

بررسی عددی اثر تلفات اصطکاکی و زبری سطح بر جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال‌ها با استفاده از بسط اختلالات

رمضان رجیبی و محسن ثقفیان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۴/۰۶/۰۱)

چکیده - در این مقاله اثر تلفات اصطکاکی و اثر زبری در میکروکانال‌ها در جریان لغزشی بر روی انتقال حرارت و جریان سیال در میکروکانال‌ها با استفاده از بسط اختلالات معادلات حاکم بر جریان، بررسی شده است. جریان آرام و در حال توسعه هیدرودینامیکی و حرارتی، به صورت دوبعدی، تراکم‌ناپذیر و پایدار در نظر گرفته شده است. سیال عامل، هوا و بین دو صفحه موازی در جریان است. معادلات به دست آمده از بسط معادلات ناویر استوکس و انرژی بر حسب مراتب عدد نودسن به صورت عددی با شرایط مرزی مرتبه دو لغزش سرعت و پرش دما، حل شده‌اند. اثرات خزش گرمایی در نظر گرفته نشده است. میدان‌های سرعت و دما برای هر دو حالت شار حرارتی ثابت و دمای دیواره ثابت به دست آمده و بررسی شده است. اثرات ارتفاع زبری، فاصله میان المان‌های زبری، طول المان‌های زبری، عدد رینولدز و عدد نودسن بر روی رفتار لغزشی گاز بررسی شده است. نتایج اثر قابل توجه تلفات اصطکاکی و زبری را بر روی جریان سیال و انتقال حرارت در میکروکانال نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: انتقال حرارت، تلفات اصطکاکی، رژیم لغزشی، میکروکانال، بسط اختلالات.

Numerical Study of Viscous Dissipation and Roughness Effects on Fluid Flow and Heat Transfer in Microchannels using Perturbation Method

R. Rajabi and M. Saghafian*

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology.

Abstract: In this paper, viscous dissipation and roughness effects on heat transfer and fluid flow are investigated in microchannels using perturbation method in slip flow regime. The flow is considered to be laminar, developing thermally and hydrodynamically, two-dimensional, incompressible and steady-state. The working fluid is air, flowing between two parallel plates. The equations obtained from developing Navier-Stokes and energy equations are solved numerically according to different orders of Knudsen number, with second-order velocity slip and temperature jump boundary conditions. The effects of thermal creep has been ignored. Temperature and velocity fields are obtained and estimated for both constant heat flux and constant wall temperature. The effects of roughness height, space between roughness elements, roughness elements length, Re number and Kn number on slip behavior of gas flow are investigated. The results indicate considerable effect of viscous dissipation and roughness on fluid flow and heat transfer in microchannel.

Keywords: Heat transfer, viscous dissipation, slip flow, microchannel, perturbation method.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: saghafian@cc.iut.ac.ir

شار حرارتی	q_w	عدد برینکمن	Br
عدد رینولدز	$Re = \dots u_m D_h / \mu$	قطر هیدرولیکی	D_h
دمای دیواره	T_w	ارتفاع کانال	H
سرعت	u	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی	h
علائم یونانی		ضریب هدایت حرارتی	k
پوشش آزاد مولکولی	}	عدد نودسن	$\} / H = Kn$
ویسکوزیته سیال	μ	طول کانال	L
چگالی سیال	...	عدد ناسلت	$Nu = h D_h / k$
ضریب مومنتوم مماسی	σ_v	عدد پرانتل	Pr
ضریب حرارتی	σ_T	عدد پکلت	$Pe = Re \cdot Pr$
		عدد پواسل	Po

۱- مقدمه

سیستم‌های الکترومکانیکی (MEMS) یکی از مهم‌ترین تکنولوژی‌های قرن ۲۱ شناخته شده است. این فناوری می‌تواند تحولی شگرف در محصولات صنعتی ایجاد کند. با توسعه این سیستم‌ها، جریان سیال و انتقال حرارت در میکروسیستم‌ها برای تحقیقات آینده و کاربرد این وسایل مورد توجه قرار گرفته است. میکروکانال‌ها جزء ساختارهای اصلی این وسایل هستند. همچنان که اندازه سیستم‌ها کاهش می‌یابد، اثراتی مانند تغییر خواص حرارتی یا اثر تلفات اصطکاکی بر روی رفتار حرارتی غیرقابل صرف‌نظر می‌شود [۱].

در دانش مکانیک سیالات در حل معادلات دیفرانسیلی غیرخطی سابقه طولانی وجود دارد. برخلاف معادلات پایه در بسیاری از شاخه‌های فیزیک، معادلات حاکم بر حرکت سیال ضرورتاً غیرخطی هستند و این مطلب در هر حالت درست است چه جریان لزج و تراکم‌پذیر باشد یا نباشد. تنها استثناء مهم حرکت غیرچرخشی یک سیال غیرلزج تراکم‌ناپذیر است که منجر به معادله لاپلاس می‌شود. به علت این غیرخطی بودن، حل دقیق در شاخه‌های مکانیک سیالات به ندرت وجود دارد [۲]. بنابراین همواره ضرورت وجود حل تقریبی در

مکانیک سیالات حس می‌شود. یکی از این روش‌های حل تقریبی بسط اختلالات است به طوری که هر خاصیت ماکروسکوپیکی جریان را می‌توان به صورت یک سری برحسب عدد نودسن بسط داد.

کو و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۳] تأثیرات تلفات اصطکاکی بر روی میدان دما و همچنین بر روی ضریب اصطکاک را با استفاده از آنالیزهای بی‌بعدسازی و شبیه‌سازی کامپیوتری برای سه سیال کاری مختلف (آب، متانول، ایزوپروپانول) در میکرولوله‌ها و میکروکانال‌ها بررسی کردند. آنها تغییرات دما را با عدد رینولدز برای کانال مستطیلی مطالعه کرده و بین داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی مقایسه کردند.

سلتا و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۴] تأثیرات گرمایش اصطکاکی را در مقیاس کوچک مورد تحلیل قرار دادند. علاوه بر آن با انجام آزمایش نتایج خود را اعتبار سنجی کردند.

نتایج به نقش انتقال حرارت و ویسکوزیته در جریان در میکروکانال‌ها مربوط بود. اثر آن در معادلات ناویر استوکس خود را نشان داد. آنها همچنین یک بررسی آزمایشگاهی برای تأیید عملی اثر ویسکوزیته انجام دادند.

راندس و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۵] به طور آزمایشگاهی

جریان را در ناحیه گذار از آرام به مغشوش برای جریان آب در میکرولوله‌ها با قطرهای در محدوده ۱۶/۶ تا ۳۲/۳ میکرومتر و رینولدز ۳۰۰ تا ۳۴۰۰ بررسی کردند. سیال بر اثر تلفات اصطکاکی دمایش افزایش و با افزایش طول میکرولوله‌ها و کاهش قطر آنها نیز دمایش افزایش می‌یافت. گرمای ناشی از ویسکوزیته نقش مهمی در افزایش دما دارد و در بعضی موارد دما به ۳۵ درجه سلسیوس می‌رسد.

نونو و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۶] با روش‌های عددی اثرات تلفات ویسکوز و ویسکوزیته وابسته به دما را هم در حالت توسعه یافتگی حرارتی و هم هیدرودینامیکی در جریان آرام برای چند مایع، در میکروکانال‌های دلخواه اما با سطح مقطع ثابت بررسی کردند. آنها نشان دادند که از هر دو اثر، دمای تابع ویسکوزیته و تلفات اصطکاکی، نمی‌توان در بازه گسترده‌ای از شرایط کاری صرف‌نظر کرد. در این بررسی‌ها مقادیر عدد رینولدز و عدد پرانتل ثابت و به ترتیب ۵ و ۵۰۰۰ در دمای مرجع سیال بوده است.

