

## بررسی تجربی و عددی جریان دو فازی جامد - مایع در میکرو کانال مستقیم با مقطع مستطیلی

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، r\_afraziabi@nigc.azar.ir

رضا افراسیابی

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، n.pormahmod@urmia.ac.ir

نادر پورمحمود\*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران، i.mirzaee@urmia.ac.ir

ایرج میرزائی

### چکیده

در این تحقیق پارامترهای تاثیرگذار بر جریان های حاوی ذرات جامد در میکروکانال مستقیم با ارتفاع ۲۳۰ میکرومتر به روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است اندازه ذرات مورد استفاده ۲۰، ۳۱/۷ و ۵۱/۷ میکرون با چگالی ۱/۰۵ گرم بر سانتی متر مکعب و ضریب شکست آنها ۱/۵۹ می باشد. همچنین رژیم مورد بررسی جریان استوکس با عدد رینولدز پایین تر از یک و لایه ای بوده و لذا از اثرات توربولانسی جریان صرفنظر می گردد. روش تجربی مورد استفاده روش دنبال کردن ذره مبتنی بر تکنیک تصویربرداری، مشاهده و ثبت و پردازش داده ها و روش عددی با نرم افزار Open Foam بر اساس رهیافت اولبری- لاگرانژی می باشد. نتایج بررسی نشان می دهد که علاوه بر سرعت ذرات در جهت X (در طول کانال) سرعت ذرات در جهت Y (عرض کانال) تا ۶۰ درصد، سرعت ذرات را کاهش می دهد. گرادیان فشار نسبت به تنش برشی سهم بیشتری در انتقال ذرات دارد. با افزایش عدد رینولدز ته نشینی ذرات کمتر می شود. نتایج عددی نشان می دهد تماس ذرات در فاصله ۲۰ میکرومتری دیواره به تعادل رسیده و بیشتر از این مقدار به دیواره نزدیک نمی شوند. **واژه های کلیدی:** میکروکانال، تنش برشی، دوفازی، اثرات دیواره، Open Foam.

## Experimental and numerical study of solid-liquid biphasic flow in direct microchannels with rectangular cross section

R. Afrasiabi  
N. Pormahmoud  
I. Mirzaei

Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran  
Department of Mechanical Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

### Abstract

In this research, the parameters affecting the flows containing solid particles in direct microchannels and fabrication of microfluidic instruments 1 with a height of 200 micrometers have been investigated numerically and experimentally. The particle sizes used are 20, 31.7 and 51.7 microns with a density of 1.05 grams per cubic centimeter and a refractive index of between 1.59. Also, the studied regime of Stokes current with Reynolds number is lower than one and calm and therefore the turbulent effects of the current are excluded. The experimental method used is Particle 2 tracking method based on imaging technique, observation and recording and data processing and numerical method with open foam software based on the Eulerian-Lagrange approach. The results show that in addition to the particle velocity in the X direction (along the channel), the particle velocity in the y direction (channel width) reduces the particle velocity by up to 60%. The pressure gradient has a greater share in particle transport than the shear stress. As the Reynolds number increases, the particle deposition decreases. Numerical results show that the particles reach equilibrium at 20 micrometers of the wall and do not approach the wall more than this amount.

**Keywords:** Microchannel, Shear, Stress, Two Phase, Wall Effects, Open Foam.

### ۱- مقدمه

بسیار بالاست. در جریان های لایه بندی شده، جریان به صورت دولایه کاملاً مشخص جامد و مایع وجود دارد [۴]. یکی از روش های متداول در اندازه گیری میدان سرعت ذرات خصوصاً ریز در میکروکانال ها روش دنبال کردن ذره است که در آن هر ذره به تنهایی دنبال شده و با تصویربرداری از موقعیت ذره مورد نظر میدان سرعت ذره بدست می آید. این روش که بر اساس مشاهده و تصویربرداری از ذرات استوار است به منظور تعیین میدان سرعت ذرات با اندازه های میکرونی و بزرگتر مورد استفاده قرار می گیرد. [۲۰]. هدف اصلی این مقاله بررسی تجربی و عددی انتقال ذرات میکرونی کروی در داخل میکروکانال در جریان پوازی با عدد رینولدز پایین را می توان بدین صورت طبقه بندی نمود: حل عددی حرکت یک ذره کروی جامد خنثی در داخل یک میکروکانال، تعیین میدان سرعت ذره در فواصل بسیار نزدیک به دیواره، مدلسازی تجربی انتقال ذره در داخل میکروکانال از طریق

