



## بررسی اثر زبری مثلثی بر جریان خزش حرارتی درون نودسن پمپ‌ها به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو

نادیا میرنژاد<sup>۱</sup> و علی امیری جاغرق<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

### چکیده

در این مطالعه اثر زبری دیواره بر پارامترهای جریان درون نودسن پمپ‌ها، با استفاده از روش ذره-مینای شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو بررسی شده است. به این منظور با اعمال شیب دمایی خطی بر دیواره‌های یک میکروکانال، جریان خزش حرارتی حاصله در گستره وسیعی از عدد نودسن ( $0.1 \leq Kn \leq 10$ ) حل شده است. زبری به صورت زائده‌هایی مثلثی شکل روی دیواره مدل‌سازی شده است. مطالعه جامعی روی پارامترهای تعیین‌کننده هندسه زبری صورت پذیرفته است که شامل، ارتفاع زبری ( $0 \leq \varepsilon \leq 10$ )، نسبت منطری زبری ( $1 \leq \xi \leq 3$ ) و گام زبری ( $1 \leq \chi \leq 5$ ) می‌شود. بررسی نتایج گویای آن است که دبی جرمی جریان خزش حرارتی در کانال‌های زبر، هر قدر هم که زبری کوچک باشد، کاهش قابل توجهی نسبت به کانال صاف دارد؛ به نحوی که برای زبری نسبی  $\varepsilon = 1.25$  کاهش ۲۶ درصدی دبی جرمی در مقایسه با کانال صاف مشاهده می‌شود؛ همچنین ملاحظه شد، نسبت منطری و فاصله المان‌های زبری، در محدوده مطالعه شده، تاثیر قابل توجهی بر پارامترهای جریان ندارند.

**کلمات کلیدی:** زبری مثلثی؛ جریان خزش حرارتی؛ شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو؛ جریان رقیق‌شده؛ نودسن پمپ.

## The Study of the Effects of Triangular Roughness on The thermal Creep Flow in Knudsen Pumps with DSMC Method

N. Mirnezhad<sup>1</sup>, A. Amiri-Jaghargh<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> MSc., Department of Mechanical Engineering, Razi University, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Razi University, Iran.

### Abstract

In this study, the effects of wall roughness on the flow parameters in Knudsen pumps are investigated using the particle-based direct simulation Monte Carlo method. For this purpose, the thermal creep flow in a microchannel with a linear temperature gradient on the walls is solved in a wide range of Knudsen numbers ( $0.1 \leq Kn \leq 10$ ). The roughness is modeled as triangular elements on the walls. A comprehensive study is done on the geometrical parameters of the roughness, including height ( $0 \leq \varepsilon \leq 10$ ), aspect ratio ( $1 \leq \xi \leq 3$ ), and the distance of the elements ( $1 \leq \chi \leq 5$ ). Evaluation of the results indicates that the mass flow rate of the thermal creep flow in rough channels, no matter how small the roughness, has a significant reduction compared to the smooth channel. For example, a reduction of 26% is observed for a tinny roughness of  $\varepsilon = 1.25\%$ . It is also observed that the aspect ratio and the distance of the rough elements do not have a significant effect on the flow parameters in the studied range.

**Keywords:** Triangular Roughness; Thermal Creep Flow; Direct Simulation Monte Carlo (DSMC); Rarefied Flow; Knudsen Pump.

## ۱- مقدمه

در دینامیک گازهای رقیق میدان دما نقش قابل توجهی در ایجاد جریان دارد. یکی از جریان‌هایی که به دلیل گرادیان دما ایجاد می‌شود، جریان خزش حرارتی است. در حضور گرادیان دما روی دیواره، جریان سیال در لایه مجاور دیواره از ناحیه سرد به طرف ناحیه گرم برقرار می‌شود که به آن پدیده خزش حرارتی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. هر چند این پدیده در تمام رژیم‌های جریانی حضور دارد، اما تنها در جریان‌های رقیق شده اهمیت پیدا می‌کند [۱].

پدیده خزش حرارتی منشا طراحی دسته‌ای از پمپ‌های حرارتی گازی به نام نودسن پمپ<sup>۲</sup> بوده است. نودسن پمپ شامل، یک یا چند میکروکانال است که یک گرادیان دما در طول آن اعمال شده است و بدون حضور بخش متحرک، یک جریان محوری ایجاد می‌کند. این پمپ‌ها قابلیت انجام بیش از ۱۰<sup>۴</sup> ساعت کار مداوم را بدون نیاز به تعمیر دارند [۲]. نودسن پمپ‌ها دارای کاربردهای فراوانی هستند. استفاده از آن‌ها در سیستم کروماتوگرافی گازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای زمان تحلیل، تجزیه و جداسازی نمونه را کوتاه‌تر می‌کند [۳]. این پمپ‌ها با استفاده از گرمای بدن در سیستم‌های تزریق پیوسته دارو به کار گرفته می‌شوند [۴]. در این کاربرد، نودسن پمپ با افزایش فشار هوای وارد بر کیسه دارو، باعث آزادسازی تدریجی آن در ناحیه آسیب‌دیده می‌شود. در صنعت خلا، نودسن پمپ‌ها کارایی بالایی دارند؛ چرا که برخلاف پمپ‌های مکانیکی که در فشارهای خیلی پایین کارایی آن‌ها کاهش می‌یابد، این پمپ‌ها در نقطه قوت خود هستند، زیرا آثار خزش حرارتی در این شرایط شدیدتر است [۵]. طرح استفاده از نودسن کمپرسورها/پمپ‌ها به‌عنوان پمپ حرارتی در سال‌های اخیر ارائه شده است [۶]. در این کاربرد نودسن پمپ جایگزین کمپرسور در چرخه تبرید تراکمی شده و با استفاده از تلفات انرژی سیستم، حرارت را از محیط سرد به محیط گرم منتقل می‌کند.

با توجه به کاربردهای گسترده و متنوع نودسن پمپ‌ها، مطالعات زیادی برای بهبود عملکرد این میکروابزار انجام شده است. وارگو و مونتر [۷]، برای نخستین بار نودسن پمپی را

ساختند که در فشار اتمسفر کار می‌کرد و می‌توانست اختلاف فشاری معادل ۱٫۵ kPa ایجاد کند. گوپتا و جیانچندانی [۸]، با استفاده از یک ماده زئولیت طبیعی به نام کلینوپتیلولیت<sup>۳</sup> نودسن پمپی را ساختند که با توجه به نانومفذهای موجود در آن قادر به ایجاد جریان آزاد مولکولی حتی در فشار اتمسفر بود. آن‌ها نشان دادند، یک صفحه زئولیت با ضخامت ۲٫۳mm، جریان حجمی (cc/(min.cm<sup>2</sup>)) ۱۰ × ۶۶ را با قدرت ورودی حدود ۳۰۰ mW/cm<sup>2</sup> ایجاد می‌کند. گوپتا و جیانچندانی [۹]، همچنین برای اولین بار ایده ساخت نودسن پمپ‌های چند مرحله‌ای را ارائه دادند. آن‌ها یک نودسن پمپ ۹ مرحله‌ای را از نانو سرامیک متخلخل ساختند. این نودسن پمپ قادر به ایجاد حداکثر گرادیان فشار ۱۲ kPa و دبی حجمی ۳٫۶۸ μL/min در فشار ۱۶۰ Pa شد. اولین نودسن پمپ مبتنی بر ماده ترموالکتریک و نانو ذرات استرسولوز توسط فاراس و مک نامارا [۱۰] ساخته شد. این پمپ که متشکل از مواد متخلخل با اندازه منافذ ۱۰۰nm بود، حداکثر فشار ۱٫۶۹ kPa و دبی جریان ۰٫۷۴ cm<sup>3</sup>/min را ایجاد می‌کرد. اوکی و همکاران [۱۱]، امکان ساخت نودسن پمپ را با استفاده از کانال‌های منحنی شکل مطرح کردند. آن‌ها با استفاده از روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو نشان دادند، یک کانال دوبعدی با هندسه مارپیچی، متشکل از بخش‌های مستقیم و نیمه متقاطع با اعمال توزیع دمای متناوب، عمل پمپاژ مؤثری را ایجاد می‌کند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیشتر این مطالعات تلاش‌های آزمایشگاهی برای ساخت نودسن پمپ‌هایی با کارایی بالاتر برای دستیابی به نسبت فشار و یا دبی جرمی بیشتر بوده است. این در حالی است که توپوگرافی سطح میکروکانال‌های بکار رفته در ساخت این پمپ‌ها می‌تواند تأثیر جدی بر عملکرد آن‌ها داشته باشد. به این منظور در ادامه مطالعات انجام شده در زمینه اثر زبری دیواره بر میکروجریان‌ها را مرور می‌کنیم.