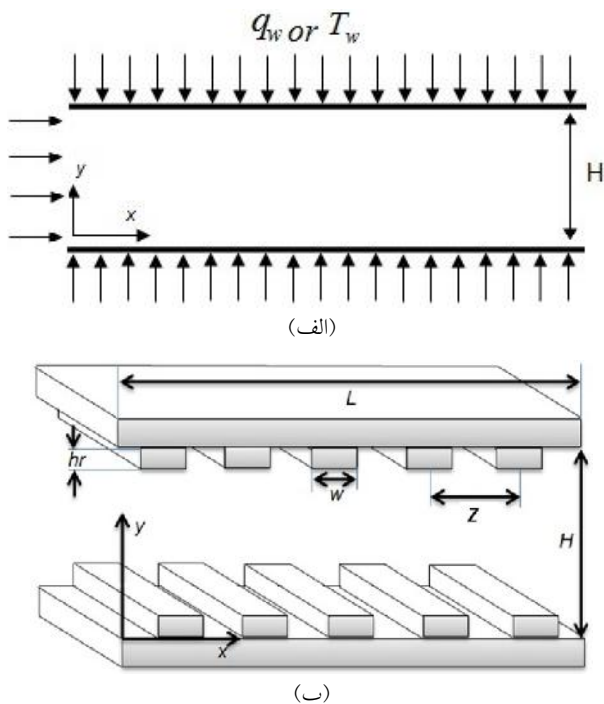
هانگ در سال ۲۰۰۹ [۷] با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک به بررسی اثر تلفات اصطکاکی در جریان توسعه یافته با جابه‌جایی اجباری برای مایع تک‌فاز در میکروکانال دایروی تحت شرایط شار حرارتی ثابت پرداخت. در این بررسی‌ها نتیجه شد که، تحت شرایط ثابت، اثر تلفات ویسکوزیته بر روی تولید آنتروپی در میکروکانال نقش مهمی دارد و نباید نادیده گرفته شود.

وان ریچ و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۸] به‌طور عددی تأثیر تلفات اصطکاکی و رقت را بر روی نسبت انتقال حرارت جابه‌جایی در میکروکانال مستطیلی با شرایط دما ثابت و شار ثابت، بررسی کردند. هم نتایج تحلیل و کار عددی نشان می‌داد که تأثیر تلفات اصطکاکی، کار جریان و هدایت محوری همه در رژیم لغزشی برای شرایط توسعه یافته هیدرودینامیکی و حرارتی در اعداد ناسلت موضعی، نقش مهمی دارند.

اریسی و آیدین در سال ۲۰۰۹ [۹] مطالعات عددی در رابطه با جابه‌جایی اجباری ناحیه توسعه یافته حرارتی در جریان

آرام در داخل لوله، با دیواره رسانا و اتلاف اصطکاکی، انجام دادند و دریافتند که تلفات اصطکاکی، هم بر دمای دیواره و هم بر پروفیل دما تأثیر می‌گذارد. بیشترین تأثیرات تلفات اصطکاکی در اعداد برینکمن بالا مشاهده شد.

بینگ یانگ و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۱۰] جریان گاز در یک کانال زیر میکرون، که در چند حالت زبری سطح به صورت مثلثی، مستطیلی، سینوسی و اتفاقی مدل شده بود، را به‌وسیله روش دینامیک مولکولی و اثرات زبری سطح را روی شرایط مرزی لغزشی و خصوصیات سیال بررسی کردند. مطالعه آنها نشان داد که وقتی زبری سطح افزایش می‌یابد لغزش کاهش می‌یابد. آنها همچنین ملاحظه کردند که درحالی‌که زبری سطح افزایش می‌یابد ثابت اصطکاک نیز افزایش پیدا می‌کند. همچنین زبری اتفاقی با دندان‌ه مثلثی بیشترین ضریب اصطکاک را ایجاد می‌کند. جیلیو کروس و پالو داگار در سال ۲۰۰۵ [۱۱] اثر زبری بر روی انتقال حرارت و افت فشار را برای میکروکانال دایره‌ای و مستطیل شکل بررسی کردند. در هر دو مورد، نسبت به دیواره صاف، افزایش عدد پواسل مشاهده شد. این افزایش تابعی از عدد رینولدز بوده و با افزایش ارتفاع زبری بیشتر می‌شود. شن و همکاران در سال ۲۰۰۵ [۱۲]، از طریق آزمایش، جریان داخل یک میکروکانال از جنس مس را بررسی کردند. نتایج آزمایش آنها نشان می‌داد که زبری اثر قابل‌توجهی بر روی جریان آرام دارد. همچنین برای جریان توسعه یافته عدد پواسل با افزایش رینولدز افزایش می‌یابد و در رینولدزهای بالا این افزایش بیشتر است. ناسلت متوسط نیز با افزایش عدد رینولدز و پرانتل افزایش پیدا می‌کند و مقدار هر دو عدد ناسلت متوسط و ناسلت موضعی به‌طور قابل‌توجهی از نتیجه تئوری‌های مرسوم برای زبری، کمتر بودند. یان جی و همکاران در سال ۲۰۰۶ [۱۳] اثر زبری را در میکروکانال، در جریان لغزشی، بررسی کردند. آنها دریافتند که زبری باعث افت فشار بیشتر و افزایش عدد پواسل می‌شود که ناشی از اثر سطوح زبر و تشکیل نواحی گردابی است. میانگین عدد پواسل نه تنها با افزایش ارتفاع زبری افزایش می‌یابد، بلکه با کاهش فاصله بین زبری‌ها نیز افزایش



شکل ۱- الف) هندسه مسئله بررسی تلفات اصطکاکی و
ب) هندسه مسئله بررسی اثر زبری

نمایش داده شده است. جریان به صورت دائم، در حال توسعه هیدرودینامیکی و حرارتی، آرام، تراکم ناپذیر و با خواص ثابت در نظر گرفته شده است. طبق شکل (۱)، مسئله در دو حالت دمای دیواره ثابت و شار حرارتی ثابت بررسی می‌شود. برای قسمت زبری، نوع آن به صورت دندانه‌های مستطیل شکل در نظر گرفته شده است. هندسه میکروکانال و مشخصات زبری در شکل (۱-ب) نمایش داده شده است. مسئله در حالت دما ثابت حل شده است.

در این تحقیق سیال مسئله هوا، با نسبت گرماهای ویژه $\gamma = 1/4$ ، ویسکوزیته $\mu = 18/0 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ و دانسیته $\rho = 1/251 \text{ kg/m}^3$ است. همچنین ضرایب سازگاری سرعت و دما نیز واحد در نظر گرفته می‌شوند، $\sigma_v = \sigma_T = 1$ و نتایج براساس $Pr = 0/7$ ، $L = 10H$ ، اندازه شبکه حل 450×450 است. عدد نودسن به صورت $Kn = \dots / H$ تعریف می‌شود. مسئله در اعداد نودسن مختلف در محدوده رژیم لغزشی $0/001 \leq Kn \leq 0/1$ بررسی شده است.

می‌یابد. حکاک و همکاران در سال ۲۰۰۹ [۱۴] اثر زبری بر روی جریان تراکم‌پذیر داخل میکروکانال با زبری مثلی را بررسی کردند. آنها دریافتند که المان‌های زبری جریان بالادست را محدود می‌کند و باعث افت فشار و افزایش عدد پواسل می‌شود. جریان تراکم‌پذیر بیشتر به زبری وابسته است که ناشی از افت فشار بالا و اثر آن بر روی میدان جریان است. تورگی و یازیکیوگلو در سال ۲۰۰۹ [۱۵] اثر زبری را بر روی انتقال حرارت جابه‌جایی در میکروکانالی به صورت دو صفحه موازی به صورت عددی بررسی کردند. در این بررسی پرش دما در دیواره و همچنین اثر تلفات اصطکاکی نیز در نظر گرفته شد. در این بررسی نتیجه شد که اثر حضور هدایت محوری و تلفات اصطکاکی بر روی انتقال حرارت در کانال‌های صاف و زبر نسبت به حالتی که از آنها صرف نظر می‌شوند، بیشتر است. ژانگ و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۱۶] اثر عدد رینولدز، ارتفاع زبری، فاصله بین المان‌های زبری، افت فشار و انتقال حرارت با شرط مرزی انتقال حرارت ثابت را در میکروکانال زبر بررسی کردند. نتایج آنها از این بررسی حاکی از آن است که هندسه زبری نقش مهمی بر روی جریان آرام و انتقال حرارت در کانال زبر دارد. بررسی آنها نشان داد که اثر زبری‌های مثلی بر روی افت فشار و ناسلت موضعی شبیه زبری نیم‌دایره‌ای است و اثر آنها از زبری مستطیلی بیشتر است.