جریان های دو فاز مایع-جامد جریان هایی هستند که در آن ذرات جامد در مایع معلق هستند. در این نوع جریان ها فاز مایع به عنوان فاز اصلی، فاز اول، فاز داخلی و یا فاز پراکنده کننده و ذرات جامد به عنوان فاز دوم، فاز خارجی و یا فاز پراکنده شده به شمار می رود. مجموع این دو فاز یک سیستم پراکنده را تشکیل می دهد. ابعاد ذرات پخش شونده (فاز دوم) می تواند بسیار متغیر باشد. ذرات فاز پراکنده معمولاً مواد جامدی هستند که در فاز پراکنده کننده غیر محلول می باشند [۲]. جریان های دوفازی جامد- مایع با توجه به سرعت جریان به چهار دسته تقسیم می شوند: ۱- همگن ۲- شبه همگن ۳- ناهمگن ۴- لایه بندی شده. در جریان های همگن و شبه همگن غلظت و اندازه ذرات به قدری پائین است که مخلوط مایع و جامد رفتاری مشابه یک ماده تک فاز با لزجت یکسان دارد. در جریان ناهمگن ذرات به گونه ای درشت می باشند و یا سرعت به قدری پائین است که تمایل ته نشینی ذرات

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: n.pormahmod@urmia.ac.ir

تکنیک دنبال کردن ذره شامل: فراوری مخلوط دو فازی مایع-جامد با غلظت کم (رقیق)، تصویر برداری از ذرات از طریق میکروسکوپ نوری معکوس مجهز به سیستم تصویر برداری و از طریق روش پردازش تصویر میدان و محاسبه سرعت ذرات در فواصل مختلف از دیواره محاسبه تاثیر نیروی برشی نسبت به نیروی فشاری در حرکت ذرات، تاثیر عدد رینولدز بر سرعت ذرات به روش تجربی و تاثیر دیواره های کناری بر حرکت ذرات به روش عددی می باشد

رزاقی و همکاران در سال ۲۰۱۶ میلادی مقاله‌های تحت عنوان سرعت دامنه و توزیع کسر حجمی میکروذرات سنگین در جریانی با رینولدز پایین درون میکروکانال را ارائه کردند. در این مقاله یک جریان دو بعدی استوکس با توزیع اندازه ذرات در محدوده ۱۰ میکرون تا ۵۰ میکرون در یک کانال مستطیلی به صورت عددی با تمرکز بر نیروهای هیدرودینامیکی شبیه سازی شده است. [۱۸]. رزاقی و سعیدی در سال ۲۰۱۶ میلادی مقاله‌های تحت عنوان بررسی تجربی نیروهای برا و پسابر روی میکروذرات در جریان پواری با رینولدز پایین درون میکروکانال را ارائه کردند. زینگ و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی مقاله‌ای تحت عنوان تجزیه و تحلیل نظری در مورد تاثیر نسبت ابعاد بر روی جریان لایه ای تک فاز در کانال‌های مستطیلی ارائه کردند. [۲۱]. مقاله‌ای تحت عنوان شبیه‌سازی سه‌بعدی انتقال حرارت در سوسپانسیون ذرات جامد در میکروکانال‌ها با روش شبکه بولتزمن در سال ۲۰۱۳ توسط هاشمی و همکاران ارائه شده است. در این مقاله مدل سه‌بعدی روش LBM حرارتی جهت شبیه‌سازی برهمکنش بین سوسپانسیون ذرات جامد با میدان جریان استفاده و اثرات هیدرودینامیکی و حرارتی در عملکرد میکروکانال‌ها با مقطع مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. [۷]. کیم و یو در سال ۲۰۱۲ میلادی مقاله‌ای تحت عنوان انتقال ذرات جامد در کانال‌های میکرو سیالی ارائه کردند. هدف از ارائه مقاله، چگونگی مطالعات روی انتقال ذرات جامد که از دینامیک سیالات کلاسیک به میکروسیالات جدید از نظر تکنیک‌های اندازه‌گیری، ویژگی‌های جریان و برنامه‌های کاربردی تکامل یافته شده است [۱۰]. مقاله‌ای تحت عنوان انتقال حرارت در میکروکانال‌ها با سوسپانسیون ذرات جامد: محاسبات بر مبنای معادله شبکه توسط خیابانی و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه شده است [۹]. آی و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی مقاله‌ای عددی تحت عنوان انتقال ذرات تحت فشار از طریق یک میکروکانال همگرا-واگرا ارائه کردند [۱۱]. مقاله‌ای تحت عنوان حرکت ذرات سه‌بعدی با روش شبکه بولتزمن توسط ایگل برگر و همکاران در سال ۲۰۰۸ ارائه شده است [۸]. ژان و لی در سال ۲۰۰۶ میلادی مقاله‌ای تحت عنوان حرکت ذرات در اعداد رینولدز پایین با جریان تحت فشار از طریق میکرو کانال‌های همگرا-واگرا ارائه کردند [۲۲]. شینجی اوکاواری و همکاران در سال ۲۰۰۴ میلادی مقاله‌ای تحت عنوان مطالعه امکان‌سنجی در غلظت دوغاب و طبقه‌بندی ذرات موجود در میکروکانال ارائه کردند [۱۵]. مقاله‌ای تحت عنوان نیروهای بین‌ذره‌ای و برا بر روی ذرات چسبیده به مرز جامد در جریان سوسپانسیون توسط فنگ و همکاران در سال ۲۰۰۲ ارائه گردیده است [۵]. هدف اصلی در این تحقیق بررسی تاثیر پارمترهای تاثیر گذار از جمله: حرکت ذرات در جهت y، دیواره های کناری، تنش برشی وگرادیان فشار بر سرعت ذرات می باشد. ته نشینی ذرات داخل یک کانال یکی از پدیده های مخرب در انتقال ذرات به شمار می رود. یکی از نوآوری ها و گام های ابتکاری این

