

# بررسی عددی پارامترهای تأثیرگذار بر جریان دوفازی جامد-مایع در میکروکانال همگرا-واگرا با استفاده از رهیافت اویلری-لاگرانژی

رضا رزاقی\*

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

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

فرهود شیرین زاده

## چکیده

در این تحقیق شبیه سازی عددی سه بعدی بر مبنای رهیافت اویلری-لاگرانژی بر روی جریان دو فازی جامد-مایع در یک میکروکانال همگرا-واگرا با ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر انجام شده است. اندازه ذرات مورد استفاده ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میکرومتر با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب می باشد. نتایج شامل میدان سرعت ذرات در مقطع عرضی و طولی کانال و بررسی اثر رینولدز سیال حامل، قطر ذرات، دیواره های بالا-پایین و دیواره های کناری بر میدان سرعت ذرات می باشد. نتایج حل عددی نشان می دهد علاوه بر دیواره های بالا-پایین، دیواره های جانبی نیز تا ۴۲ درصد سرعت ذرات در مقطع مستقیم میکروکانال را کاهش می دهد. در مقایسه با پژوهش های دیگران، در این تحقیق اثر همگرا-واگرا بودن کانال بر روی ته نشینی ذرات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد در میکروکانال همگرا-واگرا پدیده ته نشینی به دلیل شتاب گرفتن ذرات در ناحیه همگرا نسبت به میکروکانال مستقیم میانگین ۴۵ درصد کمتر اتفاق می افتد که این امر یکی از مزایای میکروکانال های همگرا-واگرا می باشد.

واژه های کلیدی: میکروکانال همگرا-واگرا، میکرو ذرات، شبیه سازی عددی، رهیافت اویلری-لاگرانژی، ته نشینی.

## Numerical Investigation of Effective Parameters on Solid- Liquid Two Phase Flow in Converging- Diverging Microchannel, Using Eulerian - Lagrangian 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

In this research, 3-D numerical simulation based on Eulerian-Lagrangian approach was performed on solid-liquid two-phase flow in a convergent-divergent 200  $\mu\text{m}$  microchannel. The size of particles used in this research is 20, 40 and 60  $\mu\text{m}$  with density of 1.05  $\text{gr}/\text{cm}^3$ . Results include velocity domain of the particle at the channel cross section, Reynolds No. effect on particle velocity, particle diameter effect on particle velocity, and the effect of top-down and side walls on particle velocity. The numerical results show that in addition to the top-down walls, the side walls also reduce the velocity of the particles in the direct microchannel up to 42%. Compared with similar studies, the effect of channel convergence on particle deposition is investigated in this study. The results show that the convergent-divergent part of the microchannel reduces particles sedimentation up to occurs 45% comparing with direct part of the microchannel due to particle acceleration, which is one of the benefits of convergent-divergent microchannels.

**Keywords:** Convergent-Divergent Microchannel, Micro-Particles, Numerical Simulation, Eulerian-Lagrangian Approach, Sedimentation.

### ۱- مقدمه

میکروسایالی و نانوسایالی می باشد [۵]. سیستم های آزمایشگاهی روی تراشه<sup>۲</sup>، جریان بایومولکولی در میکروکانال ها و میکروکاپیلاری ها، جریان های متخلخل، آنالیز کروماتوگرافی و جداسازی غشاهای فازی شامل پدیده انتقال ذرات جامد توسط مایع در میکروکانال ها می باشند. میکروکانال های همگرا-واگرا در ساخت تجهیزات چون میکروشرها، میکروسنسورها، میکروفیلترها و تجهیزات مرتبط با ایروسل ها بکار می روند [۶].

در اواسط دهه ۱۸۰۰ استوکس معادلات تحلیلی را در خصوص جریانهای با عدد رینولدز پایین ارائه نمود [۷]. از آن زمان تا به حال مطالعات مختلف تجربی، تحلیلی و عددی در این خصوص انجام گردیده است. در خصوص مطالعات تحلیلی در این زمینه، لورنتز اولین کسی بود که به این موضوع پرداخت [۸]. او رفتار ذرات در جریان کاملاً

انتقال ذره در جریان های با رینولدز پایین در هندسه های محدود<sup>۱</sup> در بسیاری از فرایندهای مهندسی شیمی و بیولوژیکی نظیر سوسپانسیون ها، ته نشینی، جداسازی غشایی، پلیمرها و جریان خون اتفاق می افتد [۱ و ۲]. با گسترش پژوهش ها در زمینه ابزارهای میکروسایالی، علاقمندی به مطالعه در خصوص جریان های با رینولدز پایین بین محققان افزایش پیدا کرد [۳]. جریان های میکروسایالی به طور کلی به صورت انتقال سیالات و سوسپانسیون ها در میکروکانال-هایی با ضریب منطری بالا و ابعاد سطح مقطع ده ها و یا صدها برابر میکرون و طول از مرتبه سانتی متر تعریف می شوند [۴]. انتقال ذرات جامد توسط فاز مایع در میکروکانال ها، مهمترین مساله در سیستم های

<sup>1</sup> Confined Geometries

<sup>2</sup> laboratory-on-chip

خزشی با حضور یک دیواره را از طریق روش انعکاس<sup>۱</sup> به صورت تحلیل ارائه نمود. جفری [۹] در سال ۱۹۱۵ حرکت چرخشی ذرات کروی حول محور خود را در یک جریان خزشی مورد مطالعه قرار داد. دین و انیل [۱۰] سپس در سال ۱۹۶۳ کار جفری را توسعه داده و با استفاده از سیستم مختصات کروی یک حل تحلیلی در خصوص چرخش ذرات نزدیک دیواره ارائه دادند. برنر [۱۱] همچنین، در سال ۱۹۶۱ حرکت یک ذره به سمت دیواره و یا دور از دیواره را در جریان کاملاً خزشی مورد بررسی قرار داد. گلدمن و همکاران [۱۲ و ۱۳] در سال ۱۹۶۷ روش دین و انیل را برای فواصل بسیار کم ذره از دیواره توسعه دادند و با استفاده از حل تقریبی و مجانبی روانکاری سرعت های انتقالی و چرخشی ذره را در سیال ساکن و یا جریان برشی نزدیک به دیواره بدست آوردند. این حالت برای حرکت یک ذره در جریان پوزوی و در رینولدزهای پایین بین دو دیواره و در حالیکه قطر ذره بسیار کمتر از فاصله بین ذره-دیواره باشد قابل استفاده است. همچنین، در این حالت ذره کمتر تحت تأثیر دیواره بالایی است.