در کار حاضر با روش عددی و با استفاده از روش بسط اختلالات و توسعه معادلات حاکم، به بررسی اثر تلفات ویسکوز در یک میکروکانال با دو صفحه موازی در دو حالت دما ثابت و شار حرارتی ثابت روی دیواره و همچنین اثر زبری بر روی پروفیل سرعت، عدد پواسل و عدد ناسلت، پرداخته شده است.

۲- تشریح مسئله

جریان در داخل یک میکروکانال با دو صفحه موازی در نظر گرفته شده است. هندسه میکروکانال در شکل (۱-الف)

۳- معادلات حاکم و روش حل

تئوری اختلالات در برگیرنده روش‌های ریاضی است که برای یافتن یک حل تقریبی برای یک مسئله، که نمی‌توان آن را به صورت دقیق حل کرد، استفاده می‌شود. روش اختلالات منجر به بیانی برای حل مورد نظر در قالب سری‌های توانی می‌شود که به بسط اختلال مشهور است.

جمله اول این سری توانی حل دقیق مسئله قابل حل است و جمله‌های بعدی نشانگر انحراف از حل دقیق مسئله اولیه است. به طور معمول برای حل پارامتر A از یک سری به صورت زیر می‌توان استفاده کرد:

$$A = A_0 + \varepsilon^1 A_1 + \varepsilon^2 A_2 + \dots \quad (1)$$

در این مثال، A_0 مرتبه صفر و A_1 ، A_2 و ... بیان جمله‌های مرتبه بالا است که به وسیله تکرار یک روند سیستماتیک به دست می‌آید. برای مقدار کوچک ε این جمله‌های مرتبه بالا در این سری به صورت مداوم کوچک‌تر می‌شود [۱۸].

اگر ψ یک خاصیت مسئله باشد می‌توان آن را برحسب عدد نودسن به صورت زیر بسط داد:

$$\psi = \psi_0 + \varepsilon \psi_1 + \varepsilon^2 \psi_2 + \varepsilon^3 \psi_3 + \dots \quad (2)$$

که متناظر با شرایط غیرلغزشی و u, v, w, P, T, \dots و ψ_0 متناظر با شرایط اصلحات مرتبه اول، دوم و سوم هستند [۱۷ و ۱۸]. معادلات حاکم بر مسئله، معادلات مومتم و انرژی به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{V} &= 0 \\ C_p \frac{D\vec{V}}{Dt} &= -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} \\ C_p \frac{DT}{Dt} &= k \nabla^2 T + \phi \end{aligned} \quad (3)$$

که \vec{V} سرعت، μ ویسکوزیته، τ چگالی، P فشار، T دما، k ضریب هدایت حرارتی سیال، C_p ظرفیت حرارتی و ϕ تلفات اصطکاکی در معادله انرژی است که در حالت دوبعدی به صورت رابطه (۴) است:

$$\phi = \mu \left\{ \tau \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

در این رابطه u و v مؤلفه‌های سرعت هستند. شرایط مرزی که برای لغزش سرعت و پرش دما استفاده شده شرایط مرزی مرتبه دو است. سرعت لغزشی به صورت بی‌بعد به صورت رابطه زیر است [۱۷]:

$$U_s - U_w = \frac{\tau - \sigma_v}{\sigma_v} \left[Kn \frac{\partial U}{\partial n} + \frac{1}{\tau} Kn^2 \frac{\partial^2 U}{\partial n^2} \right] \quad (5)$$

در این رابطه n جهت عمود بر دیوار، U_s سرعت لغزشی روی دیوار و U_w سرعت دیوار است. در این پژوهش از بسط سه جمله‌ای اختلال استفاده شده است. معادلات بسط اختلالی سرعت $(\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j})$ ، فشار و دما به صورت زیر برحسب عدد نودسن بیان می‌شوند:

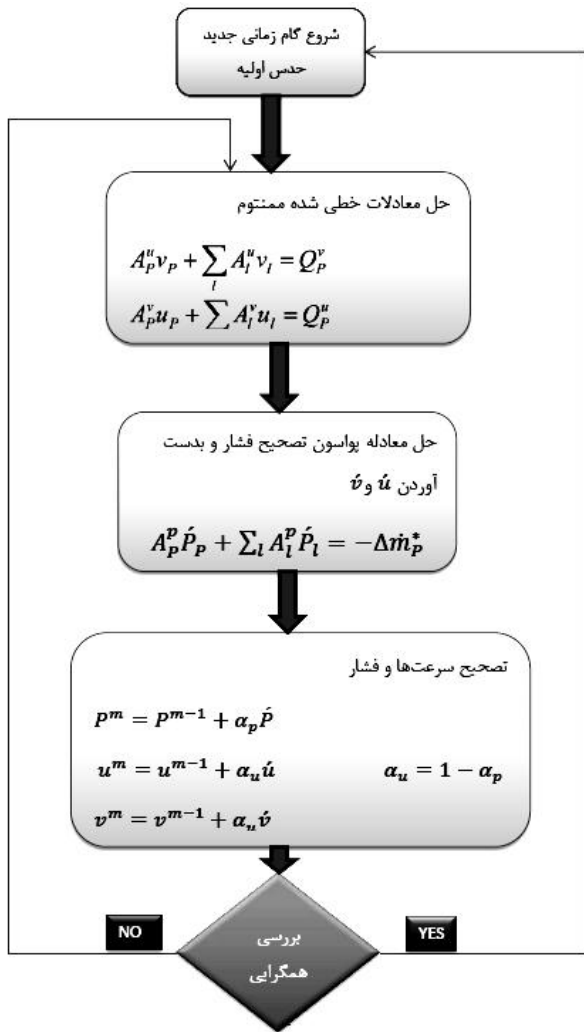
$$\begin{aligned} u &= u_0 + Kn u_1 + Kn^2 u_2 \\ v &= v_0 + Kn v_1 + Kn^2 v_2 \\ P &= P_0 + Kn P_1 + Kn^2 P_2 \\ T &= T_0 + Kn T_1 + Kn^2 T_2 \end{aligned} \quad (6)$$

با جایگذاری معادلات فوق در معادلات ناویر استوکس و انرژی، برحسب هر مرتبه نسبت به عدد نودسن یک معادله به دست می‌آید. برای هرکدام از این معادلات شرایط مرزی جداگانه‌ای به دست می‌آید و با حل هر کدام از معادلات به صورت جداگانه و با جایگذاری آنها در معادلات اختلال خواص مورد نظر به دست می‌آید. معادلات مرتبه صفر به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial \vec{V}_0}{\partial t} + (\vec{V}_0 \cdot \nabla) \vec{V}_0 \right] &= -\nabla P_0 + \mu \nabla^2 \vec{V}_0 \\ C_p \left[\frac{\partial T_0}{\partial t} + \nabla \cdot (T_0 \vec{V}_0) \right] &= k \nabla^2 T_0 + \phi_0 \end{aligned} \quad (7)$$

معادلات مرتبه صفر در واقع همان معادلات ناویر استوکس و انرژی بدون لغزش هستند. ϕ_0 جمله اتلاف ویسکوز براساس سرعت‌های مرتبه صفر است. شرایط مرزی آنها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} U_0|_s &= U_w \\ T_0|_s &= T_w \end{aligned} \quad (8)$$



شکل ۲- الگوریتم روش حل

انتخاب شده یک شبکه 50×450 است.