مقاله مشاهده پدیده ته نشینی و تاثیر پارامتر های هیدرودینامیکی و هندسی موثر بر آن و طراحی آزمایشات تجربی لازم به منظور نیل به این هدف است نتایج مهم این مقاله شامل تاثیر نیروی فشار نسبت به نیروی برشی در حرکت ذرات و اثرات دیواره بر حرکت ذرات به صورت روش عددی با نرم افزار Open Foam و روش تجربی و مقایسه دو روش می باشد.

## ۲- مدل‌سازی عددی حرکت ذره در کانال مستقیم

اولین مرحله جهت حل یک مسأله در مورد جریان چند فاز پی بردن به این نکته است که این جریان جزو کدامیک از رژیم های جریان چند فاز است. پس از مشخص شدن رژیم جریان باید رهیافت مناسب را برای حل آن انتخاب نمود. در ادامه نحوه انتخاب رهیافت مناسب برای حل رژیم های مختلف جریان چند فاز بررسی می شود. در رهیافت اولبری-لاگرانژی فاز گسسته با برخورد لاگرانژی و فاز پیوسته با برخورد اولبری حل می شود. در این روش معادلات انتقال برای فاز پیوسته حل می شود. ذرات فاز گسسته (حباب ها، قطرات و ذرات جامد) درون فاز پیوسته قرار دارند. مسیر حرکت ذرات فاز گسسته با استفاده از روابط لاگرانژی دنبال می شود. خط سیر ذرات، با استفاده از قانون دوم نیوتن به شرح ذیل محاسبه گردیده است:

$$du_p/dt = F_D(u - u_p) + g_x(\rho_p - \rho)/\rho_p + F_x \quad (1)$$

که  $F_D(u-u_p)$  نیروهای پسا در جرم واحد ذره می باشد. نیروی پسا از طریق رابطه زیر بدست می آید:

$$F_D = (18\mu/\rho_p dp^2) (C_D Re/24) \quad (2)$$

که در آن  $u$  سرعت فاز سیال،  $u_p$  سرعت ذره،  $\mu$  لزوجت سیال،  $\rho$  چگالی سیال،  $\rho_p$  چگالی ذره و  $d_p$  قطر ذره می باشد. در معادله خط سیر ذرات  $F_x$  نیرو های اضافه شده شامل: گرادیان سرعت، ترموفورتیک، نیروهای براونی، نیروی برای سافمن می باشد.

نیروی گرادیان سرعت از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$F_x = (\rho/\rho_p) u_p \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

نیروی برای سافمن ناشی از تنش برشی برای اعداد رینولدز کوچک از فرمول زیر محاسبه می شود:

$$F_L = \frac{2kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik}d_{kl})^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (4)$$

که در رابطه فوق  $k=2/594$  و  $d_{ij}$  تانسور تغییر شکل استجریان 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 میکرو می باشد می توان از اثرات توربولانسی جریان صرفنظر نمود. کانال مورد بررسی مستطیلی بوده و دارای یک ورودی و خروجی می باشد. خروجی کانال در فشار اتمسفر قرار دارد طرحواره کانال در شکل ۱ ارائه شده است. مشخصات کانال و ذرات مورد بررسی در جدول ۱ ارائه شده است.