فکسن [۱۴] اولین کسی بود که حل تحلیلی یک ذره کوچک را بین دو دیواره موازی ارائه داد. اما حل او محدود به حالتی بود که ذره در وسط و یا یک چهارم ارتفاع قرار دارد. واکیا [۱۵] حرکت یک ذره بین دو دیواره ثابت در جریان پوزوی و حرکت یک ذره بین یک دیواره ثابت و یک دیواره متحرک را در جریان برشی مورد بررسی قرار داد. گاناتوس و همکاران [۱۶ و ۱۷] از روش هم‌محلی مرز<sup>۲</sup> برای مطالعه یک ذره بین دو دیواره با حرکت موازی و عمود بر دو دیواره موازی استفاده نمودند. مسأله ای که گاناتوس به آن پرداخت شامل چهار حالت می شد که به دلیل خطی بودن معادلات استوکس، با ترکیب جوابها می‌توان حرکت پیچیده تر ذره را در جریان پوزوی پیش بینی نمود. این روش نیز دارای محدودیت هایی بود که از آن جمله می توان به این نکته اشاره نمود که جوابها در حالتی که فاصله دیواره و ذره حداکثر تا ۱۰ درصد قطر ذره بود مورد استفاده قرار می‌گرفت. این محدودیت بعدها با بکار بردن روش‌های عددی با دقت بالاتر به منظور بررسی حرکت یک ذره در فواصل کمتر از دیواره مورد بررسی قرار گرفت.

لمهولت و ماکسی [۱۸] در سال ۲۰۰۳ از روش کوپل-نیرو به منظور مدل‌سازی جریان دو فاز مایع-جامد در رژیم استوکس با فرض ذرات کروی و صلب استفاده نمودند. به همین منظور سه نوع مسئله استوکس در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت که عبارت است از یک ذره کروی تنها، دو ذره کروی و یک ذره کروی در یک کانال. نتایج مطالعات نشان می داد که در صورتی که فاصله مرکز دو ذره و همچنین فاصله مرکز ذره تا دیواره بزرگتر از ۰/۲۵ شعاع ذره باشد روش کوپل-نیرو نتایج قابل قبولی را نسبت به کارهای تجربی و عددی انجام شده دارد. در خصوص فواصل کوچکتر این روش از لحاظ کیفی تقریباً قابل قبول بوده اما به دلیل صرفنظر از اثرات روغنکاری<sup>۳</sup> از لحاظ کمی با نتایج آزمایشات تجربی تفاوت دارد. استابن و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۰۳ حرکت یک ذره داخل یک کانال مستطیلی را از طریق

روش انتگرال مرزی<sup>۴</sup> مورد بررسی قرار دادند. در روش آن‌ها حرکت ذره را در فواصل کمتر از یک درصد نسبت به دیواره محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد متوسط سرعت ذرات از سرعت سیال تک فاز کمتر بوده و با افزایش قطر ذرات روند کاهش دارد.

سانگ و همکاران [۲۰] در سال ۲۰۰۹ بررسی عددی را بر مبنای رهیافت اویلری-لاگرانژی به منظور مدلسازی حرکت ذره در داخل میکروکانال همگرا-واگرا انجام دادند و اثرات قطر ذره، ابعاد کانال و مکان اولیه ذره را بر حرکت ذره بررسی کردند. نتایج نشان می دهد گرادیان فشار هیچ تأثیری بر روی نسبت سرعت ذرات در ناحیه واگرا نسبت به نواحی بالادست و پایین دست ندارد. همچنین ذرات در نواحی همگرا افزایش سرعت و در نواحی واگرا کاهش سرعت و در گلوگاه دارای بیشینه سرعت هستند.

وانگ و همکاران [۲۱] 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<sup>۵</sup> و MRT<sup>۶</sup> جهت مدلسازی 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 کارایی محاسباتی بهتری نسبت به دو طرح دیگر دارد. آرش نیکوباشمن [۲۲] در سال ۲۰۱۳ رفتار یک تک ذره کروی در جریان پوزوی در داخل یک کانال مستطیلی توسط روش عددی دینامیک برخورد چند ذره ای<sup>۷</sup> مورد بررسی قرار داد. نتایج حاصل مطابقت خوبی با نتایج کار استابن در سال ۲۰۰۵ دارد.

رزاقی و سعیدی [۲۳] 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 مدلسازی های عددی داشت [۲۴]. همچنین، رزاقی و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۷ رفتار ذرات میکرونی در داخل میکروکانال را از طریق رهیافت اویلری-اویلری 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 [۲۶] 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 ته‌نشینی به دلیل شتاب گرفتن ذرات در ناحیه همگرا ۴۵ درصد کمتر نسبت به میکروکانال

<sup>4</sup>Boundary integral method  
5Ladd

<sup>6</sup>Multiple-relaxation time

<sup>7</sup>Multi-particle collision dynamics (MPCD)

<sup>1</sup> Method of Reflection

<sup>2</sup> Boundary-Collocation

<sup>3</sup> Lubrication Effects

که در آن اثرات لزجت بر اثرات اینرسی جریان غالب است در جریان های با طول مشخصه کم (نظیر کانال های کوچک)، سرعت پایین و یا لزجت بالا اتفاق می افتد [۲]. اساس دیدگاه اولبری-لاگرانژی برای بررسی جریان های مایع-ذره مطالعه جریان مایع از طریق دیدگاه اولبری و رهگیری ذرات در داخل میدان جریان از طریق دیدگاه لاگرانژی است. در چارچوب مرجع اولبری معادلات حاکم همان معادلات پیوستگی و مومنتم به شرح ذیل می باشد [۲۵]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

معادله مومنتم:

$$\rho \left[ \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial t} \right) \quad (3)$$