۵- نتایج

۵-۱- بررسی اثر اتلاف ویسکوز

پارامتر مهمی که در بررسی اثرات اصطکاکی مطرح می‌شود عدد برینکمن (Br) است. عددی که بیانگر نسبت انرژی اتلاف اصطکاکی به هدایتی انرژی به سیال است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} Br_T &= \mu u_m^2 / k(T_o - T_w) \\ Br_H &= \mu u_m^2 / q_w D_h \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن u_m میانگین سرعت در طول کانال است. معادلات مرتبه یک و شرایط مرزی آنها به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \left[\frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} + (\vec{V}_1 \cdot \nabla) \vec{V}_1 + (\vec{V}_o \cdot \nabla) \vec{V}_1 \right] &= -\nabla P_1 + \mu \nabla^2 \vec{V}_1 \\ C_p \left[\frac{\partial T_1}{\partial t} + \nabla \cdot (T_o \vec{V}_1) + \nabla \cdot (T_1 \vec{V}_o) \right] &= k \nabla^2 T_1 + \phi_1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_1|_s &= \frac{\gamma - \nu}{\nu} \left(\frac{\partial U_o}{\partial n} \right) |_s \\ T_1|_s &= \frac{\gamma - T}{T} \left[\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right] \frac{1}{Pr} \left(\frac{\partial T_o}{\partial n} \right) |_s \end{aligned} \quad (10)$$

ϕ_1 بیانگر تلفات ویسکوزیته مرتبه اول و $U_1 = u_1/u_m$ است معادلات مرتبه دو و شرایط مرزی آن به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{V}_r}{\partial t} + (\vec{V}_r \cdot \nabla) \vec{V}_r + (\vec{V}_r \cdot \nabla) \vec{V}_o + (\vec{V}_1 \cdot \nabla) \vec{V}_1 &= -\nabla P_r + \mu \nabla^2 \vec{V}_r \\ C_p \left[\frac{\partial T_r}{\partial t} + \nabla \cdot (T_o \vec{V}_r) + \nabla \cdot (T_r \vec{V}_o) \right. \\ \left. + \nabla \cdot (T_1 \vec{V}_1) + \nabla \cdot (T_o U_1) \right] &= k \nabla^2 T_r + \phi_r \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_r|_s &= \frac{\gamma - \nu}{\nu} \left[\frac{\partial U_1}{\partial n} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 U_o}{\partial n^2} \right] \\ T_r|_s &= \frac{\gamma - T}{T} \left[\frac{\gamma}{1 + \gamma} \right] \frac{1}{Pr} \left[\frac{\partial T_1}{\partial n} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial^2 T_o}{\partial n^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

ϕ_r بیانگر تلفات ویسکوزیته مرتبه دوم و $U_2 = u_2/u_m$ است.

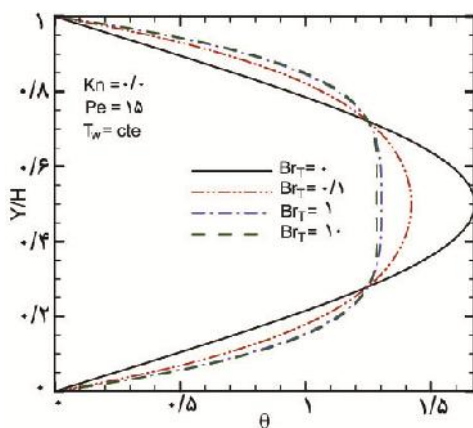
در این مطالعه از روش حجم محدود و الگوریتم سیمپل سی (شناخته شده در CFD) استفاده شده است. در شکل (۲) به صورت اختصار این الگوریتم نشان داده شده است.

۴- مطالعه بر روی شبکه

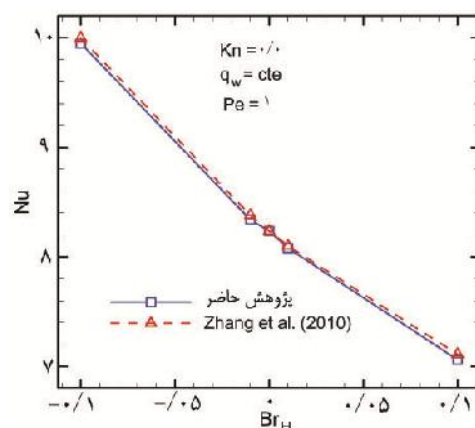
برای اطمینان از جواب لازم است که اثر شبکه بر روی نتایج بررسی شود. در جدول (۱) عدد پواسل و ناسلت با شبکه‌های مختلف نشان داده شده است. در نهایت شبکه

جدول ۱- نتایج مطالعه شبکه

کار حاضر f.Re	تحلیلی	کار حاضر Nu	شبکه
۲۳/۵۲		۱۶/۹	۱۰۰×۱۰
۲۳/۸۲		۱۷/۳۲	۲۰۰×۲۰
۲۳/۹۴		۱۷/۴۱	۳۰۰×۳۰
۲۳/۹۷	۲۴	۱۷/۴۶	۴۰۰×۴۰
۲۳/۹۸		۱۷/۴۸	۴۵۰×۵۰
۲۳/۹۸		۱۷/۴۸	۵۰۰×۶۰



شکل ۴- پروفیل دما در اعداد برینکمن مختلف در حالت عدم لغزش

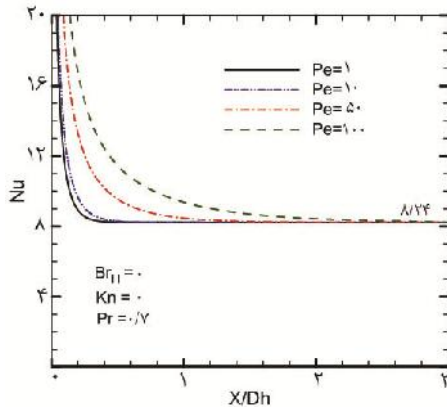


شکل ۳- مقایسه نتایج، عدد ناسلت برحسب عدد برینکمن در حالت شار حرارتی ثابت در $Pe=1$

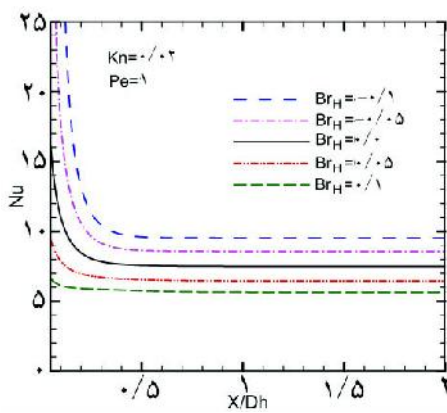
در شکل (۴)، برای نمونه، اثر تلفات اصطکاکی بر پروفیل بی‌بعد دما با شرط مرزی حرارتی دمای سطح ثابت، در مقطعی از کانال که جریان کاملاً توسعه یافته است، دمای بی‌بعد $\theta = \frac{T - T_w}{T_m - T_w}$ ، در اعداد Br مختلف و مثبت (گرمایش، $T_s > T_w$) و در $Kn=0$ ، نشان داده شده است. با توجه به شکل، با افزایش عدد برینکمن پروفیل دما تغییر شکل می‌دهد. تلفات اصطکاکی در نزدیکی دیوار باعث تولید انرژی گرمایی و در نتیجه باعث افزایش دمای سیال و گرادیان دما در مجاورت دیواره شده که در حالت گرمایش، باعث افزایش اختلاف دمای میانگین سیال و دمای دیواره می‌شود و در نتیجه کاهش θ در میانه کانال موجب می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش عدد برینکمن مقدار θ ، بیشتر است.

در روابط بالا Br_T برای حالت شرط مرزی دیواره با دمای ثابت است و Br_H برای حالت شار حرارتی ثابت روی دیوار است. در این روابط T_s دمای ورودی سیال، q_w شار حرارتی روی دیوار و $D_h=2$ قطر هیدرولیکی است.