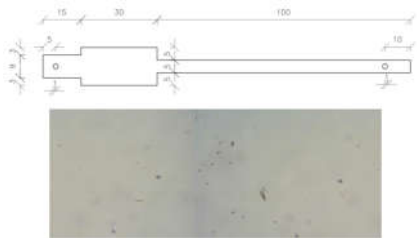
جدول ۱- مشخصات فیزیکی مدل و جریان

ردیف	شرح	مقدار
۱	طول کانال (L)	۱ (cm)

### ۳- مدلسازی تجربی جریان دوفاز مایع - جامد در

#### میکرو کانال مستقیم با مقطع مستطیلی

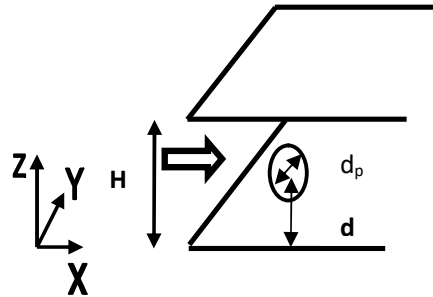
آزمایشات انجام شده را می توان به سه دسته تقسیم نمود. در قسمت اول از آزمایشات، سوسپانسیون ها با غلظت مورد نظر و با خواص ترموفیزیکی مناسب تهیه گردند. در قسمت دوم آزمایشات، ذرات موجود در سوسپانسیون با استفاده از میکروسکوپ، مورد بررسی قرار گرفته و میکروسکوپ مورد استفاده، میکروسکوپ نوری از نوع معکوس بوده که در آن عدسی شی در زیر کانال قرار می گیرد. با چرخاندن دو پیچ تنظیم عدسی می توان ارتفاع کانال را مشاهده نمود. بر روی عدسی دوم چشمی یک دوربین فیلمبرداری با کیفیت تصویر ۲ مگاپیکسلی که قابلیت تصویر برداری ۲۵ فریم بر ثانیه را دارا می باشد قرار دارد که کار تصویربرداری از ذرات را انجام می دهد و میدان دید آن در حدود ۱ میلی متر مربع است. این دوربین از طریق یک کابل به یک کامپیوتر متصل است. تصاویر گرفته شده جریان از طریق یک نرم افزار بر روی کامپیوتر قابل مشاهده و ذخیره هستند. قسمت سوم آزمایشات مربوط به ضبط و ذخیره تصاویر جریان و پردازش آنها به منظور تعیین میدان سرعت ذرات است. روش کار در این قسمت بدین صورت است که حرکت هر ذره در فاصله معینی از ارتفاع کانال برای مدت حدود ۱۰ دقیقه تصویربرداری و ذخیره می شوند و پس از تصویر برداری در هر سطح از کانال، تصاویر مشاهده شده و ذراتی که دارای وضوح تصویر بالایی هستند مشخص و علامتگذاری می شود، سپس فیلم ها از طریق نرم افزار Adobe Premier<sup>۴</sup> به عکس تبدیل می شوند. در هر تصویر موقعیت مکانی ذرات بر حسب Pixel در محیط دو بعدی X و Y توسط نرم افزار Photoshop مشخص می شوند. با مقایسه دو تصویر متوالی به فاصله زمانی ۱ ثانیه و تعیین مختصات مکانی ذره در هر دو تصویر می توان بردار جابجائی ذره را مشخص نمود و چون ذره این جابجائی را طی مدت زمان مشخص طی نموده، می توان سرعت متوسط هر ذره را در جهت X, Y بر حسب میکرومتر بر ثانیه بدست آورد. شکل ۴ نشان دهنده ابعاد میکروکانال ساخته شده و مورد استفاده در آزمایشات و نمونه تصاویر گرفته شده را نشان می دهد.



