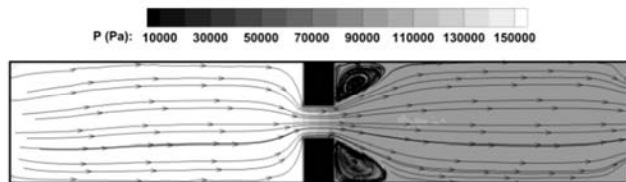


Fig. 7 Pressure contours and streamlines of orifice flow (case 1)

شکل 7 کانتورهای فشار و خطوط جریان میکروروزنه (نمونه اول)

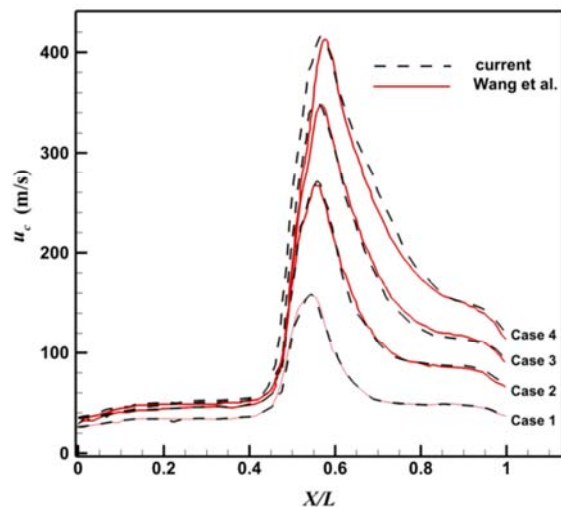


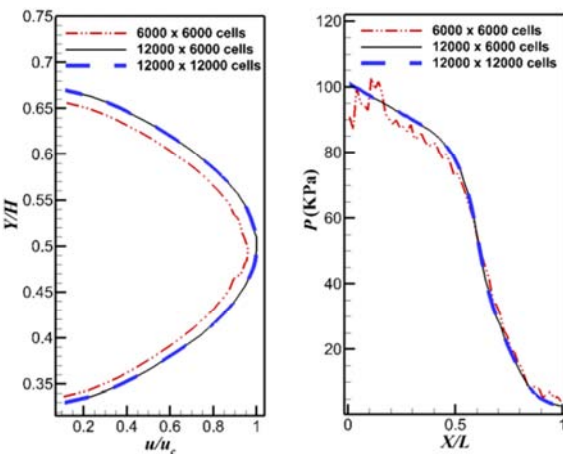
Fig. 8 Velocity distribution along centerline (case 1 to 4)

شکل 8 توزیع سرعت در راستای خط میانی میدان (نمونه اول تا چهارم)

که با نانوسیم‌های حرارتی پوشانده شده است آزمایش و مطالعه کرده‌اند. در این بخش دیواره‌های میکروتراستر گرم شده و دمای آنها 900 کلوین در نظر گرفته می‌شود. به عنوان شبکه‌بندی اولیه، با در نظرگیری فشار و دمای ورودی، تعداد  $6000 \times 12000$  سلول به منظور شبکه‌بندی میدان در نظر گرفته می‌شود. شکل 12 توزیع دما و فشار را در راستای محور  $y$  در فواصل  $X/L = 0.29$  (داخل کانال)،  $X/L = 0.49$  (قسمت همگرای میکرونازل)،  $X/L = 0.71$  (قسمت واگرای میکرونازل)، و  $X/L = 0.89$  (ناحیه بافر)، نشان می‌دهد. این نواحی به این دلیل انتخاب شده‌اند چون خواص جریان در هر قسمت از آن به دلیل تغییر هندسه و یا تغییر دما، دارای گرادینان تغییرات است. با بهره‌گیری از شکل 12، به ازای مقادیر مختلف فشار و دما، طول پویا آزاد مولکولی و متوسط زمان برخورد مولکولی مطابق جدول 3 محاسبه می‌شود.

کمینه طول پویا آزاد مولکولی و زمان برخورد در مقطع  $X/L = 0.49$  اتفاق می‌افتد و مقدار آنها به ترتیب برابر با  $1.2 \times 10^{-7}$  متر و  $2.08 \times 10^{-10}$  ثانیه است. طول هر سلول در هر دو راستای  $x$  و  $y$  کمتر از مقدار پیش‌گفته است. گام زمانی حل برابر با  $2 \times 10^{-11}$  ثانیه انتخاب می‌شود که از کمینه متوسط زمان برخورد مولکولی ( $2.08 \times 10^{-10}$  ثانیه) کمتر است. دو شبکه‌بندی  $6000 \times 12000$  سلول و  $12000 \times 12000$  سلول مورد استفاده قرار گرفت و مشاهده شد که هر دو شبکه توزیع سرعت یکسانی در خروجی میکرونازل به دست می‌دهند. بنابراین شبکه 2 به منظور ادامه مطالعات بر روی میکروتراستر نوع 2 انتخاب می‌شود.