که در آن  $u_i$  مولفه های سرعت سیال در جهت  $x$  و  $y$ ،  $\rho$  چگالی سیال،  $p$  فشار،  $\mu$  لزجت سیال و  $t$  زمان می باشد. برای تعیین خط سیر ذرات می توان قانون دوم نیوتن را برای هر ذره نوشت. تعادل نیرویی برای جهت  $x$  در دستگاه مختصات دکارتی به صورت زیر نوشته می شود [۱۵]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (4)$$

که  $F_x$  نیروهای اضافه شده و  $F_D(u - u_p)$  نیروی پسا بر واحد جرم ذره می باشد. برای جریان استوکس با عدد رینولدز خیلی کم نیروی پسا از طریق رابطه زیر بدست می آید [۱۵]:

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24} \quad (5)$$

که در آن  $u$  سرعت فاز سیال،  $u_p$  سرعت ذره،  $\mu$  لزجت سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $d_p$  قطر ذره می باشد.  $Re$  عدد رینولدز نسبی ذره است که از رابطه زیر بدست می آید [۱۵]:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (6)$$

در محاسبات مربوط به معادلات کوپل شده مراحل زیر انجام می شود.

- ۱- حل میدان جریان فاز پیوسته
- ۲- محاسبه خط سیر ذرات پراکنده
- ۳- حل دوباره میدان جریان فاز پیوسته و استفاده از تبادل اندازه حرکت، حرارت و جرم بدست آمده از محاسبات مربوط به فاز گسسته
- ۴- محاسبه دوباره خط سیر ذرات در میدان جریان تصحیح شده.
- ۵- تکرار مراحل ۳ و ۴ و رسیدن به یک حل همگرا شده، به طوریکه محاسبات مربوط به جریان فاز پیوسته و خط سیر فاز گسسته تغییر نکنند.

مستقیم می باشد. تانو و همکاران [۲۷] 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 [۲۸] در سال ۲۰۱۹ حرکت ذرات را در داخل یک میکروکانال همگرا-واگرا از طریق نیروی رانش الکتروفوریتیک<sup>۱</sup> 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 [۲۹] در سال ۲۰۱۹ رفتار هیدرودینامیکی و انتقال نانوذرات را از طریق انتقال گرمای جابجایی 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 [۳۰] 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 مدلسازی های انجام شده بر روی این میکروکانال تطابق قابل قبولی با آزمایشات تجربی داشت.

هدف اصلی این مقاله بررسی عددی انتقال ذرات میکرونی کروی 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 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. هرگونه تغییر در پارامترهای مذکور سبب تغییر کیفی انتقال ذرات در میکروکانال ها خواهد شد. از نوآوری های این پروژه اثر قطر ذرات بر سرعت ذرات، اثر دیواره کناری بر سرعت ذرات و اثر دیواره بالا-پایین بر سرعت ذرات می باشد.

## ۲- معادلات حاکم

در این تحقیق، هدف اصلی بررسی رفتار هیدرودینامیکی ذره در جریان های با رینولدز بسیار پایین است. عدد رینولدز در اینگونه جریان ها به عنوان یک عدد بی بعد مهم و تأثیرگذار بوده که نشان-دهنده نسبت بین نیروهای اینرسی به لزجت بوده و به صورت زیر تعریف می شود [۲]:

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (1)$$

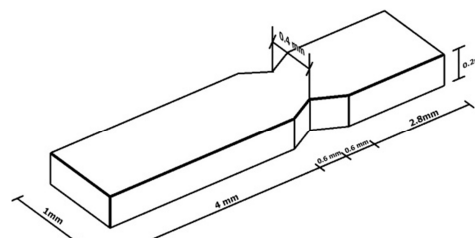
که در آن  $\rho$  چگالی سیال،  $U$  سرعت سیال یا ذره،  $D$  طول مشخصه جریان و  $\mu$  لزجت سیال می باشد. جریان های با رینولدز پایین

<sup>1</sup> Electrophoretic

### ۳- مدل‌سازی عددی

#### ۳-۱- مدل هندسی

جریان حاوی ذره مورد بررسی در این پژوهش جریان استوکس با عدد رینولدز کمتر از یک می باشد. همچنین به دلیل لایه‌ای بودن جریان و اینکه ارتفاع کانال از ابعاد میکرومتر می باشد می توان از اثرات اغتشاشی جریان صرف‌نظر نمود. کانال مورد بررسی مستطیلی همگرا-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 صرف‌نظر می گردد. همچنین جنس ذرات مورد استفاده پلی استایرن و بدون بار بوده و لذا از اثرات مربوط به نیروهای سطحی صرف‌نظر می گردد. مشخصات کانال و ذرات مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

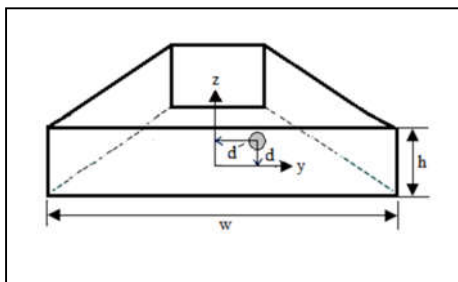
جدول ۱ مشخصات فیزیکی مدل و ذره

ردیف	شرح	مقدار
۱	طول کانال ( $L$ )	۸ (mm)
۲	عرض کانال ( $W$ )	۱ (mm)
۳	ارتفاع کانال ( $h$ )	۲۰۰ ( $\mu\text{m}$ )
۴	قطر ذره ( $d_p$ )	۲۰، ۴۰ و ۶۰ ( $\mu\text{m}$ )
۵	عدد رینولدز ( $Re$ )	۰/۰۰۵
۶	چگالی چگالی ذره ( $\rho_p$ )	۱۰۵۰ ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )
۷	چگالی سیال حامل ( $\rho_f$ )	۱۰۵۰ ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ )
۸	نسبت مساحت بخش همگرا	۰، ۴

عدد رینولدز به کار رفته در این بررسی ۰/۰۰۵ می باشد. با توجه به شکل هندسی کانال، ابعاد ذرات و مطالعه کارهای تجربی انجام شده به منظور تعیین میدان سرعت ذرات و همچنین با توجه به محدودیت طول کانال در کار تجربی انجام شده توسط نویسندگان [۲۳-۲۶]، در اعداد رینولدز بالاتر از ۰،۰۰۵ ذرات از داخل کانال با سرعت زیاد خارج شده و امکان پردازش تصویر وجود نداشت. لذا عدد رینولدز در این بررسی ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ یک ذره را داخل میکروکانال همگرا-واگرا نشان می دهد. در این تحقیق فاصله مرکز ذره تا دیواره پایین با  $d$  و فاصله مرکز ذره تا وسط کانال با  $\hat{d}$  نشان داده 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.