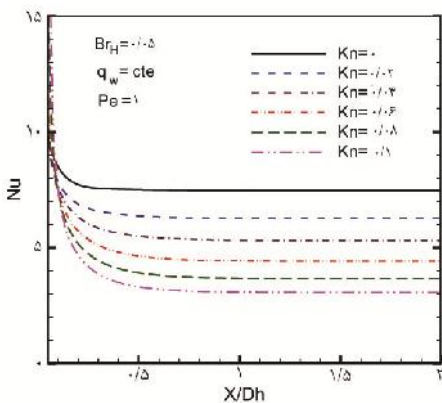
شکل (۳) عدد ناسلت Nu را برحسب Br ، با استفاده از روش ارائه شده در حالت کاملاً توسعه یافته و با شرط مرزی حرارتی شار ثابت و عدد نودسن صفر، نشان می‌دهد. نتایج برای $Pr=0.7$ و عدد پکلت یک ($Pe=Re.Pr$) ارائه شده است. در شکل (۳) عدد برینکمن استفاده شده به صورت $Br_H = \mu u_m^2 / q_w D_h$ تعریف می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود نتایج تطابق خوبی با نتایج ارائه شده توسط ژنگ و همکاران [۱۶] دارد که نشان‌دهنده کارآمدی روش اختلال است.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت در اعداد پکلت مختلف



شکل ۶- تغییرات عدد ناسلت در اعداد برینکمن مختلف در $Pe=1$ و $Kn=0.02$



شکل ۷- تغییرات عدد ناسلت در عددهای نودسن مختلف در $Pe=1$

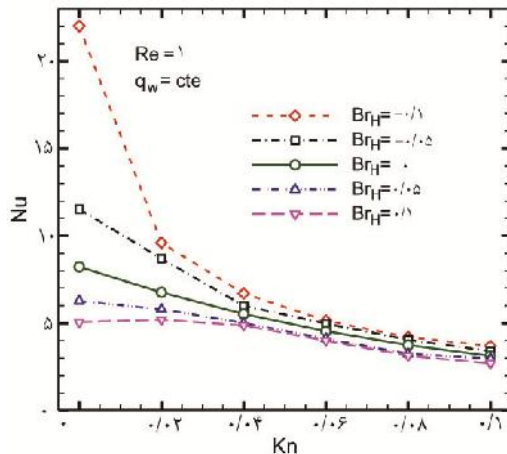
$Br = -0.1$ و $Br = -0.05$ دمای دیواره کمتر از دمای میانگین سیال است، یعنی سیال در حال سرد شدن است. همانطور که قبلاً توضیح داده شد، اثر گرمای ناشی از تلفات اصطکاکی مانند

در شکل (۵) تغییرات Nu در طول کانال، در اعداد پکلت مختلف ($Pe = Re.Pr$) در حالت شار حرارتی ثابت و بدون در نظر گرفتن اثر تلفات اصطکاکی، نمایش داده شده است. در تعریف Re و Nu از قطر هیدرولیکی ($D_h = 2H$) به عنوان طول مشخصه استفاده شده است. همانطور که مشاهده می شود با توسعه یافته شدن جریان مقدار عدد ناسلت به $Nu = 8/24$ میل می کند. در شرط مرزی شار ثابت در حالت توسعه یافته $\partial T/\partial x$ عددی ثابت است و در نتیجه مشتق دوم آن صفر می شود و هدایت محوری اثری بر روی نتیجه نهایی ندارد. تنها اثر عدد پکلت تغییر طول توسعه یافتگی است که با افزایش Pe طول توسعه یافتگی افزایش می یابد.

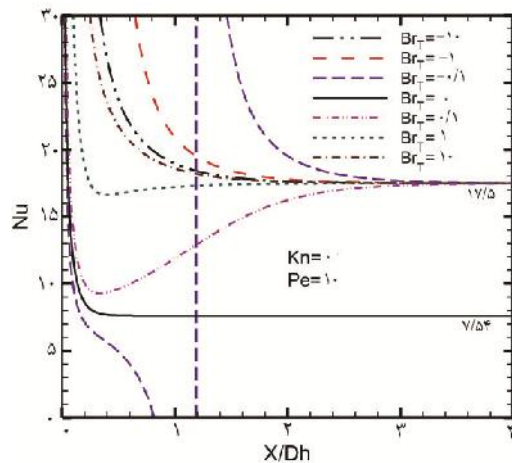
در شکل (۶) تغییرات عدد ناسلت در طول کانال، در اعداد برینکمن مختلف و در $Kn = 0.02$ ، نمایش داده شده است. با توجه به تعریف Br ، عدد برینکمن مثبت در حالت شار ثابت نمایانگر گرمایش سیال است و عدد برینکمن منفی بیانگر سرمایش آن است. با توجه به شکل در حالت گرمایش افزایش عدد برینکمن باعث کاهش عدد ناسلت و در حالت سرمایش عکس این مطلب صادق است.

در شکل (۷) تغییرات عدد ناسلت در طول کانال در اعداد نودسن مختلف با در نظر گرفتن اثر تلفات اصطکاکی نمایش داده شده است. افزایش عدد نودسن باعث کاهش عدد ناسلت می شود و اثر این عدد با اثر تلفات اصطکاکی جمع شده و باعث کاهش بیشتر عدد ناسلت می شود.

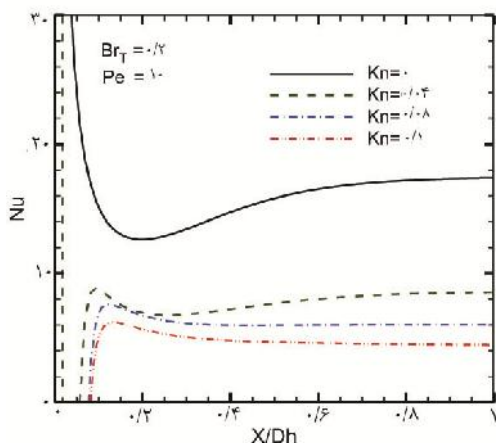
در شکل (۸) تغییرات عدد ناسلت در حالت توسعه یافته بر حسب عدد نودسن، برای اعداد برینکمن مختلف، نشان داده شده است. در این شکل عدد برینکمن به صورت $Br_H = \mu u_m^2 / 2q_w H$ تعریف شده است. برای حالت $Br = 0$ که تلفات اصطکاکی وجود ندارد، عدد ناسلت برای حالت کاملاً توسعه یافته، با افزایش عدد نودسن کاهش می یابد. این کاهش در اینجا ناشی از اثرات رقت است. با افزایش عدد نودسن پخش دما در دیواره بیشتر می شود که باعث افزایش اثرات رقت و کاهش انتقال حرارت در دیواره می شود. برای



شکل ۸- تغییرات عدد ناسلت بر حسب عدد نودسن در اعداد برینکمن مختلف



شکل ۹- تغییرات عدد ناسلت در عداد برینکمن مختلف در حالت دما ثابت



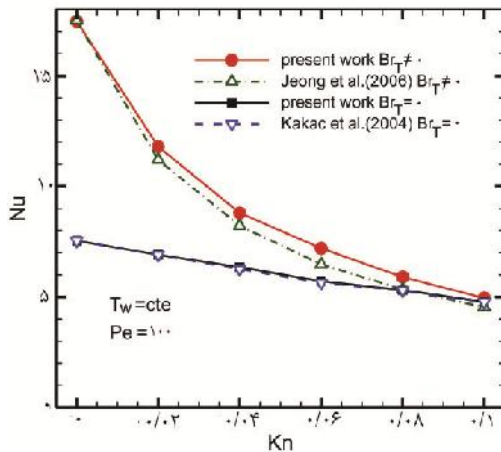
شکل ۱۰- تغییرات عدد ناسلت در $Br_T = 0.2$ و اعداد نودسن مختلف در حالت دما ثابت

یک جمله چشمه است. در حالت برینکمن منفی نیز سیال بر اثر تلفات اصطکاکی، مخصوصاً در نزدیک دیوار، گرم می‌شود. بنابراین اختلاف دما بین دیواره و سیال بیشتر و باعث افزایش انتقال حرارت می‌شود. به این علت در حالت $Br < 0$ ، عدد ناسلت بیشتر از حالت $Br = 0$ است. با این وجود با افزایش عدد نودسن، عدد ناسلت کاهش می‌یابد. برای $Br = 0/1$ و $Br = 0/0.5$ دمای دیواره از دمای سیال بیشتر است، یعنی گاز در حال گرم شدن است. در این حالت نیز گرمای ناشی از تلفات اصطکاکی باعث افزایش دمای سیال می‌شود، در نتیجه اختلاف دمای بین دیواره و سیال کاهش پیدا می‌کند. بنابراین برای حالت $Br > 0$ ، عدد ناسلت از حالت $Br = 0$ کمتر است. در حالت $Br = 0/1$ ، عدد ناسلت ابتدا با افزایش Kn افزایش و سپس کاهش می‌یابد که ناشی از ترکیب اثرات تلفات اصطکاکی و اثر رقت است. همچنین همانطور که از شکل مشخص است با افزایش عدد نودسن، اثر عدد برینکمن بر روی Nu کاهش یافته است.