هو و همکاران [۱۲]، یک مدل عددی سه‌بعدی را برای شبیه‌سازی جریان مایع تحت فشار در میکروکانال‌ها با عناصر زبری مربعی شکل و به دو صورت زبری متقارن و نامتقارن ارائه کردند. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف از جمله

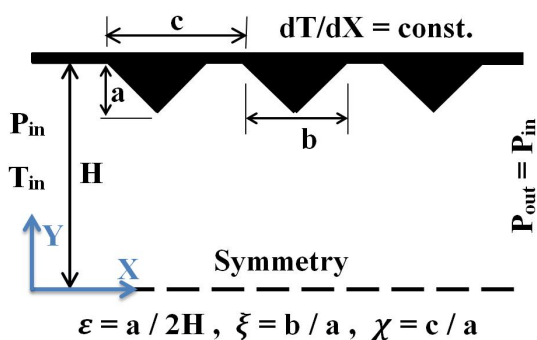
<sup>۱</sup> Thermal Creep<sup>۲</sup> Knudsen Pump<sup>۳</sup> Clinoptilolite

ارتفاع کانال، ارتفاع، اندازه و فاصله عناصر زبری بر نیمرخ سرعت و توزیع فشار بررسی شد. کلاینت‌ها بر وکوو [۱۳]، به‌طور عددی اثر زبری سطح را بر جریان مایع درون میکروکانال بررسی کردند. آن‌ها از یک لایه محیط متخلخل برای نشان دادن زبری سطح استفاده کردند. کائو و همکاران [۱۴]، به‌صورت عددی شکل‌های مختلف زبری با اندازه‌های زیر میکرون را در رژیم جریان لغزشی بررسی کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که ضریب اصطکاک نه تنها با کاهش عدد نودسن، بلکه با افزایش زبری سطح نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها متوجه شدند که اثرات زبری سطح و رقیق‌شدگی بر ضریب اصطکاک جریان‌های گازی در ابعاد میکرو به هم مرتبط هستند. رجیبی و ثقفیان [۱۵]، با حل جریان لغزشی آرام در حال توسعه بین دو صفحه موازی به روش بسط اختلالات، اثرات تلفات اصطکاک و زبری را بر انتقال حرارت و هیدرودینامیک جریان سیال بررسی کردند. زبری به صورت المان‌های مستطیلی در نظر گرفته شد. این مطالعه نشان داد، زبری باعث تغییر نیمرخ سرعت شده و منجر به افزایش عدد پوازیه و عدد ناسلت می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۶]، به شبیه‌سازی جریان گازی لغزشی در میکروکانال‌های زبر با استفاده از روش لیتیس-بولتزمن پرداختند. آنها اثرات ارتفاع زبری و عدد نودسن را بر عدد پوازیه و دبی جرمی جریان بررسی کرده و نشان دادند، وجود زبری باعث کاهش لغزش مرزی می‌شود. نوریان و همکاران [۱۷]، جریان پوازیه در یک نانوکanal زبر را به صورت عددی مطالعه کردند. زبری به صورت زائده‌هایی مثلثی و استوانه‌ای شکل روی دیواره پایینی کانال مدل شد. آن‌ها اثرات شکل هندسی، ارتفاع و دوره تناوب زبری‌ها در طول کانال را بر چگالی و نیمرخ سرعت بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش نسبت زبری سطح (نسبت ارتفاع به پایه)، سبب کاهش سرعت لغزشی و حداکثر سرعت در مرکز کانال و افزایش نوسانات چگالی در لایه سیال نزدیک به دیواره می‌شود. روونسکا یا و کروچه [۱۸]، به صورت عددی میدان جریان را در یک میکروکانال زبر با جفت کردن دینامیکی معادلات جنبشی و ناویر-استوکس بررسی کردند. سطح کانال با عناصر مثلثی با حداکثر ارتفاع زبری ۵٪ پیکربندی شده بود. اثرات عدد ماخ، عدد نودسن و ارتفاع زبری بر عدد پوازیه و دبی جرمی جریان بحث و بررسی شد. نتایج نشان داد که زبری باعث افزایش عدد پوازیه و کاهش

جریان جرم در مقایسه با کانال صاف می‌شود؛ همچنین افزایش رقیق‌شدگی جریان موجب تشدید اثر زبری می‌شود. جیا و همکاران [۱۹]، اثر زبری سطح را بر عملکرد جریان و انتقال حرارت در جریان‌های رینولدز پایین درون میکروکانال‌ها بررسی کردند. در این مطالعه زبری سطح با ساختار هندسی فراکتال دوبعدی توصیف شده، اثر زبری نسبی، ابعاد فراکتال و نسبت ابعاد بر مقاومت در مقابل جریان و انتقال حرارت بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب مقادیر بزرگ نسبت ابعاد، عملکرد جریان و انتقال حرارت بهبود می‌یابد. با این حال، افزایش زبری سطح، در عین حال که عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد، باعث افزایش مقاومت جریان و ضریب اصطکاک می‌شود. یاماموتو و همکاران [۲۰]، با حل معادلات خطی‌شده BGK، جریان‌های فشار-محرك و خزش حرارتی را بین دو صفحه موازی بررسی کردند که روی دیواره آن‌ها شیارهایی مستطیلی به موازات و یا عمود بر جهت جریان حفر شده بود. آن‌ها نشان دادند، وجود شیار روی دیواره حتی وقتی عمق شیار بسیار کوچک باشد، باعث کاهش قابل توجه دبی جرمی جریان می‌شود. دسته‌ای از مطالعات به بررسی جریان رادیومتریک پرداخته‌اند. بایر و همکاران [۲۱]، با الهام از رادیومتر کروکس<sup>۱</sup>، پره‌هایی در وسط یک کانال قرار داده و نشان دادند، در صورت اختلاف دما بین دیواره کانال و پره، جریان در طول کانال القاء می‌شود. پره‌ها به صورت صفحاتی قائم بودند که یک سمت آن‌ها دارای خاصیت انعکاس نفوذی (دیفیوز) و سمت دیگر آن‌ها انعکاس آینه‌ای داشت. شهابی و همکاران [۲۲]، جریان القاء شده توسط حرارت بواسطه حضور موانعی مثلثی شکل را بررسی کردند که یک وجه مانع انعکاس نفوذی و وجه دیگر آن انعکاس آینه‌ای داشت. در این مطالعه اثر ضریب انطباق و پارامترهای هندسی موانع بر عملکرد نودسن پمپ به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو بررسی شده است. لطفیان و روحی [۲۳]، جریان رقیق شده در پمپ‌های رادیومتریک را برای ۷ ساختار مختلف، به روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند، کانال با دیواره‌های زیگزاگی بیشترین سرعت جریان را القاء می‌کند و نیمرخ سرعت سهموی شکل است.

<sup>1</sup> Crookes Radiometer

المان‌هایی مثلثی شکل روی دیوارها مدل‌سازی شده است. شکل ۱ نمای کلی کانال، پارامترهای زبری و شرایط مرزی اعمال شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱- شماتیک جریان و شرایط مرزی اعمال شده

فشار ورودی بر اساس عدد نودسن ورودی محاسبه می‌شود. فشار خروجی برابر فشار ورودی در نظر گرفته شده است تا تنها عامل ایجاد جریان، گرادیان دمای روی دیواره باشد. دمای دیواره بصورت خطی از  $300\text{K}$  در ورودی تا  $400\text{K}$  در خروجی تغییر می‌کند. دمای گاز ورودی که نیتروژن دو اتمی است، برابر  $300\text{K}$  تنظیم شده است. با توجه به تقارن کانال و شرایط مرزی، تنها نیمه بالایی کانال شبیه‌سازی شده و در مرز پایینی شرط تقارن اعمال شده است. مطابق شکل ۱ پارامترهای زبری  $a$ ،  $b$  و  $c$  هستند که به ترتیب نماینده ارتفاع، طول و گام زبری می‌باشند. شکل بی‌بعد این پارامترها به صورت زبری نسبی،  $\varepsilon = a/2H$ ، نسبت منطری زبری،  $\xi = b/a$ ، و فاصله نسبی زبری (به اختصار فاصله زبری)،  $\chi = c/a$ ، تعریف شده است. برای بررسی اثر زبری دیواره بر جریان، تغییرات این پارامترها در گستره وسیع  $0 \leq \varepsilon \leq 10$ ،  $1 \leq \xi \leq 3$  و  $1 \leq \chi \leq 5$  مطالعه شده است.