توزیع عدد نادسن موضعی در شکل 13 نشان می‌دهد که ورودی کانال، بخش واگرای میکرونازل و ناحیه بافر در رژیم جریان رقیق قرار گرفته



**Fig. 10** Velocity distribution across the thruster exit type 1 (left figure); pressure distribution along the centerline of microthruster type 1 (right figure)

شکل 10 توزیع سرعت در خروجی میکروتراستر نوع اول (شکل چپ)، توزیع فشار در راستای خط میانی کانال برای تراستر نوع اول (شکل راست)

بنابراین 12000 سلول در راستای  $x$  و 6000 سلول در راستای  $y$  انتخاب می‌شود. سپس دو شبکه‌بندی دیگر (یک شبکه درشت‌تر و یک شبکه ریزتر) نیز به منظور مطالعه استقلال حل از شبکه انتخاب می‌شود. بنابراین در این نوع میکروتراستر سه شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد: شبکه‌بندی شماره 1:  $6000 \times 6000$  سلول، شبکه‌بندی شماره 2:  $12000 \times 6000$  سلول، شبکه‌بندی شماره 3:  $12000 \times 12000$  سلول. در هر سه نوع شبکه‌بندی پیش‌گفته، حداکثر تعداد سلول‌های مورد استفاده در راستای  $x$  و  $y$  ذکر شده است. مشاهده می‌شود که به ازای شبکه شماره 2 و شبکه شماره 3، پروفیل توزیع فشار در راستای خط میانی و توزیع سرعت بی‌بعد شده با سرعت در میانه میدان در نازل خروجی میکروتراستر مقادیر مشابهی به دست می‌دهند (شکل 10). بنابراین شبکه شماره 2 مقادیر صحیحی به دست می‌دهد و مطالعات با این شبکه برای میکروتراستر نوع اول انجام می‌شود. طول پویا آزاد مولکولی برای نیتروژن در دمای 300 کلوین و در فشار 100 کیلوپاسکال برابر با  $5.3 \times 10^{-8}$  متر است. طول سلول در راستای  $x$  و  $y$  برابر با  $5 \times 10^{-8}$  متر است که کمتر از طول پویا آزاد مولکولی نیتروژن است.

اکنون رژیم جریان (رژیم جریان پیوسته و رژیم جریان رقیق) مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور عدد نادسن محلی با بهره‌گیری از رابطه (17) تعریف می‌شود:

$$Kn_{local} = \frac{\lambda_{local}}{\phi} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \quad (17)$$

در رابطه فوق پارامتر  $\phi$  یکی از متغیرهای ماکروسکوپی جریان شامل سرعت، دما و چگالی است. پارامتر  $\lambda_{local}$  مقدار میانگین طول پویا آزاد مولکولی محلی (میانگین طول پویا آزاد مولکولی در هر سلول) است که توسط رابطه (18) محاسبه می‌شود:

$$\lambda_{local} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n_i} \quad (18)$$

در رابطه (18)، پارامتر  $n_i$  چگالی عددی در سلول  $i$  ام و پارامتر  $d$  قطر مولکولی است.

مقدار عدد نادسن محلی بر اساس رابطه زیر که توسط بوید و همکاران [26] پیشنهاد شده است، محاسبه می‌شود.

$$Kn_{local} = \max(kn_{local,T}, kn_{local,u}, kn_{local,\rho}) \quad (19)$$

عدد نادسن موضعی برای میکروتراستر نوع اول در راستای خط میانی میدان در شکل 11 نمایش داده شده است. بر این اساس، جریان در کانال و قسمت همگرای نازل در رژیم جریان پیوسته (عدد نادسن محلی کمتر از 0.05 است [26]) و در قسمت واگرای نازل و ناحیه بافر در رژیم جریان رقیق قرار دارد.

## 2-5- نوع دوم: میکروپیشران‌ش با دیواره‌های پیش‌گرم

ایده افزایش دمای دیواره‌ها و شماتیک کلی این نوع میکروتراستر از مطالعات آزمایشگاهی کوندو و همکاران الهام گرفته شده است. آنها یک میکروتراستر را

جدول 2 پارامترهای هندسی سه نوع میکروتراستر

**Table 2** Dimension parameters of three types of microthrusters

$\frac{H_3}{H_1}$	$\frac{H_2}{H_1}$	$H_1$ (mm)	$\frac{L_5}{L_1}$	$\frac{L_4}{L_1}$	$\frac{L_3}{L_1}$	$\frac{L_2}{L_1}$	$L_1$ (mm)	
			----					نوع اول
0.5	0.25	0.3	0.17	0.83	0.62	0.4	0.6	نوع دوم
			0.17					نوع سوم

