

بررسی عددی جریان دوفازی جامد-مایع در میکروکانال همگرا-واگرا با استفاده از رهیافت اویلری - اویلری

استادیار، گروه مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گرمسار، گرمسار، ایران،
r.razaghi@iau-garmsar.ac.ir

رضا رزاقی *

دکتری تخصصی مهندسی هوافضا، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، ایران،
farhudshirinzadch@gmail.com

فرهود شیرین زاده

چکیده

انتقال ذرات جامد توسط فاز مایع در میکروکانال‌ها مهمترین مساله در سیستم‌های میکروسیالی و نانوسیالی می‌باشد. میکروکانال‌های همگرا-واگرا در ساخت تجهیزات چون میکروشیورها، میکروسنسورها و میکروفیلترها بکار می‌روند. در این تحقیق شبیه‌سازی عددی سه بعدی بر مبنای رهیافت اویلری-اویلری بر روی جریان دو فازی مایع-جامد در یک میکروکانال همگرا-واگرا با ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر انجام شده است. اندازه ذرات مورد استفاده ۲۰ میکرومتر با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب می‌باشد. نتایج حاصل از مدلسازی نشان می‌دهد بیشترین تجمع ذرات در نواحی نزدیک به دیواره‌ها قبل و بعد از نازل اتفاق افتاده است. در قسمت همگرای نازل با توجه به افزایش سرعت جریان، مقدار تراکم ذرات حتی نزدیک به دیواره‌ها نیز کاهش یافته است. همچنین، با افزایش عدد رینولدز میزان تجمع ذرات در محل ورودی گلوله‌گاه افزایش و به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در مقایسه با پژوهش‌های دیگران، در این تحقیق اثر همگرا-واگرا بودن کانال بر روی تنشینی توده ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از کانال همگرا-واگرا می‌تواند از پدیده مخرب تنشینی کانال جلوگیری کند.

واژه‌های کلیدی: جریان دوفازی مایع-جامد، میکروکانال همگرا-واگرا، شبیه‌سازی عددی، رهیافت اویلری-اویلری، میدان سرعت ذرات، تنشینی.

Numerical Investigation of Solid-Liquid Two Phase Flow in Converging-Diverging Microchannel, Using Eulerian-Eulerian Approach

R. Razaghi

Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Islamic Azad University, Garmsar Branch, Garmsar, Iran

F. Shirinzadeh

Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, West Tehran Branch, Tehran, Iran

Abstract

Solid particles migration in liquid phase through microchannels is considered to be the most important issue in microfluidic systems. Converging-Diverging microchannels are being used in manufacturing the microfluidics tools such as micro-switches, micro-sensors and micro-filters. In this research, 3-D numerical simulation based on Eulerian-Eulerian approach was performed on solid-liquid two-phase flow in a converging-diverging microchannel with 200 μm height. The size of particles used in this research is 20 μm with density of 1.05 gr/cm^3 . The results showed that the most particle accumulations occurred in the regions close to the walls before and after the nozzle, but in the converging part of the nozzle, the amount of particles even near the walls decreased due to the increase in flow velocity. Furthermore, increasing the Reynolds number led to increase in the amount of particles accumulated at the throat and reached its maximum value. Compared with similar studies, this study investigates the effect of converging-diverging geometry of the channel on particle sedimentation. The results show that using converging-diverging channel provides the possibility to prevent the destructive phenomenon of channel blockage.

Keywords: Solid-Liquid Two Phase Flow, Converging-Diverging Microchannel, Numerical Simulation, Eulerian-Eulerian Approach, Particle Velocity Domain, Sedimentation.

مرتبط با ایروسل‌ها بکار می‌روند [۲]. با گسترش پژوهش‌ها در زمینه ابزارهای میکروسیالی، علاقمندی به مطالعه در خصوص جریان‌های با رینولدز پایین بین محققان افزایش پیدا کرد [۳]. جریان‌های میکروسیالی به طور کلی به صورت انتقال سیالات و سوسپانسیون‌ها در میکروکانال‌هایی با ضریب منطری بالا و ابعاد سطح مقطع ده‌ها و یا صدها برابر میکرون و طول از مرتبه سانتی‌متر تعریف می‌شوند [۴]. استفاده از سیستم‌های میکروسیالی دارای فواید زیادی از جمله اندازه کوچکتر نمونه‌ها، زمان سریعتر آنالیز، استفاده کمتر از مواد و همچنین نوع کاربرد که در آن می‌بایست ابزارها و کانال‌ها کوچک باشند را دراست [۵]. به دلیل آنکه سطح مقطع جریان در سیستم‌های

۱- مقدمه

انتقال ذرات جامد توسط فاز مایع در میکروکانال‌ها، مهمترین مساله در سیستم‌های میکروسیالی و نانوسیالی می‌باشد [۱]. سیستم‌های آزمایشگاه روی تراشه، جریان بایومولکولی در میکروکانال‌ها و میکروکاپیلاری‌ها، جریان‌های متخلخل، آنالیز کروماتوگرافی و جداسازی غشاهای فازی شامل پدیده انتقال ذرات جامد توسط مایع در میکروکانال‌ها می‌باشند [۱]. میکروکانال‌های همگرا-واگرا در ساخت تجهیزات چون میکروشیورها، میکروسنسورها، میکروفیلترها و تجهیزات

¹ laboratory-on-chip

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: r.razaghi@iau-garmsar.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۳/۰۷

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۱/۱۸

میکروسایالی بسیار کوچک است لذا رژیم جریان در اینگونه سیستم ها اغلب لایه‌ای و عدد رینولدز پایین است [۶].

عمده ترین رهیافت های مدل سازی پراکندگی ذرات داخل یک فاز حامل عبارت است از شبیه سازی مستقیم عددی، روش اولبری-اولبری و اولبری-لاگرانژی. رهیافت شبیه سازی مستقیم عددی معادلات حاکم بر جریان را بدون هیچگونه فرض ساده سازی حل می نماید. استفاده از این رهیافت در جریان داخل کانال توسط پن و بنرجی [۷] در سال ۱۹۹۷ بر اساس دینامیک استوکس ذرات انجام شده است. به دلیل آنکه روش شبیه سازی مستقیم هزینه بالایی از لحاظ زمان و میزان محاسبات نسبت به رهیافت های دیگر دارد لذا، معمولاً از رهیافت های دیگر به منظور شبیه سازی جریان های دوفازی استفاده می گردد. فو زودونگ و ونگ [۸] در سال ۲۰۰۱ یک مدل ریاضی را به منظور تخمین جریان رقیق جامد-مایع در یک لوله افقی با سطح مقطع مربعی توسعه دادند و نتایج کار خود را با اندازه گیری های لیزر مقایسه نمودند. مدل آنها دو پارامتر توزیع غلظت ذرات و همچنین توزیع نوسانات انرژی ذرات را به خوبی پیش بینی می نمود. نتایج حاصله نشان می داد که در قسمت مرکزی لوله سرعت متوسط ذرات از سرعت مایع حامل کمتر بود اما در نزدیکی دیواره پایینی لوله این امر کاملاً بالعکس می گردید. استابن و همکاران [۹] در سال ۲۰۰۳ اثرات مربوط به ارتفاع کانال را بر روی ذرات کروی در داخل یک کانال مستطیلی و جریان پوازی از طریق حل عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان می دهد که هر دو سرعت انتقالی و چرخشی ذرات تحت تأثیر دیواره ها قرار دارد. درکسن [۱۰] در سال ۲۰۱۲ برهمکنش غلیظ سوسپانسیون جامد-مایع را مورد مطالعه قرار داد. نتایج مطالعات نشان می داد که در جریان های غلیظ با غلظت حجمی حداقل ۱۰ درصد، اثرات جانبی نظیر توزیع غیرهمگن ذرات جامد، غیر نیوتنی بودن جریان و چسبندگی ذرات غیر قابل صرف نظر کردن است.