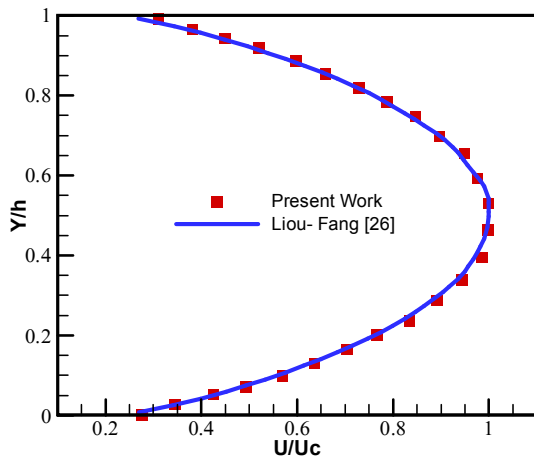
### ۳- روش عددی

روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو (DSMC) برای حل جریان حرارت-محرك درون نودسن پمپ استفاده شده است. این روش پایه مولکولی دارد و در آن حرکت ذرات دنبال می‌شود؛ هر ذره نماینده تعداد زیادی از مولکول‌ها است. ویژگی اصلی این روش، این است که برهمکنش ذرات را به

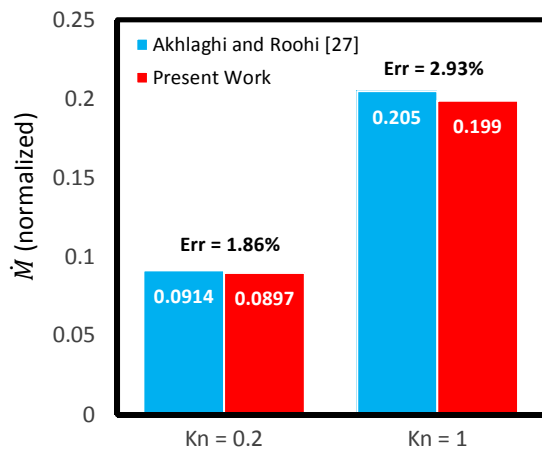
بررسی مقالات در دسترس نشان می‌دهد، بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه زبری در میکروکانال‌ها، محدود به جریان‌های فشار-محرك است. این مطالعات به خوبی نشان می‌دهند، وجود زبری در جریان رقیق شده فشار-محرك، یک مقاومت در برابر جریان ایجاد می‌کند و باعث افزایش ضریب اصطکاک و به دنبال آن کاهش دبی جرمی جریان می‌شود. این در حالی است که جریان در نودسن پمپ‌ها، حرارت-محرك بوده و در اثر پدیده خزش حرارتی و با حرکت گاز مجاور به دیواره برقرار می‌شود. با توجه به تفاوت جدی منشأ جریان، این سوال مطرح است که آیا زبری در نودسن پمپ‌ها نیز همانند یک مقاومت در مقابل جریان عمل می‌کند؛ یا بعکس، وجود زبری باعث انتقال بهتر اثرات دمایی به سیال و در نتیجه بهبود عملکرد هیدرودینامیکی جریان می‌شود. مطابق بهترین بررسی نویسندگان، مطالعات بسیار محدودی در زمینه اثر زبری بر جریان‌های ناشی از خزش حرارتی انجام شده است. در اندک مطالعات موجود مانند مرجع [۲۰] نیز اثر شیارهای (و نه المان زبری) مستطیلی شکل، آن هم به طور محدود، بررسی شده است؛ در حالی که زبری در حالت عمومی بیشتر به شکل زائیده‌های مثلثی شکل دیده می‌شود؛ بنابراین در مطالعه حاضر به بررسی اثرات زبری دیواره در جریان خزش حرارتی بر مشخصه‌های جریان و بویژه دبی جرمی پرداخته شده است. زبری به صورت زائیده‌های مثلثی شکل روی دیواره مدل‌سازی شده و جریان با استفاده از روش ذره-مبنای شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو حل شده است. این روش علاوه بر این که امکان بررسی رژیم‌های جریان گذار و آزاد مولکولی را فراهم می‌کند، از خطاهای مربوط به مدل‌سازی خزش حرارتی به عنوان یک شرط مرزی در روش‌های مبتنی بر پیوستگی، مبرا است.

### ۲- هندسه جریان

نودسن پمپ از میکروکانال‌هایی با دو انتهای سرد و گرم تشکیل شده است. برای تحلیل جریان در نودسن پمپ، می‌توان یکی از این میکروکانال‌ها را در نظر گرفت که شیب دما در امتداد دیواره آن اعمال شده است. در این مطالعه جریان خزش حرارتی درون میکروکانال‌های صفحه‌ای با ابعاد  $1/2 \times 0/2$  میکرومتر بررسی شده است که زبری به صورت



شکل ۲- مقایسه نیمرخ سرعت با نتایج لیو و فنگ [۲۶]



شکل ۳- مقایسه مقادیر دبی جرمی نرمال شده با نتایج اخلاقی و روحی [۲۷]

پس از اطمینان از درستی عملکرد کد محاسباتی و حلگر مورد استفاده، در ادامه استقلال نتایج از پارامترهای روش DSMC بررسی می‌شود. به این منظور، جریان خزش حرارتی درون یک میکروکانال دوبعدی به ابعاد  $1.2 \times 0.2 \mu m$  حل شده است. گاز نیتروژن با دمای  $300 K$  در عدد نودسن  $0.25$  وارد کانال می‌شود. دمای دیواره کانال با شیب ثابت از  $300 K$  تا  $400 K$  تغییر می‌کند. یکی از مهمترین پارامترهای روش DSMC که بر دقت نتایج تاثیر می‌گذارد، تعداد سلول‌های شبکه محاسباتی است. الکساندر و همکاران [۲۸] نشان دادند، در شبکه‌های درشت، محاسبه ضریب لزجت با  $1.5\%$  خطا همراه است، در حالی که با کاهش ابعاد شبکه به  $\Delta x \cong \lambda/3$

دو بخش حرکت و برخورد تفکیک می‌کند. در طی هر گام زمانی، ذرات بر اساس قانون دوم نیوتن حرکت می‌کنند. سپس برخورد ذرات صرفاً با تغییر بردار سرعت آن‌ها مدل می‌شود. فرض بر این است که این برخورد تنها بین جفت ذرات اتفاق می‌افتد که این فرض برای گازهای رقیق به اندازه کافی دقیق است. جزئیات روش DSMC در مراجع [۲۴-۲۵] توضیح داده شده است. برای حل مسئله از حل‌گر dsmcFoamStrath استفاده شده است که یک نسخه بهبود یافته برای اعمال روش DSMC در محیط OpenFOAM است. در این حل‌گر از مدل کره سخت متغیر<sup>۱</sup> برای مدل‌سازی برخوردهای دوتایی و از مدل شمارنده بدون زمان<sup>۲</sup> برای انتخاب جفت برخوردی استفاده می‌شود.

### ۳-۱- اعتبارسنجی و صحت‌سنجی

برای اطمینان از درستی عملکرد حلگر dsmcFoamStrath، جریان پوزیه گاز نیتروژن در نودسن  $Kn = 0.078$  درون یک میکروکانال صفحه‌ای با ابعاد  $2 \times 0.4 \mu m$  حل و با نتایج لیو و فنگ [۲۶] مقایسه شده است. دمای دیواره و سیال  $300 K$  و نسبت فشار ورودی به خروجی  $2.5$  است. شکل ۲ نیمرخ سرعت بی‌بعد شده را نشان می‌دهد. بیشینه اختلاف میان نتایج موجود و حل لیو و فنگ برابر با  $1.9\%$  درصد است که نشان از دقت قابل قبول حلگر عددی دارد.