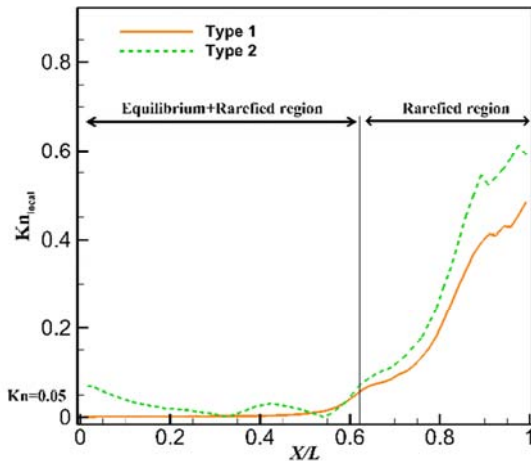


Fig. 13 Local Knudsen number comparison of type 1 and type 2

شکل 13 مقایسه توزیع عدد نادسن میکروتراستر نوع 1 و نوع 2

میکروپیشراننده دارای یک میکروکانال، یک میکرونازل همگرا-واگرا، یک ناحیه بافر و تعدادی صفحات پیش گرم است. ده عدد صفحه پیش گرم نازک که طول آنها 138 میکرومتر است داخل بخش میکروکانال قرار می‌گیرند. به عنوان شبکه بندی اولیه، تعداد 12000 سلول در راستای  $x$  و 6000 سلول در راستای  $y$  انتخاب می‌شوند. توزیع دما و فشار در چهار مقطع در شکل 14 نمایش داده شده است. کمترین طول پویس آزاد مولکولی و کمترین مقدار متوسط زمان برخورد مولکولی در  $X/L = 0.29$  (داخل کانال) است و به ترتیب برابر با  $2.2 \times 10^{-7}$  متر و  $2.7 \times 10^{-10}$  ثانیه است. مطالعه شبکه به ازای سه شبکه  $6000 \times 6000$  سلول، 12000  $\times$  6000 سلول، و  $12000 \times 12000$  سلول انجام شد. ملاحظه می‌شود که به ازای دوشبکه  $12000 \times 6000$  سلول، و  $12000 \times 12000$  سلول توزیع فشار مستقل از شبکه بندی میدان می‌باشد (شکل 15). لذا مطالعات با شبکه  $12000 \times 6000$  سلول ادامه می‌یابد.

شکل 16 توزیع عدد نادسن موضعی را در میکروتراستر نوع سوم نشان می‌دهد. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که در بخش ورودی نازل همگرا ( $X/L = 0.4$ ) پرش عدد نادسن موضعی وجود دارد. این امر نشان می‌دهد که در این ناحیه، افت گرادیان دما سریعتر از افزایش طول پویس آزاد مولکولی اتفاق می‌افتد و بنابراین عدد نادسن در این ناحیه به یکباره افزایش می‌یابد. رفتار پیچیده جریان در این ناحیه ناشی از اثر همزمان انتقال حرارت و برخورد ذرات به دیواره‌ها و مرزهای میدان است.

#### 4-5- مقایسه رفتار جریان در میکروپیشراننده نوع اول، دوم و سوم

کانتورهای دما برای سه نوع میکروتراستر در شکل 17 نشان داده شده‌اند. در بالاترین قسمت شکل 17 کانتورهای دما در میکروپیشراننده نوع اول نشان می‌دهند که دمای گاز در بخش واگرا به دلیل انبساط گاز کاهش می‌یابد. در شکل 17 (شکل میانی و پایینی) کانتورهای دمای میکروپیشراننده نوع دوم و سوم نشان می‌دهد که دما به دلیل دمای دیواره‌ها (در نوع دوم) و وجود صفحات پیش گرم (در نوع سوم) ابتدا افزایش یافته، به یک مقدار بیشینه رسیده و سپس کاهش می‌یابد. به منظور مطالعه دقیق‌تر، خواص جریان در راستای خط میانی میدان برای هر سه نوع میکروپیشراننده ترسیم و مقایسه می‌شوند (شکل 18).

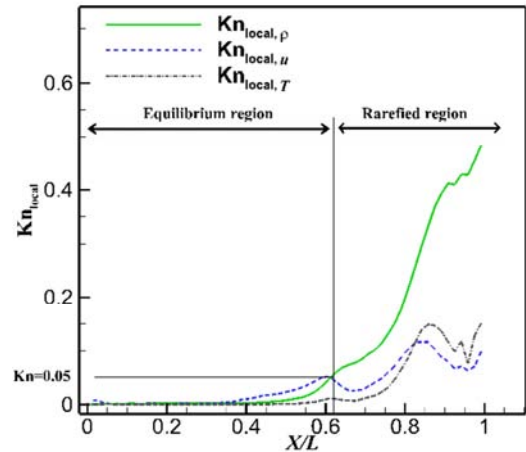


Fig. 11 Local Knudsen along centerline (microthruster type 1)

شکل 11 توزیع نادسن موضعی خط میانی کانال (میکروپیشراننده نوع اول)

است. همچنین در شکل 13 عدد نادسن موضعی میکروتراستر نوع اول و دوم مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش دمای دیواره‌ها در میکروپیشراننده نوع دوم سبب افزایش رقیق‌شدگی جریان به ویژه در قسمت واگرای نازل نسبت به میکروپیشراننده نوع اول می‌شود.