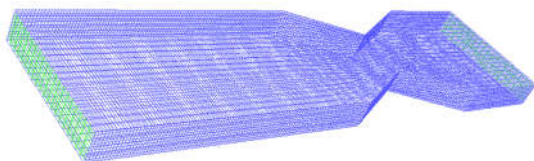


شکل ۲- طرحواره یک ذره داخل کانال

در این بررسی فاصله مرکز ذره تا ورودی کانال ( $x$ ) توسط طول کانال در قسمت همگرا-واگرا،  $L$ ، و سرعت ذرات در جهت  $x$  توسط سرعت ذرات در قسمت مستقیم کانال،  $V_c$ ، بی بعد گردیده است.

#### ۳-۲- شبکه بندی و شرایط مرزی

به منظور حل عددی جریان داخل میکروکانال از یک شبکه با سازمان مستطیلی استفاده گردیده است شکل (۳).



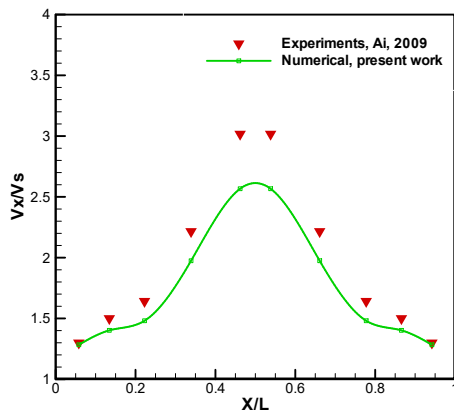
شکل ۳- شبکه بندی میکروکانال مورد مطالعه

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 ذره 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.

ذره محاسبه و در نتیجه از طریق معادله دینامیکی ذره، رابطه (۴)، شتاب و مکان ذره محاسبه می گردد.

### ۳-۳- صحت سنجی مدل عددی

کلیه نتایج به صورت بی بعد ارائه گردیده است. شکل ۵ نشان دهنده میدان سرعت ذره در طول کانال همگرا-واگرا است که در عدد رینولدز ۰/۰۰۵ بدست آمده است. نتایج نشان داده شده در شکل ۵ حاکی از تطابق قابل قبول حل عددی و تجربی [۲۰] دارد.



شکل ۵- میدان سرعت ذره در طول کانال همگرا- واگرا

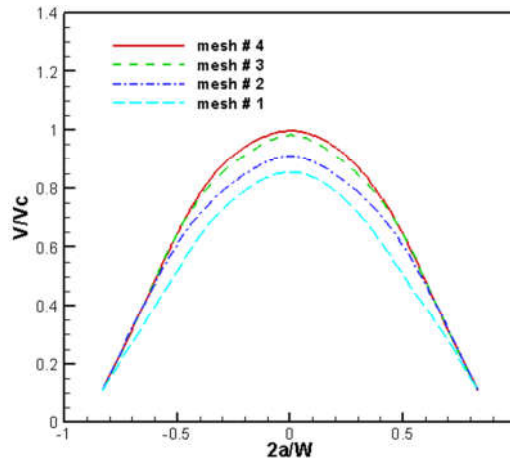
مطابق جدول ۳ کمترین خطا مربوط به ابتدا و انتهای کانال مستقیم معادل ۱/۱۷۹ درصد و بیشترین خطا مربوط به مرکز کانال همگرا-واگرا معادل ۱۴/۹۰۱ درصد می باشد.

جدول ۳ حل عددی میدان سرعت ذره و حل تجربی

اختلاف نتایج دو روش تجربی و عددی (%)	نتایج مدلسازی عددی ( $\frac{V_x}{V_s}$ )	نتایج تجربی ( $\frac{V_x}{V_s}$ )	نسبت فاصله ذره از قسمت مستقیم کانال به طول کانال همگرا- واگرا ( $\frac{X}{L}$ )
۱/۱۷۹	۱/۲۸۳	۱/۲۹۸	۰/۰۵۸
۶/۵۰۲	۱/۴۰۱	۱/۴۹۹	۰/۱۳۴
۹/۷۶۴	۱/۴۸۰	۱/۶۴۱	۰/۲۲۲
۱۰/۸۶۷	۱/۹۷۴	۲/۲۱۵	۰/۳۳۹
۱۴/۹۰۱	۲/۵۶۷	۳/۰۱۶	۰/۴۶۱
۱۴/۹۰۱	۲/۵۶۷	۳/۰۱۶	۰/۵۳۸
۱۰/۸۶۷	۱/۹۷۴	۲/۲۱۵	۰/۶۶۱
۹/۷۶۴	۱/۴۸۰	۱/۶۴۱	۰/۷۷۷
۶/۵۰۲	۱/۴۰۱	۱/۴۹۹	۰/۸۶۵
۱/۱۷۹	۱/۲۸۳	۱/۲۹۸	۰/۹۴۲

### ۴- نتایج و بحث

در این قسمت از مقاله به بررسی تأثیر دیواره‌های بالا و پایین و همینطور دیواره‌های جانبی بر میدان سرعت ذره در هنگام گذر از ناحیه همگرا-واگرای کانال و همینطور تأثیر ناحیه همگرا-واگرا بر ته نشینی ذره پرداخته می شود.