برای اطمینان از اعتبار حلگر در شبیه‌سازی جریان خزش حرارتی، جریان درون یک میکروکانال صفحه‌ای به ابعاد  $1.2 \times 0.2 \mu m$  حل و با نتایج اخلاقی و روحی [۲۷] مقایسه شده است. دمای گاز نیتروژن در ورودی کانال  $300 K$  بوده و دمای دیواره از  $300 K$  در ورودی با شیب ثابت تا  $360 K$  در خروجی تغییر می‌کند.

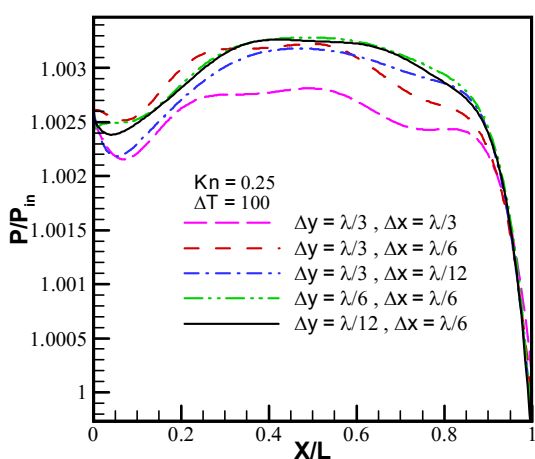
شکل ۳ مقادیر دبی جرمی نرمال شده را نشان می‌دهد. اختلاف نتایج در اعداد نودسن اصلاح شده  $0.2$  و  $1$  به ترتیب برابر  $1.86\%$  و  $2.93\%$  است که گویای دقت قابل قبول نتایج حلگر است.

<sup>1</sup> Variable Hard Sphere (VHS)

<sup>2</sup> No Time Counter (NTC)

#### ۴- نتایج و بحث در آنها

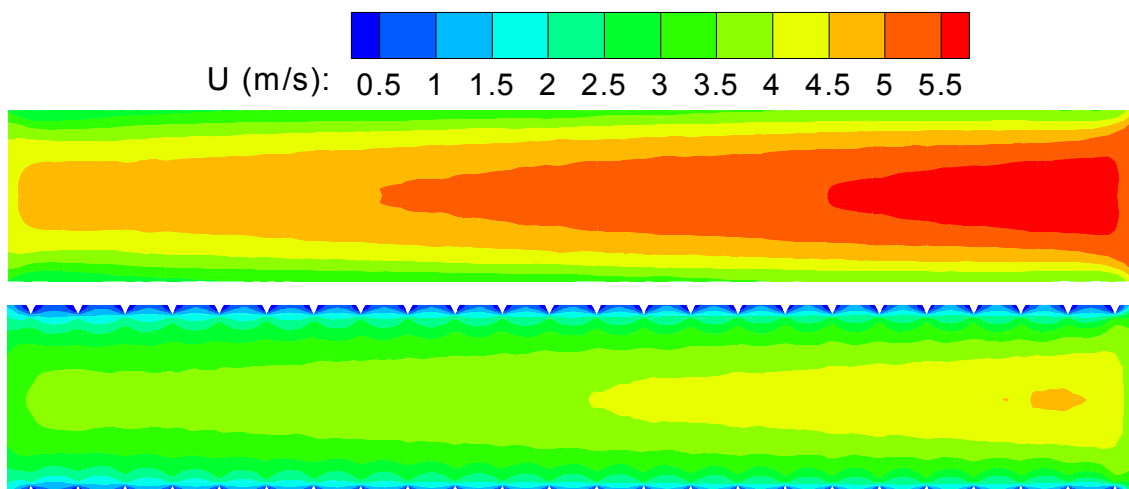
برای مطالعه اثر زبری دیواره‌ها بر عملکرد نودسن پمپ، همان‌گونه که در بخش ۲ گفته شد، المان‌های مثلثی شکل روی دیواره کانال تعبیه شده است. کانتورهای میدان سرعت در میکروکانال‌های صاف و زبر با مشخصات  $\chi = 5$ ،  $\xi = 1$  و  $\varepsilon = 5\%$  برای  $Kn = 1$  در شکل ۵ نمایش داده شده است. با افزایش دما در طول جریان چگالی کاهش می‌یابد؛ در نتیجه برای حفظ دبی جرمی، با پیشروی در طول کانال سرعت محوری افزایش می‌یابد؛ همچنین شکل ۵ نشان می‌دهد،



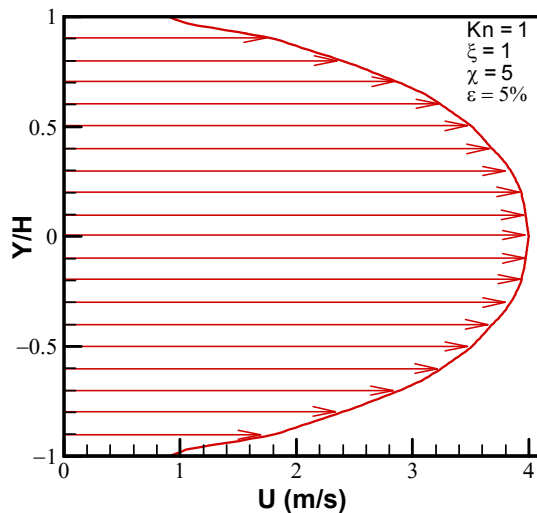
شکل ۴- تغییرات فشار بی‌بعد شده در طول کانال روی خط  $Y/H = 0.75$  برای شبکه‌های مختلف

خطا به ۱٪ کاهش می‌یابد؛ بنابراین در بررسی شبکه، از سلول‌هایی با ابعاد  $\Delta x = \lambda/3$ ،  $\Delta y = \lambda/3$  شروع کرده و برای اطمینان از عدم تأثیر ابعاد شبکه بر نتایج، شبکه‌های ریزتری نیز بررسی شد. شکل ۴ تغییرات فشار را در طول کانال و روی خط  $Y/H = 0.75$  برای شبکه‌های مختلف نشان می‌دهد. مطابق این شکل تغییرات فشار برای شبکه  $\Delta x = \Delta y = \lambda/6$  که معادل ۱۷۲۸ سلول است با دقت بالایی بر شبکه ریزتر  $\Delta x = \lambda/6$ ،  $\Delta y = \lambda/12$  با ۳۴۵۶ سلول منطبق می‌شود و متوسط اختلاف نتایج تنها ۱/۱۵ درصد است.

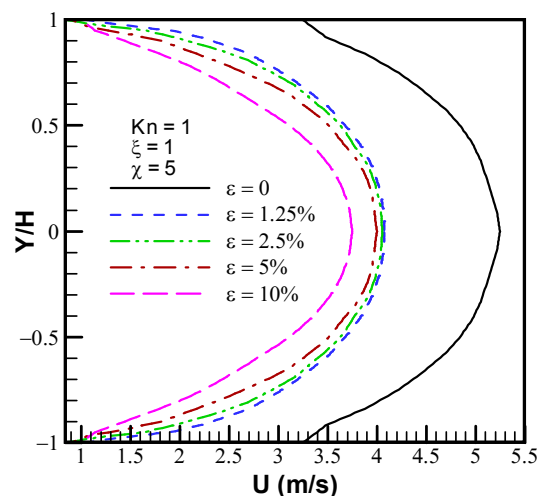
پارامتر دیگری که بر دقت نتایج روش DSMC اثرگذار است، تعداد ذرات در هر سلول برخوردی است. به این منظور مساله با ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ ذره در هر سلول حل و ملاحظه شد، در صورت وجود ۲۰ ذره در هر سلول، نتایج مستقل از تعداد اولیه ذرات هستند؛ این مطلب با مطالعات قبلی برای روش NTC سازگار است [۲۴]. پارامتر مهم بعدی در روش DSMC گام زمانی است که باید از یک سوم متوسط زمان برخورد ذرات کوچکتر باشد [۲۹]. با این معیار گام زمانی برابر  $1 \times 10^{-11}$  می‌شود. برای اطمینان از استقلال نتایج از گام زمانی، یک حل با گام زمانی  $5 \times 10^{-12}$  نیز انجام شد که با دقت بسیار خوبی بر نتایج قبلی منطبق بود؛ بنابراین گام زمانی مساله  $1 \times 10^{-11}$  در نظر گرفته شد که معادل گام زمانی بی‌بعد یک سوم است.