در شکل (۹) تغییرات Nu در طول کانال، در اثر تلفات اصطکاکی در عدد نودسن صفر در حالت شرط مرزی دما ثابت، برای اعداد برینکمن مختلف نشان داده شده است. با توجه به شکل (۹) درحالی‌که اثر تلفات اصطکاکی در نظر گرفته شده، عدد ناسلت در طول مجرا به‌طور مستقل از عدد برینکمن به سمت یک عدد ($Nu = 17/5$) میل می‌کند. در شکل (۹) برای $Br = -0/1$ نمودار دارای مجانب قائم است، یعنی عدد ناسلت به سمت بی‌نهایت میل کرده است. با توجه به تعریف ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، هنگامی‌که دمای دیواره و دمای میانگین سیال برابر شوند این ضریب به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. لذا این حالت مربوط به وضعیتی است که این دو دما برابر شوند و در نتیجه عدد ناسلت به سمت بی‌نهایت میل پیدا می‌کند (که این اتفاق در $Br = -0/1$ رخ می‌دهد).

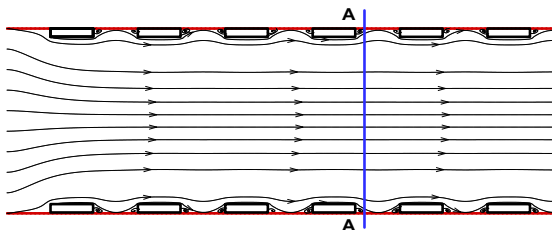
در شکل (۱۰)، در یک عدد برینکمن ثابت ($Br = 0/2$) و در حالت دما دیواره ثابت، اثر تغییر عدد نودسن بر روی تغییرات عدد ناسلت در طول کانال نمایش داده شده است. با توجه به

شکل با افزایش عدد نودسون عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. همچنین در طول کانال ابتدا عدد ناسلت کاهش سپس افزایش می‌یابد. علت این است که هنگامی که در حالت دما ثابت عدد برینکمن مثبت است $(T_0 - T_w \geq 0)$ در طول کانال مقدار دمایی میانگین ابتدا زیاد است، سپس این دما کاهش می‌یابد که باعث می‌شود که ابتدا عدد ناسلت کاهش یابد و پس از آن این عدد افزایش و در نهایت به یک مقدار ثابت برسد.



شکل ۱۱- تغییرات عدد ناسلت برحسب عدد نودسن در $Br_T = 0$ و $Br_T \neq 0$ در حالت دما ثابت و مقایسه با مراجع [۱۹] و [۲۰]

همانطور که قبلاً توضیح داده شد، در حالت دما ثابت، اگر تلفات اصطکاکی در نظر گرفته شود، در حالت توسعه یافته عدد ناسلت از مقدار برینکمن مستقل است و فقط به عدد نودسن بستگی دارد. برای اعداد برینکمن مختلف عدد ناسلت برحسب عدد نودسن در شکل (۱۱)، در حالت توسعه یافته هیدرودینامیکی و حرارتی، نشان داده شده است. در این شکل با توجه به بالا بودن عدد پکلت هدایت محوری اثری روی مسئله ندارد.



شکل ۱۲- خطوط جریان در میکروکانال برای

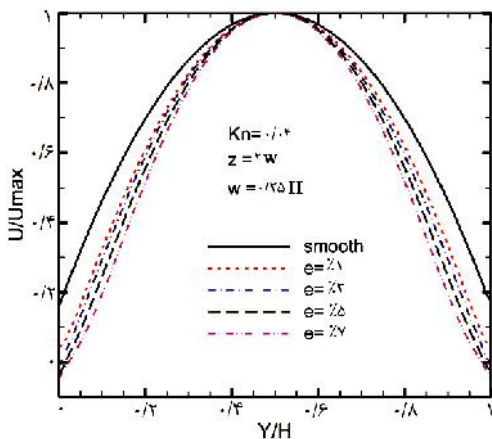
$$z = 2w \text{ و } w = 0.25H, e = 5\%, Re = 1, Kn = 0.04$$

۲-۵- بررسی اثر زبری

در این بخش تأثیر زبری سطح بر روی جریان و انتقال حرارت مورد بررسی قرار می‌گیرد. زبری نسبی به صورت $e = hr/H$ تعریف شده است. شکل (۱) شکل دندانه‌های زبری را، که به صورت مستطیلی با طول w و ارتفاع hr با فاصله منظم z از یکدیگر قرار دارند، نشان می‌دهد. فاصله بین دندانه‌ها برای همه نتایج ثابت در نظر گرفته شده است. عدد پواسل در جریان توسعه یافته، برای حالت دیواره کاملاً صاف با شرط مرزی لغزشی مرتبه دو (معادله (۵))، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$Po = f.Re = \frac{24}{1 + 6(Kn - Kn^2)} \quad (14)$$

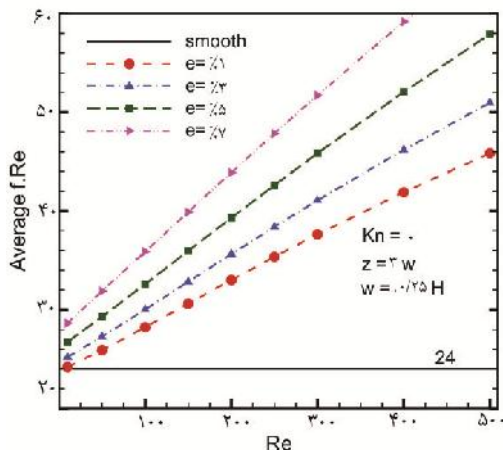
که در آن f ضریب اصطکاک است.



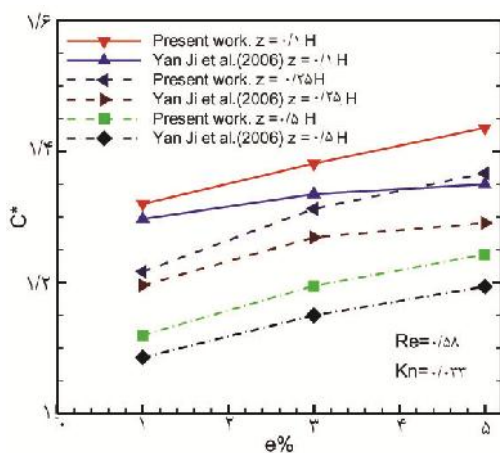
شکل ۱۳- توزیع سرعت در عرض کانال در زبری‌های مختلف

اثر زبری بر روی خطوط جریان در شکل (۱۲) در حالت $Kn = 0.04$ و $e = 5\%$ نمایش داده شده است. حضور دندانه‌های زبری بر روی دیواره باعث اختلال موضعی جریان و تشکیل گردابه‌هایی می‌شود که یکی از عوامل اتلاف انرژی هستند.

در شکل (۱۳) اثر زبری نسبی را بر روی پروفیل سرعت در مقطع A-A شکل (۱۲) برای $Kn = 0.04$ نمایش داده شده است. در این شکل، U_{max} سرعت ماکزیمم روی محور وسط



شکل ۱۴- تغییرات عدد پواسل برحسب عدد رینولدز برای زبری های مختلف در $Kn = 0/0$ و $Z = 3W$



شکل ۱۵- اثر زبری برروی میانگین عدد پواسل

در شکل (۱۶) اثر فاصله بین دندان‌های روی سطح برروی میانگین عدد پواسل در اعداد رینولدز مختلف، نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش فاصله بین دندان‌ها عدد پواسل کاهش پیدا می‌کند. علت این پدیده کاهش تعداد المان‌های زبری است که باعث می‌شود که افت فشار ناشی از دندان‌ها کمتر شود که نتیجه آن افزایش عدد پواسل یا افت فشار است.