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

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

شماره شبکه	گره
۱	۳۸۲۲۳
۲	۴۱۵۵۳
۳	۴۸۲۷۹
۴	۵۴۲۷۳

تمام محاسبات در نرم افزار Ansys Fluent انجام شده است. بدین منظور از حل کننده تفکیکی<sup>۱</sup> برای حل معادلات حاکم بر سیال و برای خطی سازی معادلات حاکم از فرم ضمنی<sup>۲</sup> استفاده شده است. برای همه معادلات انتقال، ترم های جابجایی و دیفیوژن طبق طرح گسسته سازی قاعده توانی گسسته شده است. اتصال فشار و سرعت به وسیله الگوریتم SIMPLE انجام شده است. به منظور مدلسازی حرکت ذره در داخل سیال حامل از رهیافت اوپلری-لاگرانژی<sup>۳</sup> استفاده شده که در آن جریان سیال مطابق رهیافت اوپلری و حرکت ذره بر اساس معادله حرکت دینامیکی نیوتن (لاگرانژی) مدلسازی گردیده است. سرعت ذرات بر اساس مکان ذرات در زمان های مختلف متوسط گیری شده است. در این روش با استفاده از تعریف تزریق در بخش تعریف نرم افزار می توان ذرات را با قطر، سرعت و موقعیت های مختلف داخل میکروکانال تزریق نمود. 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. در روش اوپلری-لاگرانژی ابتدا فاز پیوسته سیال از طریق معادلات حاکم بر جریان سیالی حل شده و میدان سرعت فاز پیوسته بدست می آید. با تعیین سرعت های وارد بر اطراف ذره کروی، نیروهای برشی و فشاری وارد بر

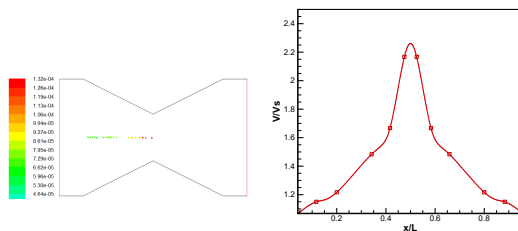
<sup>1</sup> Pressure-Based

<sup>2</sup> Implicit

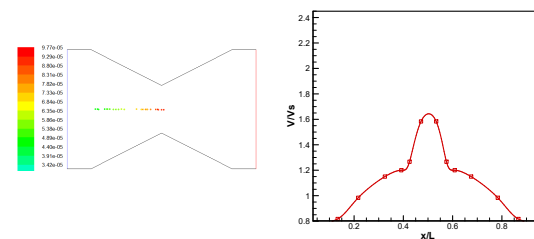
<sup>3</sup> Eulerian-Lagrangian Approach (E-L)

#### ۱-۴- تأثیر دیواره بالا-پایین بر میدان سرعت ذره

یکی از اهداف مهم در کار حاضر بررسی تأثیر دیواره های بالا و پایین و همچنین دیواره های کناری کانال بر میدان سرعت ذره می باشد. نتایج در شکل ۶-الف و ب به ترتیب در  $\frac{d}{H} = 0.5$  و  $\frac{d}{H} = 0.3$  و شکل ۷ در  $\frac{d}{H}$  های مختلف (۰/۵، ۰/۴، ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد هر چه به سمت دیواره ها نزدیکتر می شویم به علت تأثیر تنش برشی (اختلاف سرعت سیال در بالا و پایین ذره) سرعت ذرات کاهش یافته و سرعت ذرات در مرکز کمتر و در نزدیکی دیواره ها بیشتر تحت تأثیر دیواره ها قرار گرفته است.

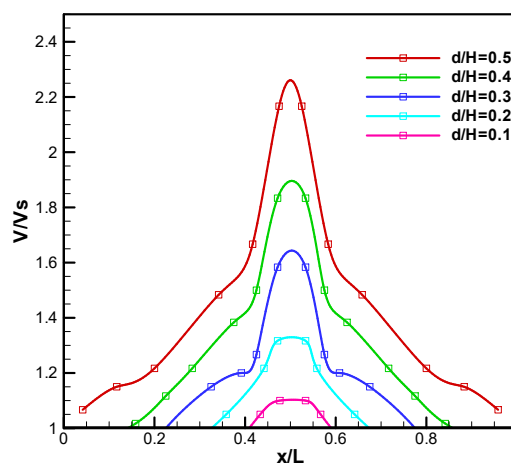


الف -  $\frac{d}{H} = 0.5$ ، قطر ذره ۲۰ میکرومتر رینولدز ۰/۰۰۵



ب)  $\frac{d}{H} = 0.3$  قطر ذره ۲۰ میکرومتر رینولدز ۰/۰۰۵

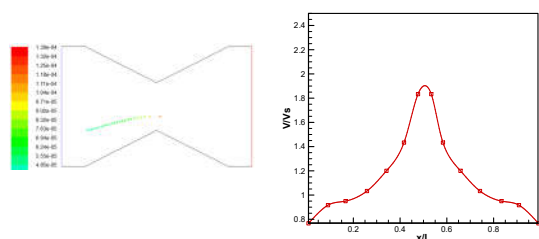
شکل ۶- سرعت ذرات بر حسب طول کانال، قطر ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ (الف)  $\frac{d}{H} = 0.5$  (ب)  $\frac{d}{H} = 0.3$



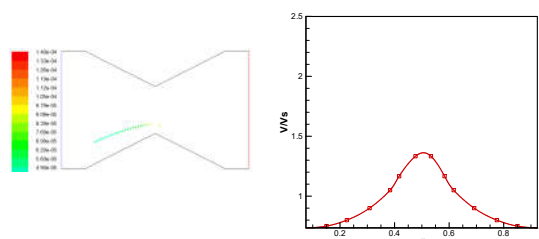
شکل ۷- سرعت ذرات بر حسب طول کانال، قطر ذره ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ در ارتفاع های مختلف