شکل ۵- میدان سرعت در میکروکانال‌های صاف و زبر با مشخصات  $\chi = 5$ ،  $\xi = 1$  و  $\varepsilon = 5\%$  در  $Kn = 1$



شکل ۶- نیمرخ سرعت در مقطع  $x/L = 0.5$



شکل ۷- تغییرات نیمرخ سرعت در مقطع  $x/L = 0.5$  برای مقادیر مختلف زبری نسبی

است. در این جدول سرعت محوری در لبه المان زبری ( $U_{edge}$ ) نیز گزارش شده که بطور متوسط ۶۱٪ کمتر از سرعت لغزشی در کانال صاف است.

هرچند مقادیر سرعت در کانال‌های زبر به یکدیگر نزدیک است، شکل ۷ و جدول ۱، بیانگر کاهش سرعت با افزایش زبری نسبی هستند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش زبری نسبی مقاومت کانال در مقابل جریان خزش حرارتی افزایش یافته و مقادیر سرعت کاهش پیدا می‌کنند.

وجود زبری باعث کاهش قدرت خزش گرمایی روی دیواره و در نتیجه کاهش قابل توجه سرعت در کانال شده است. شکل ۶ نشان می‌دهد، نیمرخ سرعت در این جریان سهموی شکل است که با مطالعات قبلی سازگار است [۲۳،۳۰].

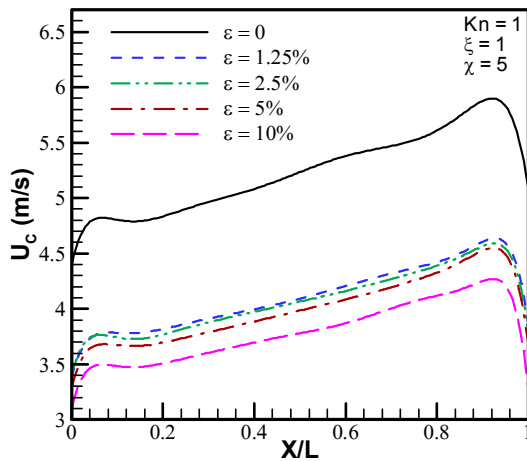
#### ۴-۱- اثر زبری نسبی ( $\epsilon$ ) بر پارامترهای جریان

برای بررسی اثر ارتفاع زبری، در این قسمت میکروکانال‌هایی با مشخصات زبری  $\xi = 1$ ،  $\chi = 5$  و درصد‌های مختلف زبری نسبی شامل ۰، ۰.۵، ۱.۲۵، ۲.۵، ۵، ۱۰،  $Kn = 1$  بررسی شده است؛  $\epsilon = 0$  مربوط به کانال با دیواره صاف است. شکل ۷ نیمرخ سرعت را در مقطع  $x/L = 0.5$  برای مقادیر مختلف زبری نسبی نشان می‌دهد. مطابق این شکل در حضور زبری، سرعت جریان کاهش قابل توجهی می‌یابد که افزایش زبری نسبی باعث کاهش بیشتر سرعت می‌شود. جالب این که با کاهش زبری نسبی نیمرخ سرعت به نیمرخ مربوط به کانال صاف میل نمی‌کند، به طوری که نیمرخ مربوط به زبری نسبی ۲.۵ و ۱.۲۵ درصد تقریباً بر یکدیگر منطبق شده‌اند؛ به ازای زبری‌های کوچک‌تر نیمرخ سرعت تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند.

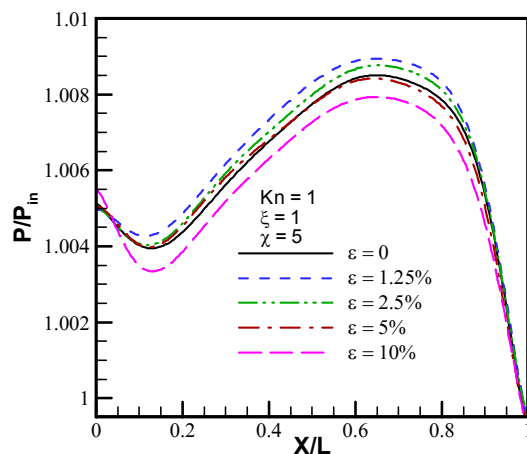
به منظور مقایسه بهتر، مقادیر سرعت لغزشی روی دیواره ( $U_s$ ) و سرعت در مرکز کانال ( $U_c$ ) در جدول ۱ گزارش شده است. با زبر شدن کانال سرعت لغزشی روی دیواره و خط مرکزی بطور متوسط به ترتیب ۷۱٪ و ۲۴٪ کاهش یافته

جدول ۱- سرعت لغزشی دیواره و سرعت خط مرکزی برای مقادیر مختلف زبری نسبی در مقطع  $x/L = 0.5$

$\epsilon$	$U_s$ (%)	$U_{edge}$ (%)	$U_c$ (%)
۰	۳۲۵	۳۲۵	۵۲۴
۱.۲۵	۱۰۴	۱۲۲	۴۰۷
۲.۵	۰۸۵	۱۱۶	۴۰۵
۵	۰۹۱	۱۲۷	۴۰۰
۱۰	۱۰۰	۱۴۴	۳۷۵
متوسط:	۷۱	۷۱	۶۱



شکل ۸- تغییرات مولفه افقی سرعت روی خط مرکزی کانال برای مقادیر مختلف زبری نسبی



شکل ۹- تغییرات فشار نرمال شده در طول خط مرکزی کانال برای مقادیر مختلف زبری نسبی

۴-۲- اثر نسبت منظری زبری ( $\xi$ ) بر پارامترهای جریان در این قسمت نتایج مربوط به جریان در میکروکانال‌های دارای زبری مثلثی شکل با مشخصات  $\epsilon = 5\%$ ،  $\chi = 5$  و نسبت منظری‌های  $1, 2, 3$  در  $Kn = 1$  ارائه می‌شود.

نیمرخ سرعت در میانه کانال برای مقادیر مختلف نسبت منظری زبری در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با افزایش  $\xi$  مقادیر سرعت کمی افزایش می‌یابد. در واقع با افزایش  $\xi$  زاویه راس المان زبری بزرگتر شده و در نتیجه سطح دیواره کانال هموارتر می‌شود؛ بنابراین نیمرخ سرعت به نیمرخ دیواره صاف نزدیک‌تر می‌شود. مطابق شکل ۱۱ این نتیجه در کل کانال

در شکل ۸ تغییرات مولفه محوری سرعت روی خط مرکزی کانال برای مقادیر مختلف زبری نسبی نشان داده شده است. با کاهش زبری نسبی مقدار سرعت محوری افزایش می‌یابد؛ هرچند برای  $\epsilon \leq 2.5\%$  مقادیر سرعت تقریباً بر هم منطبق هستند و البته همچنان با سرعت مربوط به کانال صاف فاصله زیادی دارند.

تغییرات فشار نرمال شده در طول خط مرکزی کانال برای مقادیر مختلف زبری نسبی در شکل ۹ نشان داده شده است. علی‌رغم اعمال فشارهای ورودی و خروجی یکسان در شرایط اولیه، شاهد تغییرات بسیار جزئی فشار در طول جریان هستیم. اختلاف فشار ورودی و خروجی کانال تنها  $0.6\%$  است که قابل چشم‌پوشی است. این رفتار در مطالعات مظفری و روحی [۳۱] نیز برای جریان خزش حرارتی در کانال صاف گزارش شده است. مطابق شکل ۹ توزیع فشار برای کانال‌های صاف و زبر مشابه است.

در جدول ۲ دبی جرمی به ازای مقادیر مختلف زبری نسبی گزارش شده است. با کاهش زبری نسبی، دبی جرمی جریان بطور یکنوا افزایش می‌یابد. قابل توجه است که در زبری نسبی به کوچکی  $1.25\%$ ، یک کاهش ۲۶ درصدی در دبی جرمی نسبت به کانال صاف وجود دارد.