#### 3-5- نوع سوم: میکروپیشراننده با صفحات پیش گرم

ایده میکروتراستر نوع سوم برگرفته از هیت و همکاران می‌باشد. این

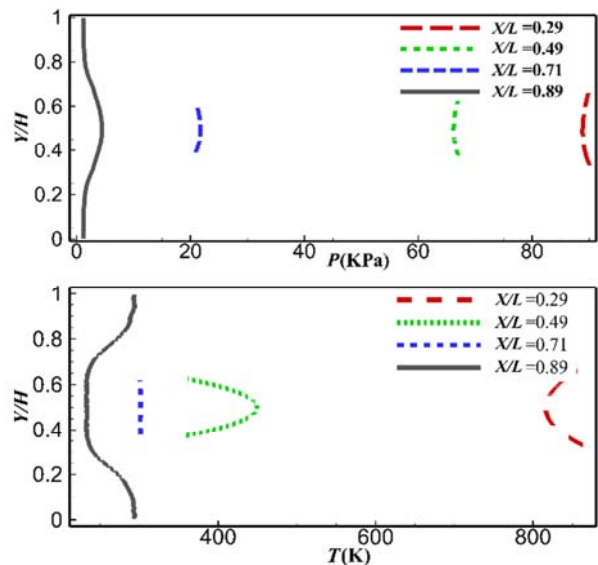


Fig. 12 Pressure and temperature distribution at different sections of microthruster type 2

شکل 12 مقادیر فشار و دما در مقاطع مختلف میکروتراستر نوع دوم

جدول 3 مقادیر طول پویس آزاد مولکولی و متوسط زمان برخورد مولکولی در مقاطع مختلف از میکروتراستر نوع دوم

Table 3 Mean free path and average molecular collision time at different sections of microthruster type 2

$t_{col}$ (s)	$\lambda$ (m)	$T$ (K)	$P$ (KPa)	$\frac{\bar{X}}{\bar{L}}$
$2.1 \times 10^{-10}$	$1.6 \times 10^{-7}$	815	88	0.29
$2.08 \times 10^{-10}$	$1.2 \times 10^{-7}$	450	66	0.49
$5 \times 10^{-10}$	$2.4 \times 10^{-7}$	300	22	0.71
$1.9 \times 10^{-9}$	$8 \times 10^{-7}$	232	5	0.89



رفتار جریان نشان می‌دهند. نمودار توزیع فشار در شکل 18 نشان می‌دهد که جریان در عبور از صفحات پیش گرم در میکروپیشران نوع سوم دچار افت فشار شدیدی می‌شود در حالیکه در نوع اول و دوم چنین مساله‌ای مشاهده نمی‌شود و الگوی تغییرات فشار برای پیشران نوع اول و دوم تا حد زیادی شبیه به یکدیگر است.

نمودار توزیع دما نشان می‌دهد که دما در میکروتراستر نوع سوم در شروع و پایان صفحات پیش گرم شیب تغییرات زیادی دارد. این مساله برای میکروپیشران نوع دوم هم مشاهده می‌شود. ملاحظه می‌شود که دما در کل میدان پس از صفحات پیش گرم در نوع سوم افزایش یافته است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که افت فشار جریان در گذر از صفحات پیش گرم تبدیل به افزایش دما شده است. توزیع دما در بخش واگرای میکرونازل نوع دوم تقریباً شبیه به تراستر نوع اول می‌باشد.

نمودار توزیع سرعت نشان می‌دهد که سرعت در خروج از نازل برای میکروپیشران نوع دوم و سوم برابر بوده و بیش از میکروتراستر نوع اول است. بنابراین با افزایش دمای جریان، سرعت جریان خروجی از نازل افزایش یافته است.

نمودار توزیع عدد ماخ نشان می‌دهد که عدد ماخ جریان خروجی از میکرونازل نوع دوم بیش از نوع سوم است. این مساله با توجه به برابر بودن سرعت‌های خروجی از نازل، برای میکروتراستر نوع دوم و سوم و از طرفی بیشتر بودن دمای جریان در نازل خروجی میکروتراستر نوع سوم قابل انتظار است.

### 5-5- مقایسه پارامترهای عملکردی میکروپیشران نوع اول، دوم

#### و سوم

در این بخش، نیروی پیشران، ضربه مخصوص، سرعت گازهای خروجی و دبی جرمی برای سه نوع میکروتراستر مقایسه می‌شود. مقدار نیروی پیشران برابر با مجموع نیروی تراست در هر سلول در خروج از نازل در نظر