شکل (۱۷) اثر عدد رینولدز و فاصله المان‌های زبری برروی عدد پواسل را نشان می‌دهد. با توجه به دو شکل (۱۶) و (۱۷)، با افزایش تراکم دندان‌ها مقدار عدد پواسل افزایش

می‌جرا است. هم‌چنان که از شکل پیدا است زبری باعث کاهش سرعت در نزدیکی دیوار و کاهش سرعت لغزشی در مرز دیواره می‌شود. هم‌چنین با افزایش ارتفاع دندان‌های زبری و یا زبری نسبی، سرعت در مجاورت دیواره در مقطع مورد نظر منفی شده است که ناشی از گردابه‌های شکل گرفته در فضای بین دندان‌هاست. با افزایش ارتفاع دندان‌ها این گردابه‌ها تقویت می‌شوند. لازم به ذکر است که شکل پروفیل‌های سرعت در اعداد نودسن مختلف کاملاً شبیه هم نیستند.

شکل (۱۴) تغییرات عدد پواسل را برحسب عدد رینولدز، در زبری‌های مختلف برای مقطعی از مجرا که جریان توسعه یافته است و در $Kn = 0/0$ ، نشان می‌دهد. همانطور که از معادله (۴) مشخص است در حالت دیواره صاف عدد پواسل (Po) تابع Re نیست، اما در کانال زبر با افزایش عدد رینولدز عدد پواسل نیز افزایش و با افزایش زبری نسبی مقدار آن بیشتر می‌شود. علت آن نیروی درگ فشاری وارده به دندان‌هاست که با نیروی اصطکاکی جمع و باعث افزایش افت فشار در مجرا می‌شود.

C^* به صورت نسبت عدد پواسل کانال زبر به مقدار آن در کانال صاف تعریف می‌شود:

$$C^* = \frac{\text{Average}(f.Re)_{\text{rough}}}{\text{Average}(f.Re)_{\text{smooth}}} \quad (13)$$

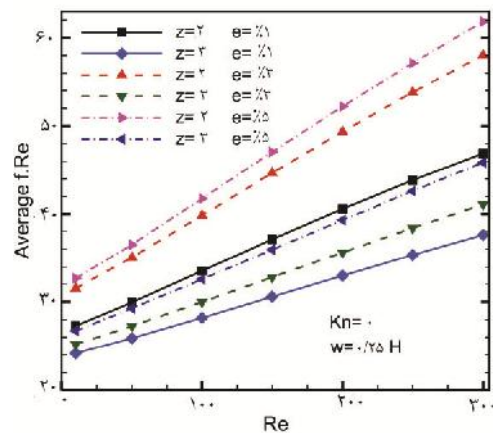
در شکل (۱۵)، C^* برحسب زبری نسبی برای $Kn = 0/0.33$ و $Re = 0/0.58$ و برای سه فاصله دندان‌ها (z) مختلف رسم و با نتایج یان‌جی و همکاران [۱۳] مقایسه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود هر چه فاصله دندان‌ها افزایش پیدا کند مقدار عدد پواسل کمتر می‌شود. هم‌چنین با افزایش زبری نسبی e مقدار C^* افزایش پیدا می‌کند. در شکل (۱۵) تا حدی نتایج به دست آمده نسبت به مرجع ذکر شده دارای اختلاف است. در این مرجع نحوه اعمال شرایط مرزی ذکر نشده است، با توجه به چند روش مختلف در اعمال شرایط، تفاوت در نحوه اعمال شرایط مرزی می‌تواند علت اختلاف باشد. هم‌چنین در صورت اعمال جملات با مراتب بالاتر در بسط اختلالات امکان افزایش دقت نتایج وجود دارد.

می‌یابد. این افزایش در عدد $Kn = 0/0$ کاملاً مشهود است. در شکل (۱۸) تغییرات عدد پواسل برحسب عدد نودسن برای ناحیه توسعه یافته، در حالت دیواره صاف و دیواره زبر، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش زبری نسبی عدد پواسل افزایش پیدا می‌کند. در حالت کانال زبر نیز افزایش عدد نودسن باعث کاهش عدد پواسل می‌شود اما با شیب کمتر این کاهش صورت می‌گیرد.

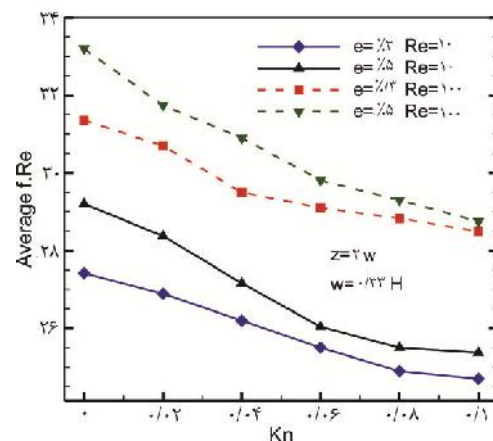
در شکل (۱۹) اثر تغییر ارتفاع دندانها بر عدد ناسلت موضعی در طول کانال نشان داده شده است. با توجه به این شکل با افزایش ارتفاع دندانها عدد ناسلت به‌طور موضعی در روی دندانها افزایش و در قسمت حفره‌ها کاهش پیدا کرده است. این مسئله ناشی از افزایش سرعت در روی نقاط اوج و کاهش سرعت در حفره‌ها است. همچنین با افزایش ارتفاع دندانها کاهش عدد ناسلت در داخل حفره‌ها و افزایش آن در قله‌ها شدیدتر است.

در شکل (۲۰) تغییرات عدد ناسلت در طول کانال برای زبری نسبی ۷٪ در اعداد نودسن مختلف، نمایش داده شده است. با توجه به شکل با افزایش عدد نودسن عدد ناسلت هم در قله‌ها و هم در حفره‌ها کاهش پیدا می‌کند. این مسئله ناشی از اثر پرش دما است. در کانال صاف نیز با افزایش عدد نودسن عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند.

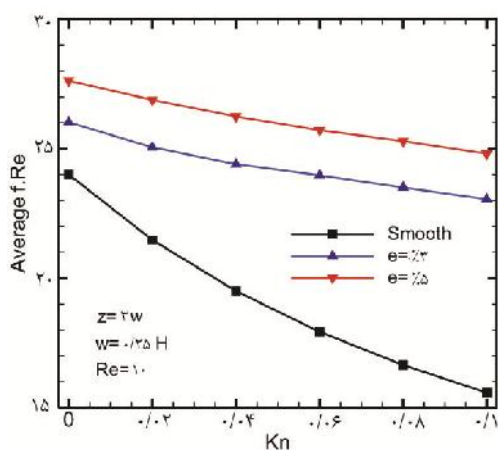
شکل (۲۱) تغییرات عدد ناسلت میانگین را برحسب عدد نودسن نشان می‌دهد. با توجه به شکل با افزایش زبری عدد ناسلت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش ناشی از آن است که افزایش عدد ناسلت موضعی بر روی دندانها بر کاهش آن در حفره‌ها غلبه کرده و در نهایت باعث افزایش عدد ناسلت شده است. با افزایش عدد نودسن عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند و این پدیده هم برای حالت کانال صاف و هم برای حالت کانال زبر اتفاق افتاده است. با توجه به شکل با افزایش عدد نودسن روند کاهش عدد ناسلت میانگین تغییر کرده است. این پدیده نیز می‌تواند ناشی از بزرگ شدن گردابه‌ها در اثر کاهش تنش و افزایش لغزش سرعت با افزایش عدد نودسن باشد.