از مجموع نتایج این بخش می‌توان نتیجه گرفت با کاهش نسبت زبری به کمتر از  $2.5\%$  رفتار جریان تقریباً مستقل از اندازه زبری شده که البته همچنان بطور قابل ملاحظه‌ای با کانال صاف متفاوت است.

جدول ۲- دبی جرمی برای مقادیر مختلف زبری نسبی در

شرایط  $Kn = 1$  و  $\chi = 5$  و  $\xi = 1$  برای  $\epsilon$

اختلاف با کانال صاف (%)	$\dot{M} \times 10^7 (kg/s)$	$\epsilon$
-	۲,۴۰۷	۰
-۲۶	۱,۷۸۵	۱,۲۵
-۲۸	۱,۷۳۹	۲,۵
-۳۱	۱,۶۵۵	۵
-۳۸	۱,۴۸۲	۱۰



جدول ۳- دبی جرمی برای مقادیر مختلف نسبت منظری

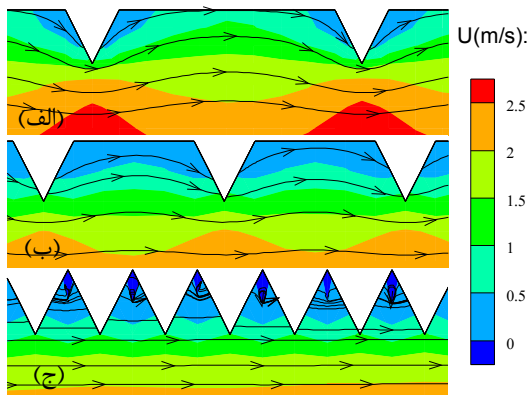
زبری در شرایط  $\varepsilon = 5\%$  و  $\chi = 5$  برای  $Kn = 1$

اختلاف با کانال صاف (%)	$\dot{M} \times 10^7 (kg/s)$	$\xi$
-	۲,۴۰۷	$\infty$
-۲۹	۱,۷۱۴	۳
-۳۱	۱,۶۷۱	۲
-۳۱	۱,۶۵۵	۱

نتایج نشان می‌دهد، با افزایش نسبت منظری زبری، دبی جرمی در کانال افزایش می‌یابد. این مطلب با تحلیل گفته شده در ذیل شکل ۱۰ سازگار است. از مجموع مطالب گفته شده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت، تغییرات نسبت منظری زبری بر شرایط جریان تاثیر قابل توجهی ندارد.

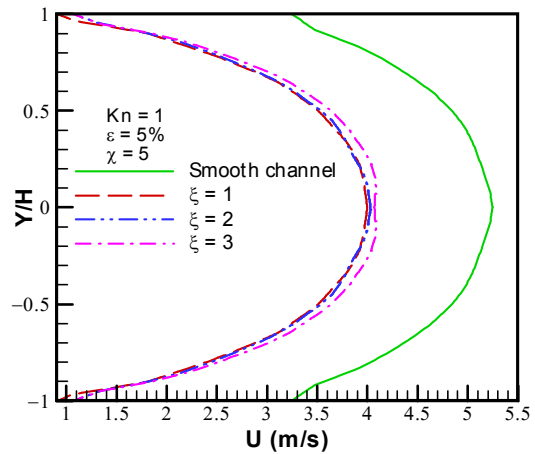
### ۳-۴ اثر فاصله زبری ( $\chi$ ) بر پارامترهای جریان

با کاهش فاصله بین المان‌های زبری، مطابق شکل ۱۲ میزان نفوذ جریان در فضای بین زبری‌ها کاهش پیدا می‌کند. در این شکل با بزرگ‌نمایی المان‌های زبری، خطوط جریان و کانتورهای سرعت محوری در شرایط  $\varepsilon = 5\%$ ،  $\xi = 1$  برای فاصله‌های زبری مختلف در  $Kn = 1$  نشان داده شده است.

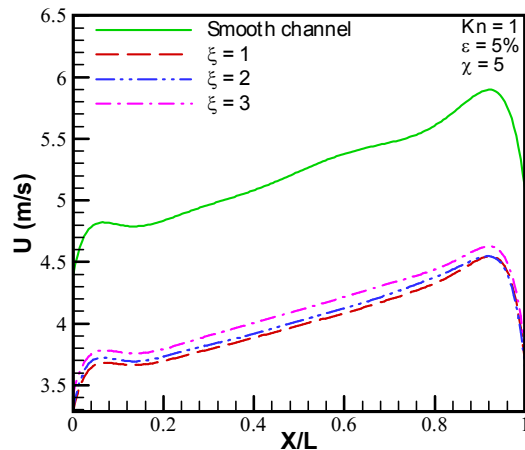


شکل ۱۲- کانتور سرعت محوری به همراه خطوط جریان در مجاورت المان‌های زبری برای  $\varepsilon = 5\%$ ،  $\xi = 1$  و فاصله زبری (الف)  $\chi = 5$ ، (ب)  $\chi = 3$  و (ج)  $\chi = 1$

برقرار است و با افزایش  $\xi$  سرعت‌های بزرگتری حاصل می‌شود. در این شکل تغییرات سرعت مرکزی در طول کانال برای مقادیر مختلف نسبت منظری زبری رسم شده است. بررسی تغییرات فشار در طول کانال حاکی از عدم تاثیر قابل توجه نسبت منظری زبری بر توزیع فشار است.

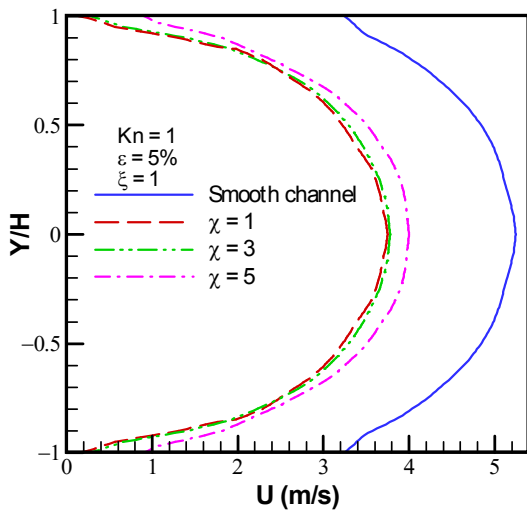


شکل ۱۰- نیم‌رخ سرعت در مقطع  $X/L = 0.5$  برای مقادیر مختلف نسبت منظری زبری

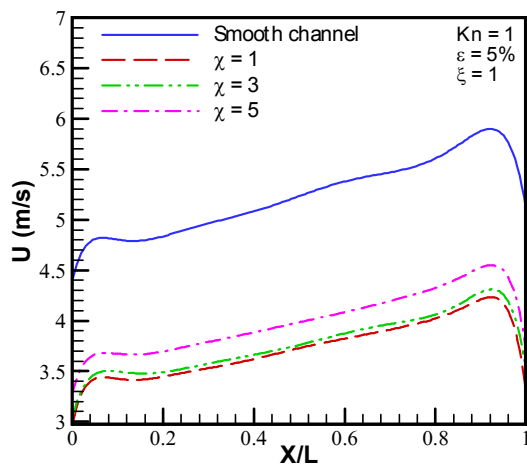


شکل ۱۱- تغییرات سرعت محوری روی خط مرکزی کانال به ازای مقادیر مختلف نسبت منظری زبری مختلف

در جدول ۳ دبی جرمی جریان برای مقادیر مختلف نسبت منظری زبری گزارش شده است. در این جدول  $\xi = \infty$  نماینده کانال صاف است.



شکل ۱۳- نیم‌رخ سرعت در مقطع  $X/L=0.5$  برای مقادیر مختلف فاصله زبری



شکل ۱۴- تغییرات سرعت خط مرکزی در طول کانال برای مقادیر مختلف فاصله زبری

#### ۴-۴- اثر عدد نودسن بر پارامترهای جریان

برای بررسی اثر عدد نودسن بر جریان خزش حرارتی درون کانال زبر، کانالی با پارامترهای زبری  $\varepsilon = 5$ ،  $\xi = 1$  و  $\chi = 5$  در گستره کامل عدد نودسن شامل رژیم‌های جریان لغزشی ( $Kn = 0.1$ )، گذار ( $Kn = 1$ ) و آزاد مولکولی ( $Kn = 10$ ) در نظر گرفته شده است.