وانگ و همکاران [۱۱] در سال ۲۰۱۳ سه روش شبکه بولتزمن را به منظور ارزیابی جریان سوسپانسیون ذرات ارائه نمودند. ارزیابی و مقایسه سه روش باتنگار-گروس-کروک، لاد^۱ و MRT^۲ جهت مدل سازی جریان سیال با ذرات سائز محدود در این مقاله بررسی شده است. ته نشینی یک ذره کروی در یک کانال دو بعدی تحت اثر نیروی گرانشی برای آزمون اول مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج عددی سه روش فوق با نتایج تحلیلی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که در طرح های باتنگار-گروس-کروک و لاد انحرافات در مقایسه با حل تحلیلی وجود دارد ولی روش MRT^۲ کارایی محاسباتی بهتری نسبت به دو طرح دیگر دارد. نیکوباشمن [۱۲] در سال ۲۰۱۳ رفتار یک تک ذره کروی در جریان پوازی در داخل یک کانال مستطیلی توسط روش عددی دینامیک برخورد چند ذره ای^۳ مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل مطابقت خوبی با نتایج کار استابن در سال ۲۰۰۵ دارد.

رزاقی و سعیدی [۱۳] در سال ۲۰۱۶ رفتار ذرات میکرونی را در سوسپانسیون رقیق داخل یک میکروکانال با ارتفاع ۲۳۰ میکرومتر به

صورت تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آزمایشات نشان می داد که سرعت لغزشی ذرات در وسط کانال کمترین و کنار دیواره ها بیشترین مقدار را دارد. همینطور با افزایش قطر ذرات سرعت لغزشی ذرات افزایش می یابد. همچنین، آنها توانستند نیروی برآ و پسی وارد بر ذرات را از طریق نتایج تجربی و آنالیز تحلیلی بدست بیاورند. نتایج آنها تطابق قابل قبولی با مدل سازی های عددی داشت [۱۴]. همچنین، رزاقی و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۱۷ رفتار ذرات میکرونی در داخل میکروکانال را از طریق رهیافت اولبری-اولبری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش عدد رینولدز باعث افزایش کسر حجمی ذرات نزدیک دیواره پایینی کانال می شود. شیرین زاده و سعیدی [۱۶] در سال ۲۰۱۷ رفتار ذرات میکرونی را داخل یک میکروکانال همگرا-واگرا به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیقات نشان می داد که در میکروکانال همگرا-واگرا پدیده ته نشینی به دلیل شتاب گرفتن ذرات در ناحیه همگرا ۴۵ درصد کمتر نسبت به میکروکانال مستقیم می باشد. همچنین، رزاقی و شیرین زاده [۱۷] در سال ۲۰۲۰ شبیه سازی عددی بر مبنای رهیافت اولبری-لاگرانژی به منظور بررسی رفتار ذرات میکرونی را در داخل یک میکروکانال همگرا-واگرا انجام دادند که نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج تجربی [۱۶] داشت. تانو و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۱۸ رفتار هیدرودینامیکی جریان های سیالاتی را در میکروکانال های همگرا-واگرا در شرایط اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج کار آنها منجر به معرفی عدد بدون بعد جدیدی به منظور تعریف جریان لایه ای داخل میکروکانال های همگرا-واگرا بدون در نظر گرفتن هندسه کانال گردید. ژو و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۹ حرکت ذرات را در داخل یک میکروکانال همگرا-واگرا از طریق نیروی رانش الکتروفوریتیک^۴ مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می داد که ذرات با پتانسیل غیر یکنواخت سطح توانایی عبور از گلوگاه میکروکانال را دارا هستند. شرف و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۱۹ رفتار هیدرودینامیکی و انتقال نانوذرات را از طریق انتقال گرمای همرفتی در داخل یک میکروکانال از طریق رهیافت اولبری-لاگرانژی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می داد که در اعداد رینولدز پایین توزیع سرعت نانو ذرات در نزدیکی دیواره ها به صورت یکنواخت بوده اما در اعداد رینولدز بالاتر رفتار غیر یکنواخت-تری از نانو ذرات مشاهده گردیده است. تانو و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۰ یک میکروکانال همگرا-واگرا به منظور یکسو کردن جریان های سیالاتی نیوتنی ساختند. درجه یکسوکندگی اندازه گیری شده برای جریان ۱/۷۷ بود که حدوداً ۱۵ الی ۵۵ درصد بیشتر از میکروکانال های مشابه بود. همچنین، نتایج عددی مدل سازی های انجام شده بر روی این میکروکانال تطابق قابل قبولی با آزمایشات تجربی داشت.

هدف اصلی این مقاله بررسی عددی انتقال توده ای ذرات میکرونی کروی با غلظت بالا در داخل میکروکانال همگرا-واگرا در جریان پوازی با عدد رینولدز پایین و عوامل موثر بر آن می باشد. یکی از عوامل مهم در انتقال ذرات میکرونی در میکروکانال ها اثرات برهمکنش دیواره-ذره بوده که سبب تغییر سرعت نسبی ذرات می شود. انتقال صحیح ذرات در جریان های با رژیم لایه ای و رینولدز پایین نیازمند

1 Ladd
2 Multiple- relaxation time
3 Multi- particle collision dynamics (MPCD)

4 Electrophoretic

که در آن، f شامل ضریب پسا C_D است که این ضریب بر پایه عدد رینولدز نسبی Re_s می‌باشد. تابع پسا f در مدل‌های مختلف ضریب تبدیل متفاوت است. τ_p زمان آسایش ذره می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\tau_p = \frac{\rho_q d_p^2}{18\mu_q} \quad (7)$$

به طور کلی در جریان‌های حاوی ذره نیروهای مختلفی از جمله نیروی گرانشی، شناوری، مغناطیسی، الکترواستاتیک، جرم مجازی، آکوستیک، براونی، گرادیان فشار، برآ و پسا می‌تواند به ذره وارد شود. در پژوهش حاضر با توجه به اینکه اندازه ذرات مورد بررسی از ابعاد میکرون بوده، چگالی ذره و مایع حامل یکسان بوده، سرعت ذرات بسیار کم است و همچنین از نیروهای خارجی وارد بر ذره نظیر نیروهای مغناطیسی و آکوستیک صرفنظر گردیده است، لذا نیروهای براونی، شناوری، جرم مجازی، مغناطیسی و آکوستیک از معادلات حاکم حذف شده و صرفاً نیروهای ناشی از گرادیان فشار، گرانش، پسا و برآ، جرم مجازی و پراکندگی توربولانسی مورد بررسی قرار گرفته است.