#### ۲-۴- تأثیر دیواره های کناری بر میدان سرعت ذره

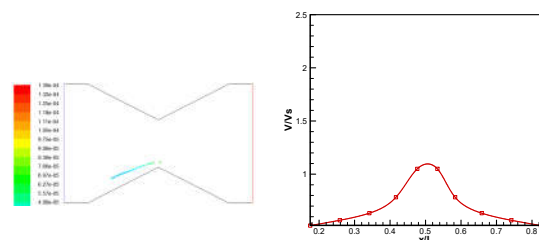
جهت بررسی اثرات دیواره های کناری، نسبت سرعت ذرات در گویبی به سرعت ذرات در مقطع مستقیم در طول کانال در شکل های ۸ الی ۱۱ نشان داده شده است. ذرات در  $z = 0$  و در  $\frac{d}{w}$  مختلف (۰/۴، ۰/۳، ۰/۲) وارد بخش همگرا-واگرا می شوند. با توجه به شکل ۱۱ در  $\frac{d}{w} = 0.4$  ذرات در گلوگاه کانال حدود ۱/۸ برابر افزایش سرعت نسبت به مقطع مستقیم کانال، در  $\frac{d}{w} = 0.3$  ذرات در گلوگاه کانال حدود ۱/۳ برابر افزایش سرعت نسبت به مقطع مستقیم کانال، در  $\frac{d}{w} = 0.1$  ذرات در گلوگاه کانال حدود ۱/۰۵ برابر سرعت نسبت به مقطع مستقیم افزایش داشته است. نتایج نشان می دهد هر چه به سمت دیواره های کناری نزدیکتر می شویم تحت تأثیر نیروی بازدارنده (نیروی روانکاری دیواره) دیواره ذرات کاهش سرعت پیدا می کنند. با توجه به نتایج فوق الذکر دیواره های کناری با نسبت مساحت ۰/۴ برای ذرات نزدیک دیواره حداکثر ۴۲ درصد کاهش سرعت ذره را نسبت به مقطع مستقیم کانال خواهند داشت.



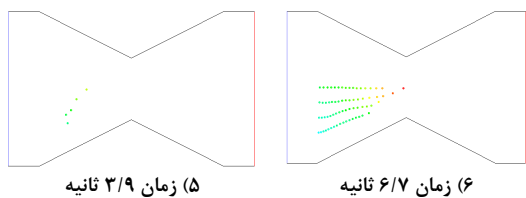
شکل ۸- سرعت ذرات در  $\frac{d}{w} = 0.4$ ، قطر ذرات ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ در طول کانال



شکل ۹- سرعت ذرات در  $\frac{d}{w} = 0.3$ ، قطر ذرات ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ در طول کانال



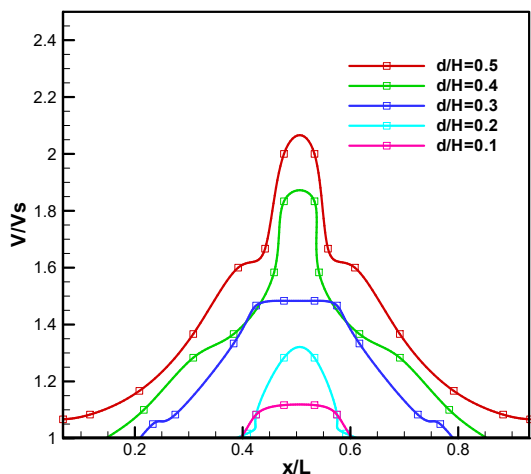
شکل ۱۰- سرعت ذرات در  $\frac{d}{w} = 0.2$ ، قطر ذرات ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ در طول کانال



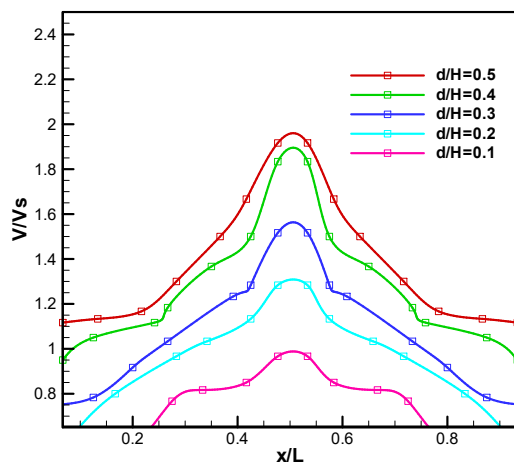
شکل ۱۲- نمایش ذرات ۲۰ میکرومتری در عرض‌های مختلف کانال در زمان‌های متفاوت در طول کانال در رینولدز ۰/۰۰۵

#### ۴-۴- تأثیر قطر بر سرعت ذرات

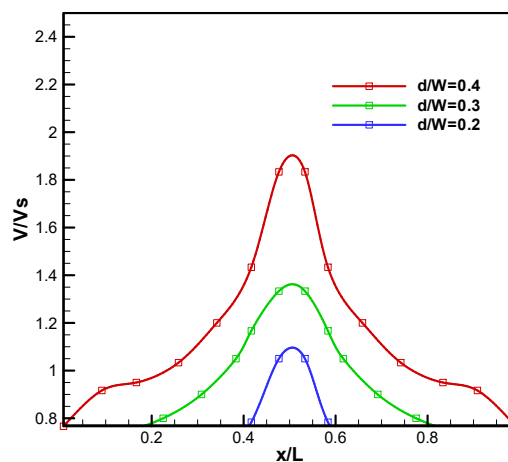
در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ در  $\frac{d}{H}$  های مختلف (۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵) تغییرات سرعت ذرات به ترتیب ۴۰ و ۶۰ میکرومتری در طول کانال همگرا- و اگر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر ذرات به دلیل افزایش تنش برشی در بالا و پایین ذره (اختلاف بالای سرعت ذرات در قطر ۴۰ و ۶۰ میکرومتری نسبت به ۲۰ میکرومتری) و همچنین به دلیل افزایش نیروی پسا، سرعت ذرات کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۱۳- سرعت ذرات بر حسب طول کانال قطر ۴۰ میکرومتر رینولدز ۰/۰۰۵ در ارتفاعات مختلف



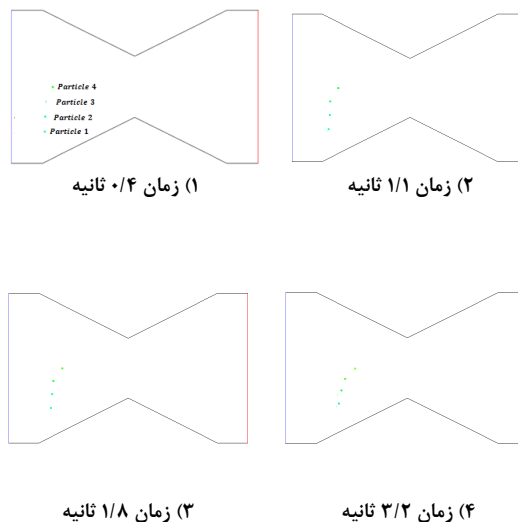
شکل ۱۴- سرعت ذرات بر حسب طول کانال قطر ۶۰ میکرومتر رینولدز ۰/۰۰۵ در ارتفاعات مختلف