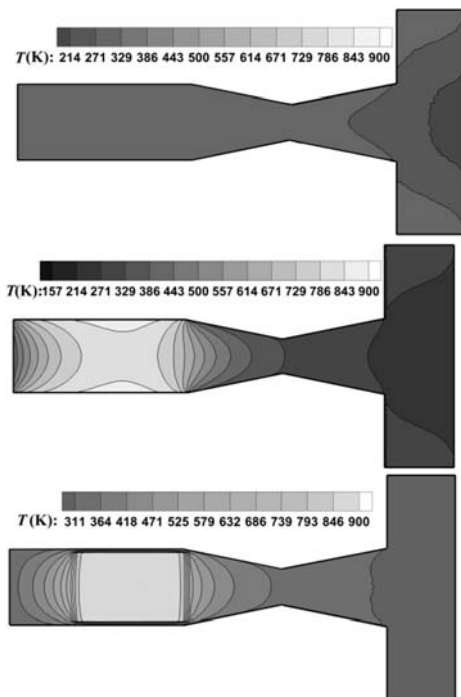


Fig. 17 Temperature contours of three types of microthrusters

شکل 17 کانتورهای دمای سه نوع میکروتراستر

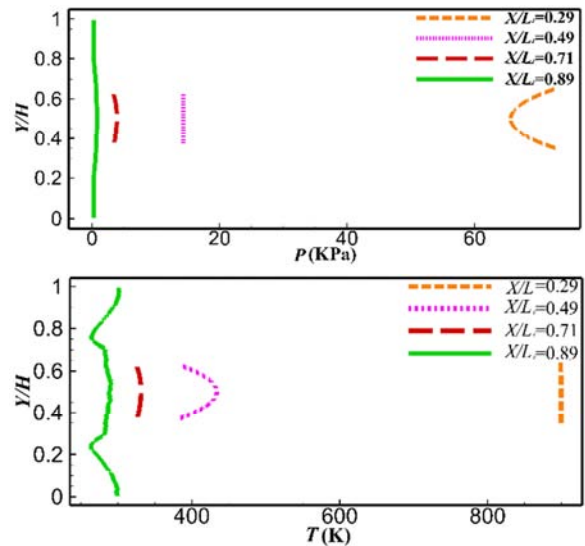


Fig. 14 Pressure and temperature distribution at different sections of microthruster type 3

شکل 14 مقادیر فشار و دما در مقاطع مختلف میکروتراستر نوع سوم

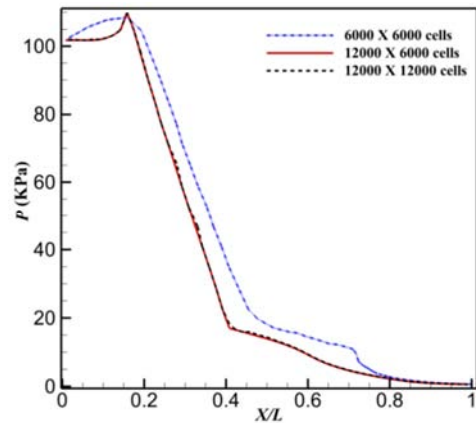


Fig. 15 Pressure distribution along the centerline for three different grids

شکل 15 توزیع فشار در راستای خط میانی میکروتراستر نوع سوم به ازای سه شبکه مختلف

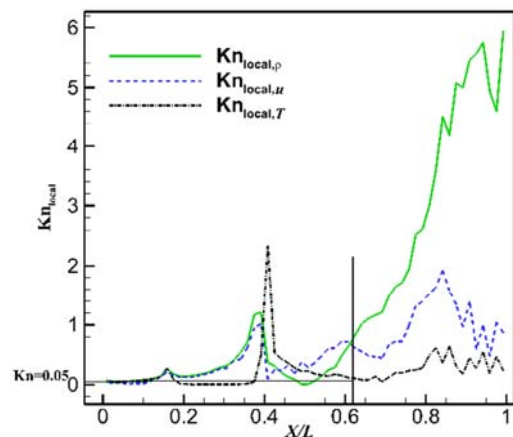


Fig. 16 Local Knudsen along centerline (microthruster type 3)

شکل 16 توزیع نادسن موضعی خط میانی کانال (میکروپیشران نوع سوم)

نمودارهای شکل 18 اثرات استفاده از دیواره‌ها و صفحات پیش گرم را بر

مرزی بیان شده برای این وسیله ثابت نگه داشته شده و تنها دمای دیواره‌ها از 500 کلون تا 1500 کلون تغییر داده می‌شود. به منظور آنالیز حساسیت پارامترهای عملکردی، ضرایب حساسیت به صورت زیر تعریف می‌شوند [27]:

$$\zeta = \frac{T - T_{\min}}{T_{\min}} \quad (a-20)$$

$$I_{sp,T} = \frac{\left(\frac{\Delta I_{sp}}{I_{sp,\min}}\right)}{\left(\frac{\Delta T}{T_{\min}}\right)} \quad \& \quad F_T = \frac{\left(\frac{\Delta F}{F_{\min}}\right)}{\left(\frac{\Delta T}{T_{\min}}\right)} \quad (b-20)$$

جدول 5 اثرات افزایش دمای دیواره بر نیروی پیشران، ضربه مخصوص و بر ضرایب حساسیت را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش دما، نیروی پیشران و ضربه مخصوص افزایش می‌یابند اما مقادیر  $I_{sp,T}$  و  $F_T$  کاهش می‌یابند. بنابراین حساسیت نیروی پیشران با افزایش دمای دیواره کاهش می‌یابد. این مساله بدین معنی است که نرخ کاهش دبی جرمی بیش از نرخ افزایش سرعت خروجی در اثر افزایش دمای دیواره‌ها است. حساسیت ضربه مخصوص با افزایش دمای دیواره‌ها نیز کاهش می‌یابد. این امر نشان می‌دهد که نرخ افزایش نیروی پیشران کمتر از نرخ کاهش دبی جرمی جریان در اثر افزایش دمای دیواره‌ها است.