اثر روانکاری دیواره مهم‌ترین مفهوم در برهمکنش بین ذره و دیواره در جریان های دو فازی مایع-جامد در کانال‌ها (خصوصاً میکروکانال‌ها) می‌باشد. نظریه روانکاری در واقع بیان کننده این واقعیت است که دو ذره جامد با سطوح بسیار صاف و صیقل (که معمولاً در مدلسازی ها به کار می رود) در یک جریان کاملاً برشی تحت نیروهای محدود هرگز با یکدیگر تماس پیدا نخواهند کرد. اگرچه در مدل‌های فیزیکی واقعی زبری‌های میکروسکوپی موجود بر روی دیواره‌های ذره و دیواره باعث تماس ذره و دیواره می گردد. لذا به دلیل وجود این واقعیت و به منظور افزایش دقت در مدلسازی های تحلیلی، مدلی به نام نیرو-تماس می‌بایست در حرکت یک ذره نزدیک یک دیواره صلب زمانیکه ذره با دیواره در تماس است تعریف گردد. مقدار کمی این مدل بستگی به زبری هیدرودینامیکی ذره دارد که معیاری برای اندازه‌گیری زبری موثر سطحی است که در داخل یک مایع قرار دارد. پراکنده شدن ذرات ناشی از تلاطم در فاز سیال را می توان با استفاده از مدل ابری ذرات پیش بینی نمود. این مدل شامل اثر نوسانات سرعت آشفته لحظه‌ای بر مسیر حرکت ذرات از طریق استفاده از روش‌های تصادفی است. هنگامی که ذره جامدی داخل یک سیال دارای حرکت شتاب‌دار باشد حرکت ذره جامد تحت تأثیر حرکت سیال خواهد بود. یعنی اگر ذره با حجم V در یک سیال حرکت کند سیال باید به اندازه حجم V جابجا شود تا جسم بتواند به حرکت خود ادامه دهد و این باعث می‌شود تا اینرسی اضافه‌ای را در محاسبات برای جرم آن جامد در نظر گرفته شود که به آن جرم افزوده یا جرم مجازی می‌گویند.

۳- مدلسازی عددی

۳-۱-۳ مدل هندسی

جریان حاوی ذره مورد بررسی در این پژوهش جریان استوکس با عدد رینولدز کمتر از یک می باشد. همچنین به دلیل لایه ای بودن جریان و اینکه ارتفاع کانال از ابعاد میکرومتر می‌باشد، می توان از اثرات توربولانسی جریان صرفنظر نمود. کانال مورد بررسی مستطیلی همگرا-

درک صحیح کیفی و کمی از اثرات سطحی جریان خصوصاً اثرات دیواره است. چه آنکه، میزان و کیفیت این عوامل، تأثیر قابل توجهی بر روی پارامترهای ورودی جریان نظیر عدد رینولدز، هندسه جریان و نسبت اندازه قطر ذره به ارتفاع کانال خواهد داشت. از نوآوری‌های این تحقیق بررسی اثر همگرا-واگرایی کانال بر تنشینی توده ذرات میکرونی و در نتیجه پدیده مخرب گرفتگی میکروکانال می باشد.

۲- معادلات حاکم

در دیدگاه اویلری-اویلری ذرات مانند یک فاز پیوسته مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این دیدگاه مجموعه‌ای از n معادله اندازه حرکت و پیوستگی برای هر فاز حل می‌شود و وابستگی میان فازها از طریق فشار و ضرایب انتقال فاز میانی در نظر گرفته می‌شود. تشریح جریان چندفازی به‌عنوان محیط‌هایی که می‌توانند در یکدیگر نفوذ کنند، مفهوم کسر حجمی را که با α_q نشان داده می‌شود، معرفی می‌کند. کسر حجمی بیان کننده فضای اشغال شده به‌وسیله هر فاز می‌باشد و قوانین بقا جرم و مومنتم به‌وسیله هر فاز به‌طور جداگانه ارضا می‌شوند. استخراج معادلات بقا را می‌توان با متوسط‌گیری کلی از فرمولاسیون موضعی لحظه‌ای برای هر فاز انجام داد. حجم فاز q ، V_q را می‌توان به‌صورت زیر تعریف نمود [۲۲]:

$$V_q = \int \alpha_q dV \quad (1)$$

که در آن، α_q کسر حجمی و V حجم فاز q می‌باشد. باید توجه داشت که مجموع کسر حجمی همه‌ی فازها برابر یک است [۲۲]:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

بر اساس مقادیر محلی بر اساس مقادیر محلی α_q ، خصوصیات و متغیرهای مناسب برای هر حجم کنترل در داخل ناحیه محاسباتی در نظر گرفته می‌شود. برای مثال چگالی مؤثر فاز q به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$\rho_q = \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

که در آن، ρ_q چگالی فاز q می‌باشد. معادلات پیوستگی و اندازه حرکت برای فازهای مختلف به ترتیب به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q \bar{v}_q) = -\alpha_q \nabla \cdot p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} + \sum_{p=1}^n (\bar{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \bar{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \bar{v}_{qp}) + (\bar{F}_{lift,q} + \bar{F}_{Vnq}) \quad (5)$$

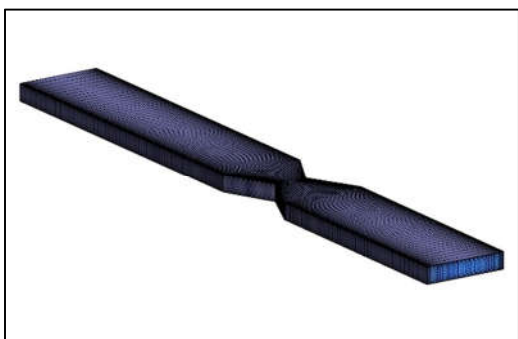
که در آن، \bar{v}_q بردار سرعت فاز q ، \dot{m} دبی جرمی، S_q جمله منبع، $\bar{\tau}_q$ تانسور تنش-کرنش، \bar{F}_q نیروی حجمی خارجی، \bar{R}_{pq} نیروی برهم‌کنش بین دوفاز، p فشار و \bar{g} شتاب گرانش می‌باشد. معادلات (۴) و (۵) می‌بایست با استفاده از عبارت مناسب برای نیروی برهم‌کنش میان فازها \bar{R}_{pq} بسته شود. این نیرو به اصطکاک، فشار، چسبندگی و دیگر اثرات بستگی دارد. این نیرو تحت شرایط $\bar{R}_{pq} = -\bar{R}_{qp}$ و $\bar{R}_{qq} = 0$ قرار دارد.