شکل ۱۶- اثر فاصله المانهای زبری بر روی عدد پواسل



شکل ۱۷- تغییرات عدد پواسل برحسب عدد نودسن در زبری و عدد رینولدز مختلف



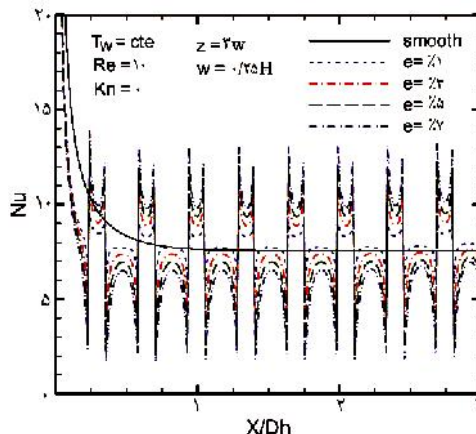
شکل ۱۸- تغییرات عدد پواسل برحسب عدد نودسن در $Re = 10$

۶- نتیجه گیری

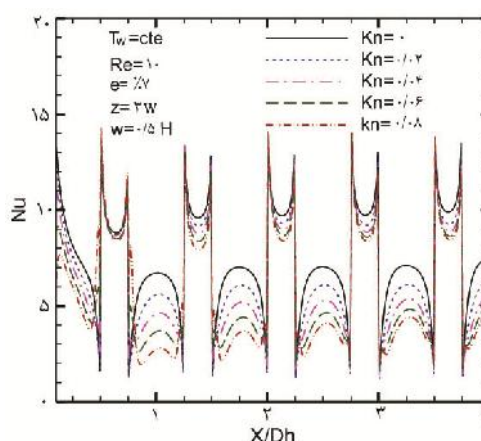
در این مقاله به بررسی جریان در یک میکروکانال که به صورت دو صفحه موازی، در حالت دوبعدی، آرام، در حال توسعه هیدرودینامیکی و حرارتی و در جریان لغزشی به روش بسط اختلالات، پرداخته شده است. در روش بسط اختلالات پارامترهای موردنظر برحسب عدد نودسن بسط داده شده‌اند و به تعداد مرتبه‌های بسط، معادلات ناویر استوکس و انرژی به دست آمده و با حل آنها سرعت، فشار و دما محاسبه شده است.

در این تحقیق اثر تلفات اصطکاکی در دو حالت دما دیوار ثابت و شار حرارتی ثابت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش مورد نظر قابلیت پیش‌بینی مناسب اثر تلفات اصطکاکی در دو حالت گرمایش و سرمایش اثر متفاوتی بر روی عدد ناسلت دارد. در حالت دما ثابت نیز این اثر در ناحیه توسعه یافته مستقل از مقدار عدد برینکمن است. واضح است که صرف نظر کردن از تلفات اصطکاکی باعث ایجاد خطای زیادی در محاسبه عدد ناسلت می‌شود.

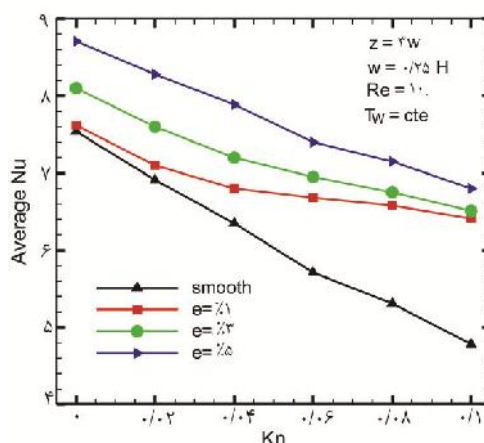
در این مقاله همچنین اثرات زبری بر روی پروفیل سرعت و عدد پواسل در اعداد رینولدز نودسن گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. نوع زبری به صورت دندان‌های مستطیل شکل در نظر گرفته شده است. علاوه بر آن تغییر عدد ناسلت موضعی با تغییر ارتفاع دندان‌های زبری در اعداد نودسن گوناگون با شرط مرزی دما دیواره ثابت بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که روش مورد عددی موردنظر قادر به پیش‌بینی تغییرات فوق است. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده این است که زبری اثر قابل توجهی بر روی پروفیل سرعت جریان داشته و باعث تغییر پروفیل سرعت می‌شود. علاوه بر آن با افزایش زبری عدد پواسل و عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات پارامترهای ذکر شده وابسته به فاصله المان‌های زبری، تراکم آنها و ارتفاع دندان‌های زبری است.



شکل ۱۹- تغییرات عدد ناسلت در طول کانال در $Kn = 0/0$ و برای زبری نسبی مختلف



شکل ۲۰- تغییرات عدد ناسلت در طول کانال در اعداد نودسن مختلف با $e = 7\%$



شکل ۲۱- تغییرات میانگین عدد ناسلت برحسب عدد نودسن در زبری‌های مختلف

1. micro-electronic-mechanical-systems (MEMS)

مراجع

1. Dorin, L., and Adrian E. C., "The Viscous Dissipation Effect on Heat Transfer and Fluid Flow in Micro-Tubes", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 128-1214, 2010.
2. Milton V. D., "*Perturbation Methods in Fluid Mechanics*", Stanford, California, 1975.
3. Koo, J., and Kleinstreuer, C., "Viscous Dissipation Effects in Microtubes and Microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 3159-3169, 2004.
4. Celata, G. P., Morini, G. L., Marconi, V., McPhail, S. J., and Zummo, G., "Using Viscous Heating to Determine the Friction Factor in Microchannels an Experimental Validation", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp. 725-731, 2006.
5. Rands, C., Webb, B. W., and Maynes, D., "Characterization of Transition to Turbulence In microchannels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2924-2930, 2006.
6. Nonino, C., Giudice, S. D., and Savino, S., "Temperature- Dependent Viscosity and Viscous Dissipation Effects in Simultaneously Developing Flows in Micro Channels with Convective Boundary Conditions", *Journal of Heat Transfer*, Vol. 129, pp. 1187-1194, 2007.
7. Hung, Y. M., "A Comparative Study of Viscous Dissipation Effect on Entropy Generation in Single-Phase Liquid Flow in Micro Channels", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1026-1035, 2009.
8. Van Rij, J., Ameer, T., and Harman, T., "The Effect of Viscous Dissipation and Rarefaction on Rectangular Micro Channel Convective Heat Transfer", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 271-281, 2009.
9. Arici, M. E., and Aydin, O., "Conjugate Heat Transfer in Thermally Developing Laminar Flow with Viscous Dissipation Effects", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 1199-1203, 2009.
10. Bing-Yang, C., Min, C., and Guo, Z. Y., "Rarefied Gas Flow in Rough Micro Channels by Molecular Dynamics Simulation", *Chinese Physics Letters*, Vol. 9, No. 21, pp. 1777-1779, 2004.
11. Croce, G., and D'Agaro, P. "Numerical Simulation of Roughness Effect on Micro Channel Heat Transfer and Pressure Drop in Laminar Flow", *Physics*, Vol. 38, pp. 1518-1530, 2005.
12. Shen, S., Xu, J. L., Zhou, J. J., and Chen, Y., "Flow and Heat Transfer in Micro Channels with Rough wall Surface", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp.1311-1325., 2005.
13. Ji, Y., Yuan, K., and Chung, J. N., "Numerical Simulation of Wall Roughness on Gaseous Flow and Heat Transfer in a Micro Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 1329-1339, 2006.
14. Hakak, K., M., Shams., M., and Hossainpour, S., "Effects of Rarefaction and Compressibility on Fluid Flow at Slip Flow Regime by Direct Simulation of Roughness", *International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering*, Vol. 3, pp. 204-210, 2009.
15. Turgay, M. B., and Yazicioglu, A. G., "Effect of Surface Roughness in Parallel-Plate Microchannels on Heat Transfer", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 56, pp. 497-514, 2009.
16. Zhang, C., Chen, Y., and Shi, M., "Effects of Roughness Elements on Laminar Flow and Heat Transfer in Micro Channels", *Chemical Engineering and Processing*, Vol. 49, pp. 1188-1192, 2010.
17. Karniadakis, G., Beskok, A., and Aluru, N., "*Micro flows and Nano flows Fundamentals and Simulations*", Springer, 2004.
18. Cropper W., H., "*The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking*", Great Physicists, Oxford University Press, 2004.
19. Jeong, H., and Jeong, J., "Extended Graetz Problem Including Stream Wise Conduction and Viscous Dissipation in Micro Channel", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 2151-2157, 2006.
20. Kakac, S., Vasiliev., L. L., Bayazitoglu, Y., and Yener, Y., "*Micro Scale Heat Transfer Fundamentals and Applications*", Springer, Cermik, Turkey, 2004.