جدول 4 مقایسه عملکرد سه نوع میکروپیشران

Table 4 Performance comparison of three types of microthrusters

نوع میکروتراستر	دبی جرمی (g s <sup>-1</sup> )	سرعت خروجی (m s <sup>-1</sup> )	تراست (mN)	ضربه مخصوص (s)
نوع 1	12.3	980	11.1	106.7
نوع 2	11.8	1310	14.7	144.7
نوع 3	7.4	1290	7.1	121.3

گرفته می‌شود. مقدار تراست نیز توسط رابطه  $F = \dot{m}V_e$  [5] و ضربه مخصوص توسط رابطه  $I_{sp} = F/(\dot{m}g)$  محاسبه می‌شود.

در جدول 4 عملکرد میکروتراستر گاز سرد (نوع اول)، میکروتراستر با دیواره‌های پیش‌گرم (نوع دوم) و میکروپیشران با صفحات پیش‌گرم (نوع سوم) با یکدیگر مقایسه شده است. مشاهده می‌شود که نیروی پیشران و ضربه مخصوص میکروتراستر نوع دوم نسبت به تراستر نوع اول و سوم بیشتر است. بنابراین با افزایش دمای دیواره‌ها می‌توان تراست و ضربه مخصوص را افزایش داد. کمترین میزان تراست برای پیشران نوع سوم اتفاق می‌افتد. در این حالت اثرات اصطکاک سطوح پیش‌گرم از اثرات انبساطی گاز بیشتر شده و موجب تقلیل نیروی پیشران می‌شود. بنابراین اثرات اصطکاک سطوح پیش‌گرم باعث کاهش میزان تراست می‌شود. ملاحظه می‌شود که مقدار دبی جرمی در تراستر نوع سوم به دلیل وجود صفحات داخل تراستر کاهش یافته است.

در میکروتراستر نوع دوم دمای جریان افزایش می‌یابد و سرعت خروجی از میکرونازل نیز زیاد می‌شود اما در میکروپیشران نوع سوم اگرچه صفحات پیش‌گرم موجب افزایش سرعت جریان خروجی از میکرونازل می‌شوند اما اثرات اصطکاک سطوح داخل میدان باعث کاهش دبی جرمی و نیروی پیشران این وسیله می‌شوند.

#### 5-6- آنالیز حساسیت میکروپیشران نوع دوم

از آنجا که پارامترهای عملکردی نوع دوم از سه سیستم میکروپیشران پیش‌گفته، بالاتر از بقیه است، لذا این سیستم برای انجام مطالعات آنالیز حساسیت انتخاب می‌شود. در این بخش اثرات افزایش دما بر پارامترهای عملکردی این وسیله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این حالت تمام شرایط

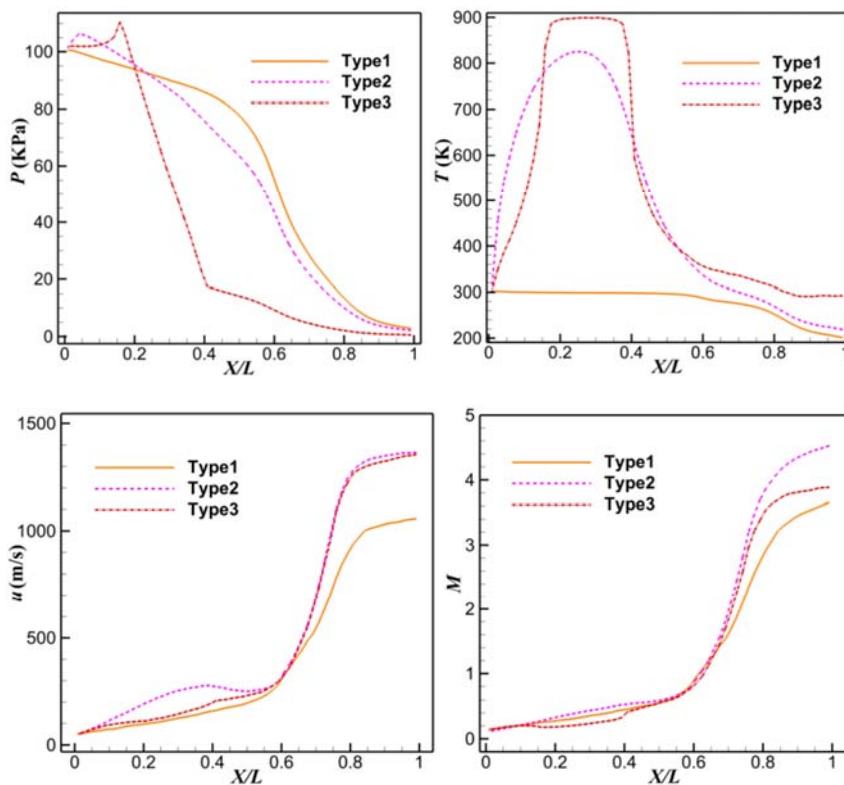


Fig. 18 Distribution of different flow properties along the centerline for three types of microthrusters