ضریب تبادل اندازه‌حرکت مایع-جامد، K_{pq} را می‌توان به فرم کلی زیر نوشت [۲۳]:

$$k_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_q f}{\tau_p} \quad (6)$$

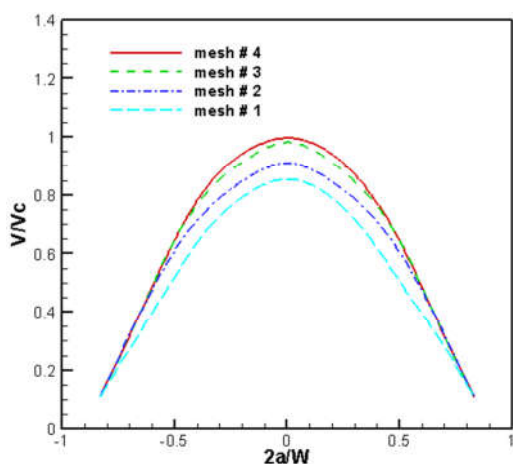
۲-۳- شبکه بندی و شرایط مرزی

همانطور که در شکل ۳ ملاحظه می گردد به منظور حل عددی جریان داخل میکروکانال از یک شبکه با سازمان مستطیلی با در نظر گرفتن لایه مرزی استفاده گردیده است. حداکثر فاصله بین دو گره ۱۰ میکرومتر می باشد به منظور انجام شبیه سازی دقیق می بایست ۵ گره داخل هر ذره قرار گرفته باشد که به دلیل اینکه قطر ذرات ۲۰ میکرومتر می باشد در بدترین حالت ۵ گره داخل ذرات قرار می گیرد.



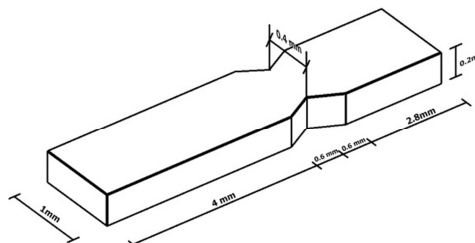
شکل ۳- شبکه بندی میکروکانال مورد مطالعه

به منظور بهینه سازی شبکه از چهار شبکه بندی متفاوت مطابق شکل ۴ استفاده شده است. شکل ۴ نشان دهنده نمودار سرعت ذره نسبت به سرعت سیال در وسط کانال مستقیم بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی برای هر چهار شبکه بندی انجام شده می باشد. به علت افزایش خطا و تغییرات کم سرعت (کمتر از ۲ درصد) ریزتر کردن بیش از اندازه شبکه از شبکه ۳ به ۴ درست نمی باشد. مشخصات هر یک از شبکه بندی ها به همراه مقادیر $\frac{V}{V_c}$ در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۴- نتایج عددی نسبت سرعت ذرات به سرعت سیال، $\frac{V}{V_c}$ بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی، $\frac{2a}{W}$ ، برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر در عرض کانال مستقیم ($z = 0$) به منظور بدست آوردن شبکه بهینه

واگرا بوده و دارای یک ورودی و خروجی می باشد. خروجی کانال در فشار اتمسفر قرار دارد. طرحواره کانال در شکل ۱ ارائه شده است.



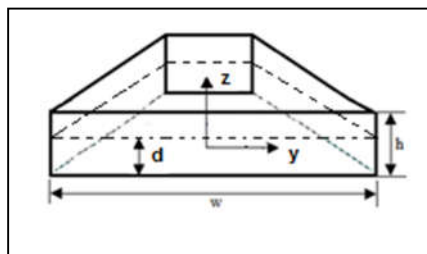
شکل ۱- طرحواره کانال همگرا-واگرا با مقطع مستطیلی

ذرات مورد استفاده در این بررسی کاملاً کروی بوده و از اثرات غیر کروی بودن ذرات صرف نظر می گردد. همچنین، جنس ذرات مورد استفاده پلی استایرن و بدون بار بوده و لذا از اثرات مربوط به نیروهای سطحی صرف نظر می گردد. مشخصات کانال و ذرات مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی مدل و ذره

ردیف	شرح	مقدار
۱	طول کانال (L)	۸ (mm)
۲	عرض کانال (W)	۱ (mm)
۳	ارتفاع کانال (H)	۲۰۰ (μm)
۴	قطر ذرات (d_p)	۲۰ (μm)
۵	کسر حجمی ذرات (α_p)	۰/۱۵
۶	عدد رینولدز (Re)	۰/۰۰۵
۷	چگالی ذرات (ρ_p)	۱۰۵۰ ($\frac{kg}{m^3}$)
۸	چگالی سیال حامل (ρ_f)	۱۰۵۰ ($\frac{kg}{m^3}$)
۹	نسبت مساحت بخش همگرا	۰/۴
۱۰	سرعت ورودی	۳۵/۷۱ ($\frac{\mu m}{s}$)

شکل ۲ یک میکروکانال همگرا-واگرا نشان می دهد. در این تحقیق فاصله هر صفحه دوطرفه از کانال تا دیواره پایین با a و d نشان داده شده که به ترتیب با ارتفاع کل کانال H و عرض کانال w بدون بعد شده است. V_c و V_s به ترتیب نشان دهنده سرعت سیال در غیاب ذرات و سرعت ذرات در قسمت مستقیم کانال می باشد.