شکل ۱۱- سرعت ذرات در عرض‌های مختلف کانال، قطر ذرات ۲۰ میکرومتر، رینولدز ۰/۰۰۵ بر حسب طول کانال

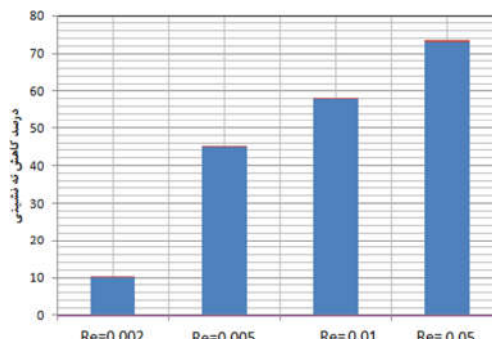
#### ۳-۴- مقایسه سرعت ذرات در عرض‌های مختلف

در شکل ۱۲ ذره با قطر ۲۰ میکرومتر در سه موقعیت دنبال گردیده است. نتایج نشان می‌دهد ذره در وسط کانال، بخش همگرای کانال را با سرعت بیشتری طی می‌کند. دلیل این امر کاهش اثرات دیواره‌های جانبی در مرکز کانال می‌باشد. همچنین از نتایج قابل توجه در این بخش افزایش سرعت ذرات خیلی نزدیک به دیواره‌ها نسبت به ذرات نزدیک به دیواره می‌باشد (شکل ۱۲ قسمت ۵ زمان ۳/۹ ثانیه). دلیل اصلی این افزایش سرعت را می‌توان تأثیر نیروی روانکاری بر روی افزایش سرعت ذرات در نزدیکی دیواره دانست یعنی این نیرو در ذرات خیلی نزدیک به دیواره در جهت حرکت سیال و در نزدیک دیواره در خلاف جهت حرکت ذره می‌باشد.



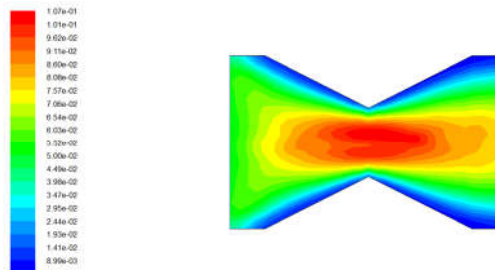
#### ۴-۵- تأثیر عدد رینولدز بر ته‌نشینی ذرات

ته‌نشینی ذرات در میکروکانال یکی از پدیده‌های مخرب و از معایب جریان‌های دو فازی مایع-جامد در ابزارهای میکروسیالی است. این پدیده عمدتاً تابعی از جنس ذرات و کانال، چگالی سیال حامل و فاز پراکنده هندسه جریان می‌باشد. اگرچه در این تحقیق چگالی سیال حامل برابر با چگالی ذرات در نظر گرفته شده تا ته‌نشینی ذرات مینیمم شود اما نتایج نشان می‌دهد کماکان تعدادی از ذرات بر روی دیواره پایینی کانال ته‌نشین می‌شوند. نحوه محاسبه مقدار ته‌نشینی در اعداد رینولدز مختلف بدین صورت است که ذرات در موقعیت‌های مختلف در ورودی کانال با سرعت‌های مختلف (اعداد رینولدز متفاوت) تزریق شده و ذرات ته‌نشین شده در طول کانال مورد شمارش قرار گرفته است. در شکل ۱۵ تأثیر عدد رینولدز بر ته‌نشینی را نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز میزان ته‌نشینی ذرات کاسته می‌شود.

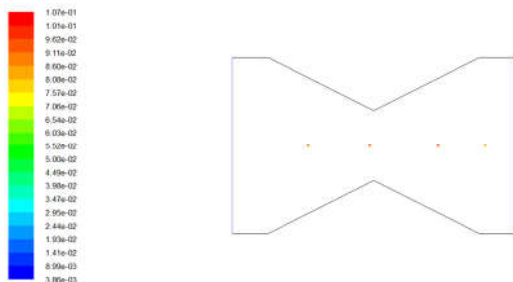


شکل ۱۵- تأثیر عدد رینولدز بر ته‌نشینی ذرات در میکروکانال همگرا-واگرا

کانتور بیشینه عدد رینولدز ورودی ۰.۰۵ برای ذره و سیال در شکل‌های ۱۶-الف و ۱۶-ب نمایش داده شده است. دلیل عدم بررسی کانتور در رینولدزهای بالاتر، عدم دسترسی بودن نتایج تجربی مربوط به عدد رینولدز فوق‌الذکر می‌باشد.