شکل 18 توزیع ویژگی‌های جریان در راستای خط میانی برای سه نوع میکروتراستر

$V_c$	حجم سلول ( $m^3$ )
$V_{mp}$	سرعت مولکولی محتمل ( $ms^{-1}$ )
$v$	سرعت در راستای محور عرضی ( $ms^{-1}$ )
$w$	سرعت در راستای عمق ( $ms^{-1}$ )
<b>علایم یونانی</b>	
$\varepsilon$	زاویه برخورد
$\theta$	زاویه برخاست
$\lambda$	طول پویای آزاد مولکولی (m)
$\zeta$	تغییرات بی‌بعد شده دما
$\sigma$	سطح مقطع برخورد مولکولی ( $m^2$ )
$\chi$	زاویه انحراف
<b>بالانویس‌ها</b>	
*	شرایط پس از برخورد
<b>زیرنویس‌ها</b>	
$e$	خروجی
$in$	ورودی

**8- مراجع**

- [1] M. Gad-el-Hak, *MEMS: Introduction and Fundamentals*, pp. 1-4, USA: CRC Press, 2005.
- [2] M. Gad-el-Hak, *MEMS: Applications*, pp. 1-4, USA: CRC Press, 2005.
- [3] S. W. Janson, H. Helvajian, W. W. Hansen, J. Lodmell, Microthrusters for nanosatellites, *Second International Conference on Integrated Micro Nanotechnology for Space Applications*, Pasadena: Taylor & Francis, pp. 1-17, 1999.
- [4] R. Oslander, M. A. G. Darrin, J. L. Champion, *MEMS and microstructures in aerospace applications*, second edition, USA: CRC press, pp. 220-265, 2005.
- [5] D. Platt, A monopropellant milli-Newton thruster system for attitude control of nanosatellites, *AIAA/USU conference on Small Satellites*, Utah: AIAA, pp. 1-6, 2002.
- [6] M. W. Milligan, Nozzle characteristics in the transition regime between continuum and free molecular flow, *AIAA Journal*, Vol. 2, No. 6, pp. 1088-1092, 1964.
- [7] D. E. Rothe, Electron-beam studies of viscous flow in supersonic nozzles, *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 804-811, 1971.
- [8] W. J. Rae, Some numerical results on viscous low-density nozzle flows in the slender-channel approximation, *AIAA Journal*, Vol. 9, No. 5, pp. 811-820, 1971.
- [9] I. D. Boyd, P. F. Penko, D. L. Meissner, K. J. DeWitt, Experimental and numerical investigations of low-density nozzle and plume flows of nitrogen, *AIAA journal*, Vol. 30, No. 10, pp. 2453-2461, 1992.
- [10] R. L. Bayt, *Analysis, fabrication and testing of a MEMS-based micropropulsion system*, PhD Thesis, Aerospace Computational Design Laboratory, Department of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [11] Y. Jafry, J. V. Beukelt, Investigation of nozzle and plume expansions of a small helium thruster, *Rarefied gas dynamics: Space science and engineering*, Vol. 160, No. 7, pp. 136-143, 1994.
- [12] M. Ivanov, G. Markelov, A. Ketsdever, D. Wadsworth, Numerical study of cold gas micronozzle flows, *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, U.S.A.: AIAA, pp. 1-12, 1999.
- [13] A. Alexeenko, D. Levin, S. Gimelshein, R. Collins, G. Markelov, Numerical simulation of high-temperature gas flows in a millimeter-scale thruster, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 16, No. 1, pp. 10-16, 2002.
- [14] C. Xie, Characteristics of micronozzle gas flows, *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 19, No. 3, pp. 87-102, 2007.
- [15] F. L. Torre, S. Kenjeres, C. R. Kleijn, J.-L. P. Moerel, Effects of wavy surface roughness on the performance of micronozzles, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 4, pp. 655-662, 2010.
- [16] Z.-X. Sun, Z.-Y. Li, Y.-L. He, W.-Q. Tao, Coupled solid (FVM)-fluid (DSMC) simulation of micro-nozzle with unstructured-grid, *Microfluidics and nanofluidics*, Vol. 7, No. 5, pp. 621-631, 2009.
- [17] M. Wang, Z. Li, Simulations for gas flows in microgeometries using the direct simulation Monte Carlo method, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, No. 6, pp. 975-985, 2004.
- [18] G. A. Bird, *Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows*, first edition, pp. 46-76, USA: Oxford Science Publications, 1994.
- [19] O. Ejtehad, E. Roohi, J. A. Esfahani, Detailed investigation of hydrodynamics and thermal behavior of nano/micro shear driven flow using DSMC, *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 1228, 2013.