شکل ۲- طرحواره صفحات داخل کانال

جدول ۲- شبکه بندی های متفاوت به منظور بدست آوردن شبکه

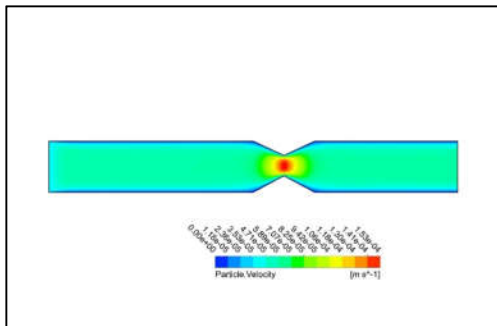
شماره شبکه	گره
۱	۳۸۲۲۳
۲	۴۱۵۵۳
۳	۴۸۲۷۹
۴	۵۴۲۷۳

۴- نتایج و بحث

در این قسمت از مقاله به بررسی تأثیر هندسه کانال بر سرعت ذرات و همچنین، تأثیر کسر حجمی ذرات و عدد رینولدز بر تجمع ذرات و در نهایت ته نشینی ذرات در ارتفاع های مختلف کانال پرداخته می شود.

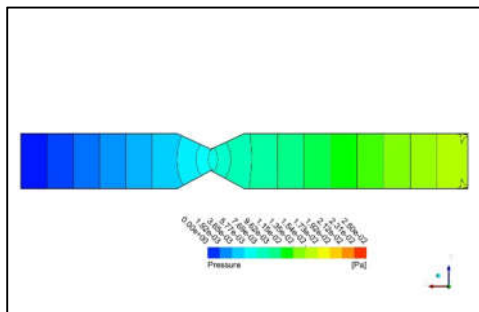
۴-۱- کانتور سرعت و فشار ذرات

کانتور سرعت و فشار جریان به ترتیب در صفحه برش خورده در مرکز کانال در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۶ پیداست، ذرات در مقطع همگرای کانال افزایش سرعت و در گلوگاه بیشینه سرعت $1.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ را داشته و سپس در مقطع واگرا کاهش سرعت پیدا می کنند. نتایج نشان می دهد که این افزایش سرعت می تواند باعث عدم پدیده مخرب ته نشینی در میکروکانالها گردد.



شکل ۶- کانتور سرعت ذرات در صفحه برش خورده از مرکز کانال

کانتور فشار جریان در شکل ۷ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که افت فشار در طول کانال همگرا- واگرا ناچیز بوده است.



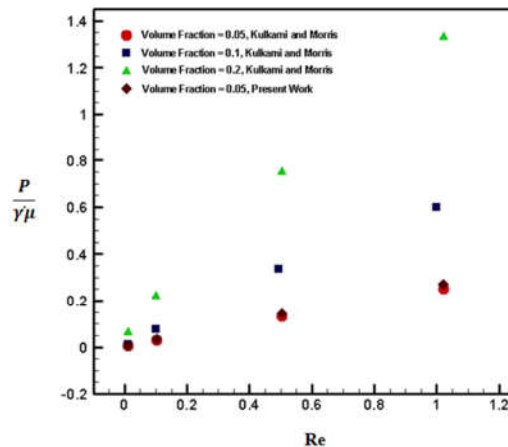
شکل ۷- کانتور فشار جریان در صفحه برش خورده از مرکز کانال

پروفیل سرعت ذرات در ارتفاع های مختلف کانال در شکل های ۸ الی ۱۰ به ترتیب در $\frac{d}{H} = 0.1$ و $\frac{d}{H} = 0.3$ ، $\frac{d}{H} = 0.5$ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که در ارتفاع های پایین کانال و نواحی نزدیک به دیواره به دلیل تأثیرات دیواره بر ذرات و افزایش تنش برشی وارده بر ذرات، از سرعت ذرات کاسته شده و ذرات تمایل بیشتر به ته نشینی دارند.

تمام محاسبات در نرم افزار Ansys Fluent انجام شده است. بدین منظور از حل کننده تفکیکی^۱ برای حل معادلات حاکم بر سیال و برای خطی سازی معادلات حاکم از فرم ضمنی^۲ استفاده شده است. برای همه معادلات انتقال، ترم های جابجایی و دیفیوژن طبق طرح گسسته-سازي قاعده توانی گسسته شده است. اتصال فشار و سرعت به وسیله الگوریتم SIMPLE انجام شده است. به منظور مدل سازی حرکت ذرات در داخل سیال حامل از رهیافت اوپلری-اوپلری^۳ استفاده شده است. در ورودی کانال شرط مرزی سرعت ورودی، در خروجی شرط مرزی فشار خروجی و بر روی دیواره ها شرط عدم لغزش در مدل سازی عددی لحاظ گردیده است.

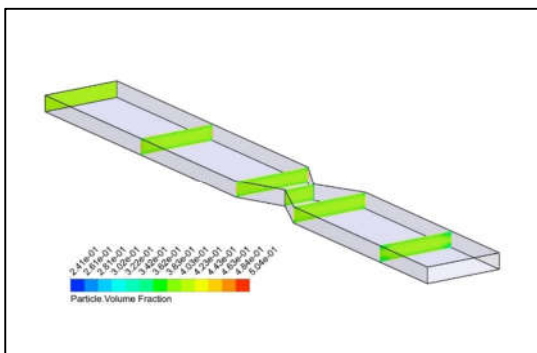
۳-۳- صحت سنجی مدل عددی

با توجه به در دسترس نبودن کارهای تجربی در کانال همگرا-واگرا، نتایج با حل عددی در دسترس کانال مستقیم با مقطع مستطیلی [۲۴] ارزیابی شده است. در شکل ۵ فشار ذرات در رینولدزهای مختلف و کسر حجمی های متفاوت با کار عددی به روش لئیس-بولتزمن مورد ارزیابی قرار گرفته و حاکی از تطابق قابل قبول فشار ذرات در رینولدزهای متفاوت را دارد.

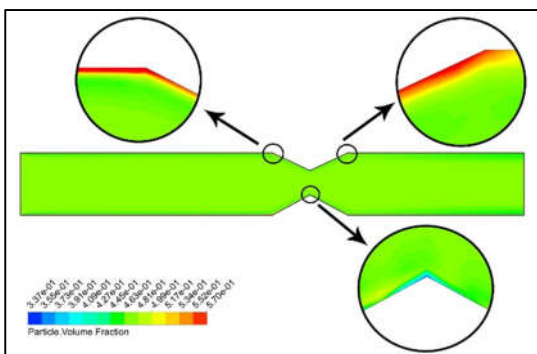


شکل ۵- فشار ذرات بر حسب عدد رینولدز

- 1 Pressure-Based
- 2 Implicit
- 3 Eulerian-Eulerian Approach (E-E)