شکل ۱۶-الف- کانتور عدد رینولدز سیال در رینولدز ورودی ۰.۰۵



شکل ۱۶-ب- کانتور عدد رینولدز ذره در رینولدز ورودی ۰.۰۵

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور بررسی رفتار هیدرودینامیکی ذرات میکرونی داخل میکروکانال، شبیه‌سازی عددی سه بعدی با رهیافت اولیری-لاگرانژی بر روی جریان دو فازی مایع-جامد در یک میکروکانال همگرا-واگرا با مقطع مستطیلی با ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر انجام شده است. هدف اصلی در این پژوهش بررسی اثرات هندسی جریان نظیر همگرا-واگرا بودن کانال و قطر ذرات و همچنین تأثیر دیواره‌های بالا-پایین و جانبی بر میدان سرعت ذره می‌باشد. به همین منظور شبیه‌سازی عددی برای سه نوع ذره با قطرهای ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میکرومتر انجام گردیده است. جنس ذرات پلی‌استایرن و از لحاظ بارهای الکتروستاتیکی خنثی می‌باشد. چگالی ذرات ۱۰۵۰ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. رژیم مورد بررسی جریان، استوکس با عدد رینولدز پایین تر از یک و آرام بوده و لذا از اثرات اغتشاشی جریان صرفنظر می‌گردد. نتایج مورد بررسی شامل سرعت ذرات در ارتفاع‌های مختلف کانال، اثر رینولدز بر سرعت ذرات، اثر قطر ذرات بر سرعت ذرات، اثر دیواره کناری بر سرعت ذرات و اثر دیواره بالا-پایین بر سرعت ذرات می‌باشد. نتایج عددی نشان می‌دهد علاوه بر دیواره‌های بالا-پایین دیواره‌های جانبی نیز تا ۴۲ درصد سرعت ذرات در مقطع مستقیم میکروکانال را کاهش می‌دهد. همچنین، سرعت ذرات در بخش همگرا افزایش و در بخش واگرا کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، ذرات با سایز بزرگتر به دلیل نیروی پسای بالاتر افزایش سرعت کمتری در مقطع همگرای کانال دارند (ذرات بزرگتر در مدت زمان بالاتری نسبت به ذرات کوچکتر مسیر همگرای کانال را طی می‌کنند). همچنین، ذرات در مرکز کانال نسبت به ذرات در نزدیکی دیواره‌های جانبی با سرعت بیشتری بخش همگرای کانال را به دلیل اثرات کم دیواره‌های جانبی طی می‌کنند.

یکی از پدیده‌های مضر در میکروکانال‌ها ته‌نشینی ذرات و متعاقب آن مسدود شدن کانال می‌باشد. یکی از نتایج این رساله بررسی ته‌نشینی ذرات می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد در میکروکانال همگرا-واگرا پدیده ته‌نشینی به دلیل شتاب گرفتن ذرات در ناحیه همگرا نسبت به میکروکانال مستقیم میانگین ۴۵ درصد کمتر اتفاق می‌افتد که این امر یکی از مزایای میکروکانال‌های همگرا-واگرا می‌باشد. همچنین، نویسندگان این پژوهش موارد زیر را جهت ادامه این کار پیشنهاد می‌دهند:

- بهینه‌سازی زاویه همگرایی کانال جهت بدست آوردن کمترین ته‌نشینی



- [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]. Stokes G.G., On the Effect of the Internal Motion of Fluids on The Motion of Pendulums. *Trans. Cambridge Phil. Soc.* Vol. 9, pp. 8-94, 1851.
- [8]. Lorentz H.A., General Theorem Concerning The Motion of a Viscous Fluid and a Few Consequences Derived From It. *Zittingsverslag Koninkl. Akad. van Wetensch. Amsterdam*, Vol. 5, pp. 168-175, 1896.
- [9]. Jeffery G.B., On The Steady Motion of a Solid of Revolution in a Viscous Fluid. *Proc. London Math. Soc.*, Vol. 14, pp. 327-338, 1915.
- [10]. Dean W.R., and O'Neill M.E., A Slow Motion of Viscous Liquid Caused by The Rotation of a Solid Sphere. *Mathematika*, Vol. 10, pp. 13-24, 1963.
- [11]. Brenner H., The Slow Motion of a Sphere Through a Viscous Fluid Towards a Plane Surface. *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 16, pp. 242-251, 1961.
- [12]. Goldman A.J., Cox R.G., and Brenner H., Slow Viscous Motion of a Sphere Parallel to a Plane Wall. I. Motion through a quiescent fluid. *Chem. Eng. Sci.* Vol. 22, pp. 637-651, 1967.
- [13]. Goldman A. J., Cox R.G., and Brenner H., Slow Viscous Motion of a Sphere Parallel to a Plane Wall. II. Couette flow. *Chem. Eng. Sci.* Vol. 22, pp. 653-660, 1967.
- [14]. Faxen H., Die Bewegung Einer Starren Kugel Längs Der Achse Eines Mit Zaher Flüssigkeit Gefüllten Rohres, Arkiv för Matematik. *Astronomi och Fysik*, Vol. 17, pp. 1-28, 1923.
- [15]. Happel J., and Brenner H., Low Reynolds Number Hydrodynamics. 4th ed., *Martinus Nijhoff, Dordrecht*, 1986.
- [16]. Ganatos P., Weinbaum S., and Pfeiffer R., A Strong Interaction Theory for the Creeping Motion of a Sphere Between Plane Parallel Boundaries. 1. Perpendicular motion. *J. Fluid Mech.*, Vol. 99, pp. 739-753, 1980.
- [17]. Ganatos P., Pfeiffer R., and Weinbaum S., A Strong Interaction Theory for the Creeping Motion of a Sphere Between Plane Parallel Boundaries. 2. Parallel motion. *J. Fluid Mech.*, Vol. 99, pp. 755-783, 1980.
- [18]. Sune L., and Martin R.M., Force-Coupling Method for Particulate Two-Phase Flow: Stokes Flow. *J. Computational Physics*, Vol. 184, pp. 381-405, 2003.
- [19]. 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.
- [20]. Ai Y., Joo S.W., Jiang Y., Xuan X., and Qian S., Pressure-Driven Transport of Particles Through a Converging-Diverging Microchannel. *BioMicrofluidics*, Vol. 17, No. 9, 2009.
- [21]. 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.
- [22]. 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.
- [23]. 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.
- [24]. Razaghi Reza, and Saidi Mohammad Hassan, Experimental investigation of drag and lift forces on microparticles in low Reynolds number poiseuille

- 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 ( $\mu\text{m}$ )، فاصله مرکز ذره تا دیواره پایین
$\hat{d}$	فاصله مرکز ذره تا وسط کانال ( $\mu\text{m}$ )
$F$	نیروی پسا (N)
$g$	شتاب گرانش ( $\text{ms}^{-2}$ )
$h$	ارتفاع کانال ( $\mu\text{m}$ )
$L$	طول کانال (mm)
$W$	عرض کانال (mm)
$V$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )
$x$	فاصله مرکز ذره تا ورودی کانال همگرا- واگرا (mm)
$t$	زمان (s)

## علایم یونانی

$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

## زیر نویس ها

$p$	ذره
$f$	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.

- flow in microchannel. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol. 37, No. 12, pp. 1767-1777, 2016.
- [25]. 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.
- [26]. 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.
- [27]. 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.
- [28]. 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.
- [29]. 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.
- [30]. 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.