**جدول 5** تغییرات ضرایب حساسیت با تغییر دمای دیواره**Table 5** Sensitivity coefficients variations due to wall heating

$I_{sp,T}$	$F_T$	ضربه مخصوص (s)	تراست (mN)	$\zeta$	دمای دیواره (K)
0.67	0.220	111	12.73	0.67	500
0.41	0.165	132	13.95	1.33	700
0.25	0.101	144.7	14.7	2	900
0.18	0.101	154	15.45	2.67	1100
0.14	0.054	161	15.85	3.33	1300
0.12	0.047	167	16.2	4	1500

**6- نتیجه گیری**

در پژوهش حاضر، یک حلگر دی‌اس‌ام‌سی توسعه یافت که دارای ویژگی اصلاح شبکه زیرسلولی به منظور انتخاب دقیق و سریع جفت ذره برخوردی است. حلگر، گام زمانی متغیر برای هرسلول (به منظور مجزا نمودن برخورد و حرکت آزاد ذره) در نظر می‌گیرد و با در نظرگیری یک گام زمانی کلی مشتقات زمانی متغیرها محاسبه می‌شود. با استفاده از حلگر، سه نوع میکروتراستر شبیه‌سازی می‌شود: یک میکروتراستر گاز سرد (نوع اول)، یک میکروتراستر با دیواره‌های پیش‌گرم (نوع دوم)، و یک تراستر با صفحات پیش‌گرم در داخل آن (نوع سوم). با افزایش دمای سیال، در صورت افزایش دمای دیواره‌ها و یا با جایگذاری صفحات پیش‌گرم در داخل میدان، سرعت گازهای خروجی تراستر زیاد شد. جایگذاری صفحات پیش‌گرم در داخل تراستر باعث افزایش نیروهای اصطکاکی شد و افت فشار جریان را در عبور جریان از روی صفحات به طرز قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. افزایش اتلافات در میکروتراستر نوع سوم به صورت تبدیل به افزایش دمای سیال در پایین دست جریان و در خروجی میکروتراستر نمودار شد. در میکروپیشران نوع سوم دبی جرمی کاهش یافت. مشاهده شد که میکروتراستر نوع دوم نسبت به نوع سوم و اول نیروی پیشران و ضربه مخصوص بالاتری تولید می‌کند. در واقع میکروتراستر نوع دوم از مزیت‌های افزایش دمای جریان در راستای بهبود پارامترهای عملکردی بهره می‌برد اما در نوع سوم، صفحات داخل میدان اثرات اصطکاکی را افزایش داده و منجر به کاهش نیروی پیشران می‌شوند. در میکروپیشران نوع دوم با افزایش دمای دیواره‌ها حساسیت نیروی پیشران و ضربه مخصوص به افزایش دما کاهش یافت و به ازای هر مرحله افزایش دمای دیواره، نرخ کاهش دبی جرمی بیش از نرخ افزایش سرعت گردید.

**7- فهرست علایم**

$c$	سرعت مولکولی ( $ms^{-1}$ )
$c_r$	سرعت مولکولی نسبی ( $ms^{-1}$ )
$d$	قطر مولکولی (m)
$F$	نیروی پیشران (N)
$F_T$	ضریب حساسیت نیروی پیشران
$I_{sp}$	ضربه مخصوص (s)
$I_{sp,T}$	ضریب حساسیت ضربه مخصوص
$Kn$	نیروی پیشران (N)
$n$	چگالی عددی
$R_f$	مقداری تصادفی بین صفر و یک
$s$	نسبت سرعت مولکولی
$t$	زمان (s)
$u$	سرعت در راستای محور طولی ( $ms^{-1}$ )

- [24] D. L. Hitt, C. M. Zakrzewski, M. A. Thomas, MEMS-based satellite micropropulsion via catalyzed hydrogen peroxide decomposition, *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 6, pp. 1163, 2001.
- [25] J. Wu, W. Lee, F. Lee, S. Wong, Pressure boundary treatment in internal gas flows at subsonic speed using the DSMC method, *Rarefied Gas Dynamics: 22nd International Symposium*, USA: AIP, pp. 408-416, 2001.
- [26] I. D. Boyd, G. Chen, G. V. Candler, Predicting failure of the continuum fluid equations in transitional hypersonic flows, *Physics of Fluids (1994-present)*, Vol. 7, No. 1, pp. 210-219, 1995.
- [27] O. Baysal, M. E. Eleshaky, Aerodynamic design optimization using sensitivity analysis and computational fluid dynamics, *AIAA journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 718-725, 1992.
- [20] E. Roohi, M. Darbandi, Recommendations on performance of parallel DSMC algorithm in solving subsonic nanoflows, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 36, No. 5, pp. 2314-2321, 2012.
- [21] F. Yan, B. Farouk, Numerical simulation of gas flow and mixing in a microchannel using the direct simulation Monte Carlo method, *Microscale Thermophysical Engineering*, Vol. 6, No. 3, pp. 235-251, 2002.
- [22] W. Y. Lee, M. Wong, Y. Zohar, Flow separation in constriction microchannels, *Proceeding IEEE MEMS*, Beijing: IEEE, pp. 495-498, 2001.
- [23] P. Kundu, A. K. Sinha, T. K. Bhattacharyya, S. Das, Nanowire Embedded Hydrogen Peroxide Monopropellant MEMS Thruster, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 406-417, 2013.