شکل ۱۱- پروفیل کسر حجمی ذرات در مقاطع مختلف میکروکانال

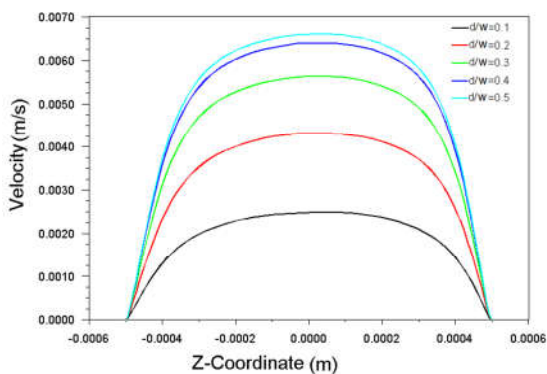


شکل ۱۲- کانتور کسر حجمی ذرات در صفحه برش خورده از مرکز کانال در عدد رینولدز ۰/۵

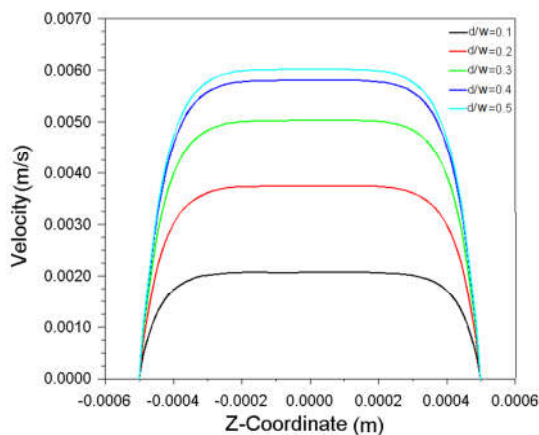
همانطور که در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ملاحظه می‌شود تجمع ذرات به دلیل شرط عدم لغزش بیشتر نزدیک دیواره‌ها اتفاق افتاده است. در قسمت همگرای نازل با توجه به افزایش سرعت جریان، مقدار تراکم ذرات حتی نزدیک به دیواره‌ها کاهش یافته است. دلیل دیگری نیز می‌توان به برابر بودن چگالی ذرات و سیال اشاره کرد. این عامل باعث می‌شود تأثیر ته‌نشینی ذرات با توجه به شتاب جاذبه کمتر شده یا به عبارتی وجود نداشته باشد.

۳-۴- تأثیر عدد رینولدز بر تجمع ذرات

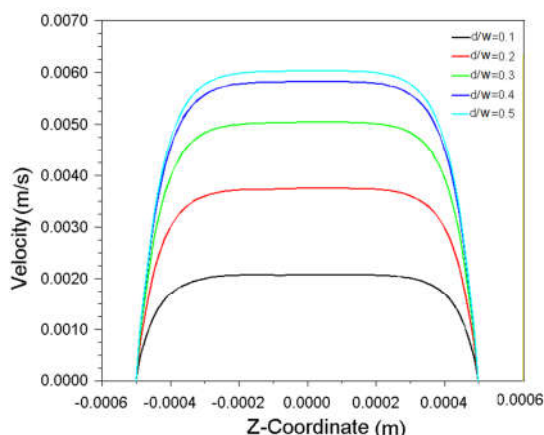
به منظور بررسی تأثیر عدد رینولدز بر میزان حداکثری تجمع ذرات در میکروکانال همگرا-واگرا جریان دو فاز مایع-جامد در سه عدد رینولدز ۰/۵، ۵۰ و ۱۰۰ شبیه‌سازی گردیده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز میزان تجمع ذرات در محل ورودی گلوگاه افزایش و به بیشینه مقدار خود می‌رسد. همچنین با افزایش عدد رینولدز از میزان ته‌نشینی ذرات در دیواره پایینی کانال کاسته شده است. به منظور بهتر نشان دادن نتایج، تجمع ذرات در سه عدد رینولدز ۰/۵، ۵۰ و ۱۰۰ در شکل ۱۵ به صورت تجمعی ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد در رینولدزهای پایین تجمع ذرات بیشتر در نزدیکی دیواره‌ها اتفاق افتاده ولی در رینولدزهای بالاتر از یک تجمع ذرات نزدیک دیواره بسیار کاهش پیدا کرده است.



شکل ۸- سرعت ذرات در مرکز کانال در عرض‌های مختلف، $\frac{d}{H} = 0/5$



شکل ۹- سرعت ذرات در مرکز کانال در عرض‌های مختلف، $\frac{d}{H} = 0/3$

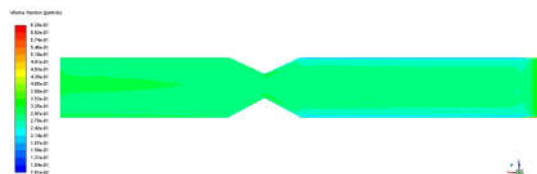


شکل ۱۰- سرعت ذرات در مرکز کانال در عرض‌های مختلف، $\frac{d}{H} = 0/1$

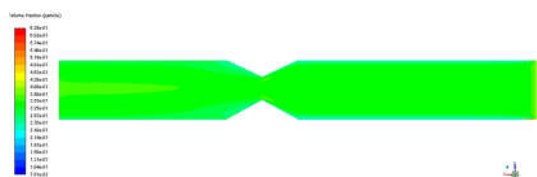
۲-۴- تأثیر کسر حجمی ذرات

کانتورهای مربوط به تجمع ذرات (کسر حجمی) در رینولدز ۰/۵ در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه شده است.

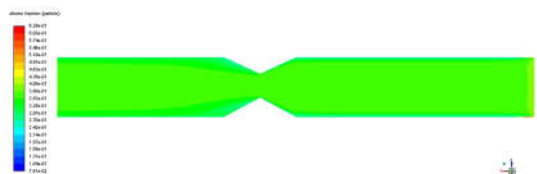
میکروکانال کمینه شود اما نتایج نشان می‌دهد کماکان تعدادی از ذرات بر روی دیواره پایینی کانال ته‌نشین می‌شوند. در شکل ۱۶ الی ۲۰ کانتور تجمع ذرات در $\frac{d}{H}$ های مختلف کانال (۰/۵ و ۰/۴ و ۰/۳ و ۰/۲ و ۰/۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد هر چه به دیواره پایینی کانال نزدیکتر می‌شویم از تجمع ذرات در کنار دیواره‌ها کاسته شده و به انتهای کانال انتقال پیدا می‌کنند. مطابق شکل ۲۰ نتایج نشان می‌دهد استفاده از کانال همگرا-واگرا باعث کاهش ته‌نشینی ذرات شده و تجمع ذرات بیشتر در انتهای میکروکانال می‌باشد.