تغییرات دمای خط مرکزی کانال در اعداد نودسن مختلف به همراه دمای دیواره در شکل ۱۵ نشان داده شده است؛ همچنین در کادر زرد رنگ گوشه این شکل دمای

در  $\chi = 1$  یک گردابه در فضای بین دو زبری تشکیل می‌شود؛ در حالی که در دو حالت دیگر جریان فرصت کافی برای نفوذ در محفظه بین زبری‌ها را دارد و خطوط جریان در این ناحیه دارای انحناء شده است. توجه به این نکته ارزشمند است که برای  $\chi = 1$  خطوط جریان در مجاورت زبری‌ها به موازات دیواره قرار دارند و می‌توان گفت، زبری در یک زیرلایه قرار گرفته است.

شکل ۱۳ تغییرات نیم‌رخ سرعت را در میانه کانال برای مقادیر مختلف فاصله زبری نشان می‌دهد. با افزایش فاصله زبری، تعداد المان‌های زبری در طول کانال کاهش یافته و به شرایط کانال صاف نزدیک‌تر می‌شویم؛ بنابراین نیم‌رخ سرعت مطابق شکل ۱۳ به نیم‌رخ کانال صاف نزدیک‌تر می‌شود.

قابل توجه است که برای فاصله زبری ۱ و ۳ که با زبری موجود در کانال‌های واقعی سازگارتر هستند (در واقعیت، المان‌های زبری فاصله زیادی از یکدیگر ندارند)، نیم‌رخ سرعت تغییر قابل توجهی ندارد. بررسی تغییرات سرعت خط مرکزی در شکل ۱۴ مویده آن است که سرعت محوری در کل کانال به ازای  $\chi \leq 3$  وابستگی چندانی به فاصله زبری ندارد؛ همچنین بررسی تغییرات فشار در طول کانال نشان داد، فاصله زبری تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر توزیع فشار نیز ندارد.

در جدول ۴ دبی جرمی برای مقادیر مختلف فاصله زبری گزارش شده است. مطابق توضیح گفته شده ذیل شکل ۱۳ با افزایش فاصله زبری و میل به هندسه کانال صاف، دبی جرمی افزایش می‌یابد.

بهرحال از مجموع مطالب گفته شده در این بخش می‌توان نتیجه گرفت، به ازای  $\chi \leq 3$  شرایط جریان تقریباً مستقل از تغییرات فاصله زبری است.

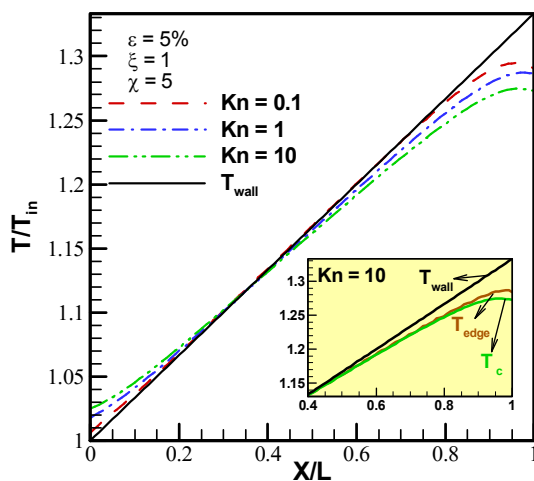
#### جدول ۴- دبی جرمی برای مقادیر مختلف فاصله زبری در

شرایط  $\varepsilon = 5$  و  $\xi = 1$  برای  $Kn = 1$

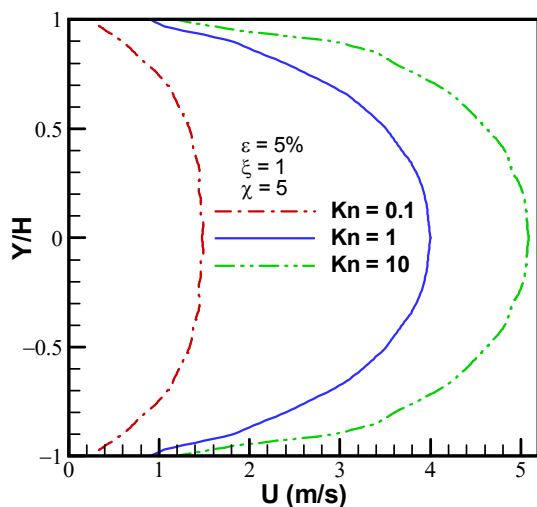
اختلاف با کانال صاف (%)	$\dot{M} \times 10^7 (kg/s)$	$\chi$
-	۲,۴۰۷	$\infty$
-۳۱	۱,۶۵۵	۵
-۳۷	۱,۵۲۴	۳
-۳۸	۱,۴۸۲	۱

جدول ۵- دبی جرمی در اعداد نودسن مختلف برای کانال زبر با پارامترهای  $\varepsilon = 5$ ,  $\xi = 1$  و  $\chi = 5$

اختلاف با (%) $Kn = 0.1$	$\dot{M} \times 10^7 (kg/s)$	$Kn$
-	۶,۱۳۸	۰,۱
-۷۳	۱,۶۵۵	۱
-۹۶	۰,۲۲۳	۱۰



شکل ۱۵- تغییرات دما روی خط مرکزی کانال در رژیم‌های مختلف جریان



شکل ۱۶- نیم‌رخ سرعت در مقطع  $X/L = 0.5$  برای اعداد نودسن مختلف

دیواره ( $T_{wall}$ )، دما در لبه‌های زبری ( $T_{edge}$ ) و دمای خط مرکزی ( $T_c$ ) برای عدد نودسن ۱۰ با یکدیگر مقایسه شده است. منشا اختلاف دمای لبه زبری و دیواره را با کمی اغماض می‌توان به پدیده پرش دما روی دیواره نسبت داد. مطابق این شکل، پرش دمایی تنها در نواحی نزدیک به ورودی و خروجی مشاهده می‌شود و به همین دلیل دمای خط مرکزی در این نواحی از حالت خطی خارج شده است.

با توجه به وابستگی پرش دمایی به عدد نودسن، انحراف از توزیع خطی با افزایش عدد نودسن بیشتر می‌شود. به نحوی که در  $Kn = 0.1$  در بیشتر کانال دمای خط مرکزی منطبق بر دمای دیواره است؛ در حالی که در رژیم‌های گذار و آزاد مولکولی هرچند همچنان در بخش قابل توجهی از کانال تغییرات دما خطی است، اما شیب آن از شیب دمای دیواره کمتر است. در خروجی به علت پرش دمایی، دمای گاز کمتر از دمای دیواره است. از طرفی با توجه به این که عدد پکلت در جریان خزش حرارتی بسیار کوچک است (در این مطالعه  $Pe < 25 \times 10^{-3}$ )، در ورودی کانال بواسطه هدایت محوری، دمای سیال بیشتر از دمای دیواره است و پرش دمایی این اختلاف را افزایش می‌دهد؛ لذا علی‌رغم اعمال شیب دمایی یکسان روی دیواره، با افزایش عدد نودسن شیب دما در گاز کاهش می‌یابد.

شکل ۱۶ تغییرات نیم‌رخ سرعت را در مقطع میانی کانال برای اعداد نودسن مختلف نشان می‌دهد. شکل نیم‌رخ در تمامی رژیم‌های جریان تقریباً سهموی است. با افزایش عدد نودسن، خزش حرارتی تقویت شده، سرعت لغزشی بزرگتری روی دیواره اتفاق می‌افتد که همراه با افزایش سرعت در کل کانال است. البته باید توجه داشت، با توجه به کاهش شدید چگالی در اعداد نودسن بزرگ، این افزایش سرعت لزوماً به معنای افزایش دبی جرمی جریان نیست. جدول ۵ موید این مطلب است. در این جدول دبی جرمی جریان برای نودسن‌های مختلف نمایش داده شده است. مطابق این جدول با افزایش عدد نودسن از ۰,۱ به ۱۰، دبی جرمی جریان ۹۶٪ کاهش یافته است.