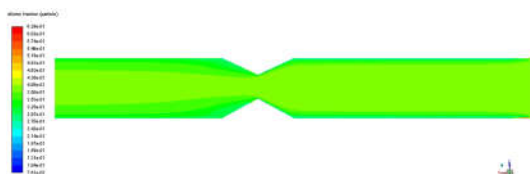
شکل ۱۶- ته‌نشینی ذرات در $\frac{d}{H} = 0.5$



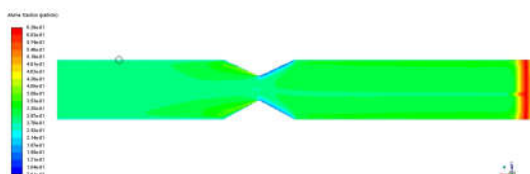
شکل ۱۷- ته‌نشینی ذرات در $\frac{d}{H} = 0.4$



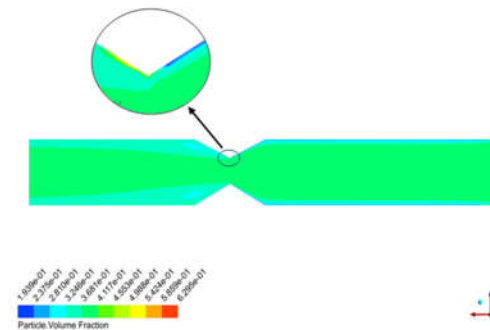
شکل ۱۸- ته‌نشینی ذرات در $\frac{d}{H} = 0.3$



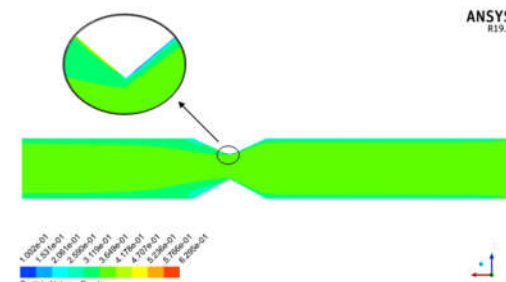
شکل ۱۹- ته‌نشینی ذرات در $\frac{d}{H} = 0.2$



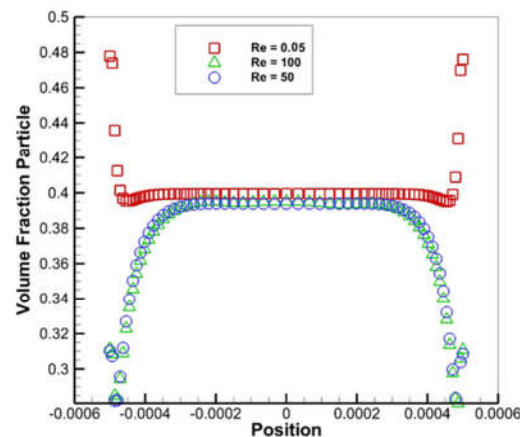
شکل ۲۰- ته‌نشینی ذرات در $\frac{d}{H} = 0.1$



شکل ۱۳- کانتور کسر حجمی ذرات در صفحه برش خورده از مرکز کانال در عدد رینولدز ۱۰۰



شکل ۱۴- کانتور کسر حجمی ذرات در صفحه برش خورده از مرکز کانال در عدد رینولدز ۵۰



شکل ۱۵- تجمع ذرات در ورودی نازل همگرا برای سه عدد رینولدز ۱۰۰ و ۵۰ و ۰/۰۵

۴-۴- تجمع ذرات در ارتفاع‌های مختلف کانال

تجمع ذرات در میکروکانال یکی از پدیده‌های مخرب و از معایب جریان‌های دو فاز مایع-جامد در ابزارهای میکروسیالی است. این پدیده عمدتاً تابعی از جنس ذرات و کانال، چگالی سیال حامل و فاز پراکنده و هندسه جریان می‌باشد. اگرچه در این تحقیق چگالی سیال حامل برابر با چگالی ذرات در نظر گرفته شده تا ته‌نشینی ذرات در کف

۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر همگرا-واگرایی میکروکانال بر رفتار هیدرودینامیکی میکروذرات خصوصاً پدیده ته نشینی، جریان دو فاز مایع-جامد با کسر حجمی ۰/۱۵ در داخل یک میکروکانال همگرا-واگرا با مقطع مستطیلی با ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر از طریق رهیافت اویلری-اویلری انجام گردیده است. منظور کمینه کردن ته نشینی ذرات در کانال از سیال با چگالی برابر با ذرات استفاده گردیده است. نیروهای تحت بررسی در این مقاله شامل نیروهای پسا، برآ و گرادیان فشار می باشد. از اثرات بویانسی به دلیل اینکه چگالی سیال و ذره برابر می باشد صرف نظر گردیده است. نتایج عددی حاصل از این شبیه سازی تطابق قابل قبولی با نتایج عددی حاصل از روش لیتیس-بولتزمن دارد. نتایج مورد بررسی شامل کانتور سرعت و فشار ذرات، کسر حجمی ذرات و ته نشینی در ارتفاعهای مختلف کانال می باشد.

نتایج نشان می دهد ذرات در مقطع همگرایی کانال افزایش سرعت و در مقطع گلوگاه بیشینه سرعت را داشته و سپس در مقطع واگرا کاهش سرعت پیدا می کنند. این افزایش سرعت می تواند باعث کاهش پدیده مخرب ته نشینی در میکرو کانال ها گردد. همچنین، تأثیر افت فشار در طول کانال همگرا-واگرا ناچیز بوده است.

تجمع ذرات به دلیل شرط عدم لغزش بیشتر در نزدیکی دیواره ها اتفاق افتاده است. اما در قسمت همگرایی نازل با توجه به افزایش سرعت جریان، مقدار تراکم ذرات حتی نزدیک به دیواره ها کاهش یافته است. دلیل دیگر نیز می توان به برابر بودن چگالی ذرات و سیال اشاره نمود. این عامل باعث می شود تأثیر ته نشینی ذرات با توجه به شتاب جاذبه، کمتر شده یا به عبارتی جود نداشته باشد. همچنین، نتایج نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز میزان تجمع ذرات در محل ورودی گلوگاه افزایش و به بیشینه مقدار خود می رسد. با افزایش عدد رینولدز از میزان ته نشینی ذرات در مقطع پایینی کانال کم شده است. همچنین، نتایج نشان می دهد هر چه به دیواره پایینی کانال نزدیکتر می شویم از تجمع ذرات در کنار دیواره ها کاسته شده و به انتهای کانال انتقال پیدا می کند. این امر موید این نتیجه مهم است که استفاده از کانال همگرا-واگرا می تواند از پدیده مخرب ته نشینی کانال جلوگیری گردد. همچنین، نویسندگان این پژوهش موارد زیر را جهت ادامه این کار پیشنهاد می دهند:

- بهینه سازی زاویه همگرایی کانال جهت بدست آوردن کمترین ته نشینی
- حل دقیق معادلات تحلیلی با در نظر گرفتن تمامی نیروهای وارد بر ذره
- بررسی جریان در کانال های همگرا-واگرا با در نظر گرفتن چگالی متفاوت سیال و ذرات و بررسی ته نشینی ذرات
- بررسی انتقال حرارت در میکروکانال های همگرا-واگرا (میکرو کانال همگرا-واگرا انتقال حرارت در کانال را افزایش می دهد)

۶- نمادها

d قطر ذره (μm)، فاصله مرکز ذره تا دیواره پایین (μm)

\hat{d}	فاصله مرکز ذره تا وسط کانال (μm)
F	نیروی پسا (N)
g	شتاب گرانش (ms^{-2})
h	ارتفاع کانال (μm)
K	ضریب تبادله اندازه حرکت مایع و جامد
L	طول کانال (mm)
\bar{R}	بردار نیروی برهم کنش بین فازها (N)
S	جمله منبع (N)
\dot{m}	دبی جرمی (kgs^{-1})
W	عرض کانال (mm)
V	سرعت (ms^{-1})
x	فاصله مرکز ذره تا ورودی کانال همگرا-واگرا (mm)
t	زمان (s)

علائم یونانی

μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
α	کسر حجمی
τ	تانسور تنش برشی (Pa)

زیر نویس ها

p, q	فاز
f	سیال
c	سیال فاقد ذره
s	قسمت مستقیم کانال

۷- مراجع

- [1]. Ashwood A., Hogen S.V., Rodarte M.A., Kopplin C.R., Rodriguez D.J., Hurlburt, E.T., Shedd T.A., A Multiphase, Micro-Scale PIV Measurement Technique for Liquid Film Velocity Measurements in Annular Two-Phase Flow. *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 68, pp. 27-39, 2015.
- [2]. Crowe C.T., Multiphase flow handbook. CRC press, 2014.
- [3]. Santiago J.G., Wereley S.T., Meinhart C.D., Beebe D.J., and Adrian R.J., A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics. *Experiments in fluids*, Vol. 25, No. 4, pp. 316-319, 1998.
- [4]. Zabow G., Assi F., Jenks R., and Prentiss M., Guided Microfluidics by Electromagnetic Capillary Focusing. *Applied physics letters*, Vol. 80, No. 8, pp. 1483-1485, 2002.
- [5]. Brenner H. and Bungay P.M., Rigid-Particle and Liquid-Droplet Models of Red Cell Motion in Capillary Tubes. *Federation Proceedings*, Vol. 30, pp. 1565-1576, 1971.
- [6]. Wickramasinghe S.R., Lin W.C., and Dandy D.S., Separation of Different Sized Particles By Inertial Migration. *Biotechnology*. Vol. 23, pp. 1417-1422, 2001.
- [7]. Pan Y. and Banerjee S., Numerical investigation of the effects of large particles on wall-turbulence. *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 12, pp.3786-3807, 1997.

- for the simulation of liquid-particle suspensions. *Physics of Fluids*, Vol. 31, No., 1, p.013302, 2019.
- [24]. Kulkarni P.M. and Morris J.F., Suspension properties at finite Reynolds number from simulated shear flow. *Physics of Fluids*, Vol, 20, No. 4, p. 040602, 2008.
- [8]. Fu X., Wang G., and Dong, Z. Theoretical analysis and numerical computation of dilute solid/liquid two-phase pipe flow. *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 44, No. 3, pp. 298-308, 2001.
- [9]. Staben M.E., and Davis R.H., Particle Transport in Poiseuille Flow in Narrow Channels. *Int. J. Multiph. Flow*, Vol. 31, pp. 529-547, 2005.
- [10]. Derksen, J.J., Dense Suspensions Solid-Liquid Interactions at the Particle Scale", *Progress In Computational Fluid Dynamics*, Vol 12, pp. 103-105, 2012
- [11]. Wang L., Guo Z.L., Shi B.C., and Zheng C.G., Evaluation of Three Lattice Boltzmann Models for Particulate Flows. *Commun. Comput. Phys.*, Vol. 13, pp. 1151-1172, 2013.
- [12]. Nikoubashman A., Likos C.N., and Kahl G., Computer Simulations of Colloidal Particles Under Flow in Microfluidic Channels. *Soft Matter*, vol. 9, pp. 2543-2770, 2013.
- [13]. Razaghi Reza and Saidi Mohammad Hassan, Transportation and settling distribution of microparticles in Low-Reynolds-number poiseuille flow in microchannel. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 582-594, 2016.
- [14]. Razaghi Reza, and Saidi Mohammad Hassan, Experimental investigation of drag and lift forces on microparticles in low Reynolds number poiseuille flow in microchannel. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 37, No. 12, pp. 1767-1777, 2016.
- [15]. Razaghi Reza, Shirinzadeh Farhud, Zabetian Mohammad, and Aghanoorian Erfan. Velocity domain and volume fraction distribution of heavy microparticles in low Reynolds number flow in microchannel. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 38, No. 3, pp. 374-380, 2017.
- [16]. Shirinzadeh F., Saidi M.H., and Davari A.R., Experimental Investigation of Slip Velocity and Settling Distribution of Micro-Particles in Converging-Diverging Microchannel. *Micro system Technology*, Vol. 23, p. 336, 2017.
- [17]. Razaghi R. and Shirinzadeh F., Numerical Investigation of Effective Parameters on Solid-Liquid Two Phase Flow in Converging-Diverging Microchannel, Using Eulerian-Lagrangian Approach. *Journal of Mechanical Engineering, Tabriz University*, Vol. 51, No. 4, pp. 135-144, 2020.
- [18]. Tao R., Jin Y., Gao X. and Li Z., 2018. Flow characterization in converging-diverging microchannels. *Physics of Fluids*, Vol. 30, No. 11, p.112004, 2018.
- [19]. Zhou T., Ji X., Shi L., Zhang X., Deng Y. and Joo S.W., Dielectrophoretic choking phenomenon in a converging-diverging microchannel for Janus particles. *Electrophoresis*, Vol. 40, No. 6 , pp.993-999, 2019.
- [20]. Sharaf O.Z., Al-Khateeb A.N., Kyritsis D.C. and Abu-Nada E., Numerical investigation of nanofluid particle migration and convective heat transfer in microchannels using an Eulerian-Lagrangian approach. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 878, pp.62-97, 2019.
- [21]. Tao R., Ng T., Su Y. and Li Z., A microfluidic rectifier for Newtonian fluids using asymmetric converging-diverging microchannels. *Physics of Fluids*, Vol. 32, No. 5, p.052010, 2020.
- [22]. Hadi Najafabadi, H. and Keshavarz Moraveji, M., Three-dimensional CFD modeling of fluid flow and heat transfer characteristics of Al₂O₃/water nanofluid in microchannel heat sink with Eulerian-Eulerian approach. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)*, Vol. 13, No. 4, pp.46-61, 2016.
- [23]. Jamshidi, R., Angeli, P. and Mazzei, L., On the closure problem of the effective stress in the Eulerian-Eulerian and mixture modeling approaches