### ۵- جمع‌بندی

در این مقاله به منظور بررسی اثر زبری بر جریان درون نودسن پمپ‌ها، جریان خزش حرارتی درون یک میکروکانال

- [3] Takata S, Sugimoto H, Kosuge S (2007) Gas separation by means of the Knudsen compressor. *Eur. J Mech B Fluids* 26(2): 155-181.
- [4] Bell AD (2013) Human powered Knudsen pump for pneumatic pharmaceutical delivery. University of Louisville, Electronic Theses and Dissertations. Paper 97.
- [5] McNamara S, Gianchandani YB (2005) On-chip vacuum generated by a micromachined Knudsen pump. *J Microelectromech Syst* 14(4): 741-746.
- [6] Kugimoto K, Hirota Y, Yamauchi T, Yamaguchi H, Niimi T (2018) A novel heat pump system using a multi-stage Knudsen compressor. *Int J Heat Mass Transfer* 127(A): 84-91.
- [7] Vargo SE, Muntz EP (2001) Initial results from the first MEMS fabricated thermal transpiration-driven vacuum pump. *Proc AIP Conference* 585(1).
- [8] Gupta NK, Gianchandani YB (2008) Thermal transpiration in zeolites: A mechanism for motionless gas pumps. *Appl Phys Lett* 93(19): 193511.
- [9] Gupta NK, Gianchandani YB (2009) A planar cascading architecture for a ceramic Knudsen micropump. *Proc 15th Int Conf on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*.
- [10] Pharas K, McNamara S (2010) Knudsen pump driven by a thermoelectric material. *J Micromech Microeng* 20(12): 125032.
- [11] Aoki K, Degond P, Mieussens L, Nishioka M, Takata S (2007) Numerical simulation of a Knudsen pump using the effect of curvature of the channel. *Proc Rarefied Gas Dynamics*. MS Ivanov and AK Rebrov, Eds. Novosibirsk: 1079-1084.
- [12] Hu Y, Werner C, Li D (2003) Influence of three-dimensional roughness on pressure-driven flow through microchannels. *J Fluids Eng* 125(5): 871-879.
- [13] Kleinstreuer C, Koo J (2004) Computational analysis of wall roughness effects for liquid flow in micro-conduits. *J Fluids Eng* 126(1): 1-9.
- [14] Cao BY, Chen M, Guo ZY (2006) Effect of surface roughness on gas flow in microchannels by molecular dynamics simulation. *Int J Eng Sci* 44(13-14): 927-937.
- [15] رجبی رمضان، ثقفیان محسن (۱۳۹۵) بررسی عددی اثر تلفات اصطکاکی و زبری سطح بر جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانالها با استفاده از بسط اختلالات. روش‌های عددی در مهندسی ۱۵۶-۱۴۳: ۳۵(۱).
- [16] Zhang C, Chen Y, Deng Z, Shi M (2012) Role of rough surface topography on gas slip flow in microchannels. *Phys Rev E* 86(1): 016319.
- [17] Noorian H, Toghraie D, Azimian AR (2014) The effects of surface roughness geometry of flow با زائده‌هایی مثلثی شکل روی دیواره آن، به روش DSMC در رژیم‌های لغزشی، گذار و آزاد مولکولی مطالعه شد. تغییرات پارامترهای مختلف زبری شامل، ارتفاع، نسبت منظری و فاصله المان‌های زبری در محدوده وسیعی بررسی و نتایج زیر به دست آمد:
- (۱) حضور زبری روی دیواره، صرف‌نظر از اندازه آن باعث کاهش قابل توجه سرعت و دبی جرمی جریان می‌شود. به نحوی که زبری به کوچکی  $\varepsilon = 1.25$ ، منجر به کاهش ۲۶ درصدی دبی جرمی در مقایسه با کانال صاف می‌شود.
- (۲) در زبری‌های کوچک‌تر از  $\varepsilon = 2.5$  شرایط جریان مستقل از ارتفاع زبری است.
- (۳) برای  $\varepsilon > 2.5$  با افزایش زبری نسبی، دبی جرمی جریان کاهش می‌یابد؛ به نحوی که در  $\varepsilon = 10$  دبی جریان ۳۸ درصد نسبت به کانال صاف در شرایط مشابه کمتر است.
- (۴) تغییرات نسبت منظری زبری (ξ) بر شرایط جریان تاثیر قابل توجهی ندارد.
- (۵) در  $\chi = 1$  یک جریان گردابی در فضای بین زبری‌ها شکل می‌گیرد. در این حالت جریان اصلی به فضای بین زبری‌ها نفوذ نکرده و زبری در یک زیرلایه جریانی قرار می‌گیرد.
- (۶) برای  $\chi \leq 3$  شرایط جریان مستقل از فاصله بین المان‌های زبری است.
- (۷) با افزایش عدد نودسن جریان، هرچند که سرعت‌های بزرگ‌تری در کانال رخ می‌دهد، اما دبی جرمی جریان به شدت کاهش می‌یابد. به نحوی که با افزایش عدد نودسن از ۰/۱ به ۱۰، یک کاهش ۹۶ درصدی در دبی جرمی جریان دیده می‌شود.
- ۶- مراجع
- [1] An S, Qin Y, Gianchandani YB (2015) A monolithic high-flow Knudsen pump using vertical Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> channels in SOI. *J Microelectromech Syst* 24(5): 1606-1615.
- [2] Gupta NK, Gianchandani YB (2011) Porous ceramics for multistage Knudsen micropumps modeling approach and experimental evaluation. *J Micromech Microeng* 21(9): 095029.

- flows using small number of particles per cells. *J Heat Transfer* 135(10): 101008-101008.
- [25] Amiri-Jaghargh A, Roohi E, Stefanov S, Nami H, Niazmand H (2014) DSMC simulation of micro/nano flows using SBT-TAS technique. *Comput Fluids* 102: 266-276.
- [26] Liou WW, Fang YC (2000) Implicit boundary conditions for direct simulation Monte Carlo method in MEMS flow predictions. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences* 1(4): 119-128.
- [27] Akhlaghi H, Roohi H (2014) Mass flow rate prediction of pressure-temperature-driven gas flows through micro/nanoscale channels. *Continuum Mech Thermodyn* 26(1): 67-78.
- [28] Alexander FJ, Garcia AL, Alder BJ (1998) Cell size dependence of transport coefficients in stochastic particle algorithms. *Phys Fluids* 10(6): 1540-1542.
- [29] Hadjiconstantinou NG (2000) Analysis of k Phys. *Fluids* 12(10): 2634-2638.
- [30] Takata S, Funagane H (2013) Singular behaviour of a rarefied gas on a planar boundary. *J Fluid Mech* 717: 30-47.
- [31] Mozafari MS, Roohi E (2017) On the thermally-driven gas flow through divergent micro/nanochannels. *Int J Mod Phys C* 28(12): 1750143.
- undergoing Poiseuille flow by molecular dynamics simulation. *Heat Mass Transfer* 50(1): 95-104.
- [18] Rovenskaya OI, Croce G (2016) Numerical simulation of gas flow in rough microchannels: hybrid kinetic-continuum approach versus Navier-Stokes. *Microfluid Nanofluid* 20(5): 81.
- [19] Jia J, Song Q, Liu Z, Wang B (2018) Effect of wall roughness on performance of microchannel applied in microfluidic device. *Microsyst Technol* 25: 2385-2397.
- [20] Yamamoto K, Takeuchi H, Hyakutake T (2005) Effect of surface grooves on the rarefied gas flow between two parallel walls. *Proc AIP Conference* 762(1): 156-161.
- [21] Baier T, Hardt S, Shahabi V, Roohi E (2017) Knudsen pump inspired by Crooks radiometer with a specular wall. *Phys Rev Fluids* 2: 033401.
- [22] Shahabi V, Baier T, Roohi E, Hardt S (2017) Thermally induced gas flows in ratchet channels with diffuse and specular boundaries. *Sci Rep* 7: 41412.
- [23] Lotfian A, Roohi E (2019) Radiometric flow in periodically patterned channels: Fluid physics and improved configurations. *J Fluid Mech* 860: 544-576.
- [24] Amiri-Jaghargh A, Roohi E, Niazmand H (2013) DSMC simulation of low knudsen micro/nano