شکل ۴- میکروکانال ساخته شده (بعد عمود بر صفحه ۲۳۰ میکرومتر می باشد)

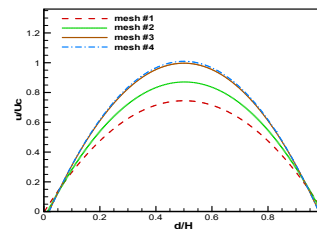
همانطور که از شکل پیداست ورودی این میکروکانال توسط یک سوراخ ۰/۵ میلی متری راه ورود جریان سوسپانسیون به داخل کانال می باشد. پس از آن سوسپانسیون در یک محفظه ورودی و قبل از ورود به کانال اصلی به طول ۳۰ میلی متر جریان پیدا می کند. این محفظه

۲	عرض کانال (W)	۵ (mm)
۳	ارتفاع کانال (H)	۲۳۰ (μm)
۴	قطر ذره (d <sub>p</sub> )	۲۰ و ۳۱/۷ و ۵۱/۷ (μm)
۵	عدد رینولدز (Re)	۰/۰۰۵ و ۰/۰۰۶ و ۰/۰۰۷
۶	چگالی ذره (ρ <sub>p</sub> )	۱۰۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )
۷	چگالی سیال حامل (ρ <sub>f</sub> )	۱۰۵۰ (kg/m <sup>3</sup> )

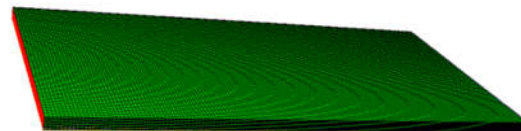


شکل ۱- طرح حواره کانال سه بعدی با سطح مقطع مستطیلی

تمام محاسبات در نرم افزار Open Foam<sup>۱</sup> انجام شده است. از حل کننده تفکیکی<sup>۲</sup> برای حل معادلات حاکم بر سیال و برای خطی سازی معادلات حاکم از فرم ضمنی<sup>۳</sup> استفاده شده است. برای همه معادلات انتقال، جملات جابجایی و دیفیوژن طبق طرح گسسته سازی قاعده توانی گسسته شده است. اتصال فشار و سرعت به وسیله الگوریتم SIMPLE انجام شده است. مش بندی حاضر توسط نرم افزار Open Foam انجام شده و مش بندی های مختلف برای به دست آوردن مش بهینه در شکل ۲ نشان داده شده است. مش بهینه در شکل ۳ تعداد ۲۰۰، ۱۵۰ و ۵۰ مش به ترتیب در جهت X, Y و Z می باشد. U<sub>C</sub> سرعت سیال، در غیاب ذرات می باشد.



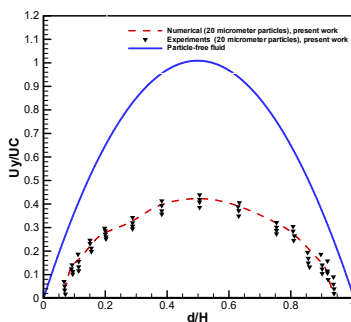
شکل ۲- نمودار سرعت بی بعد بر حسب فاصله مرکز ذره تا دیواره پایینی به منظور بدست آوردن شبکه بهینه



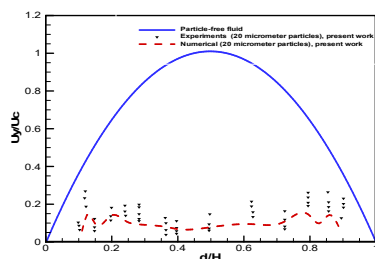
شکل ۳- مش بهینه

<sup>۱</sup> Open foam  
<sup>۲</sup> Segregated Solver  
<sup>۳</sup> Implicit

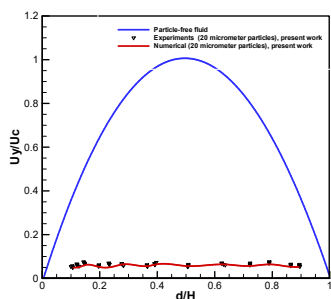
<sup>۴</sup> Adobe Premier



شکل ۶- نتایج تجربی سرعت در جهت  $y$  ذرات،  $\frac{U_y}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر



شکل ۷- نتایج تجربی سرعت در جهت  $y$  ذرات،  $\frac{U_y}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۲۹/۷ میکرومتر



شکل ۸- نتایج تجربی سرعت در جهت  $y$  ذرات،  $\frac{U_y}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۵۱/۷ میکرومتر

شکل های ۹ تا ۱۱ نشان دهنده مقایسه بین میدان سرعت ذرات مورد استفاده ( $u$ ) که با میانگین سرعت جریان فاقد ذره در وسط کانال بی بعد شده است، بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی ( $d$ ) که با ارتفاع کانال ( $H$ ) بی بعد شده است می باشد. خط پر نشان دهنده پروفیل سرعت جریان تکفاز کاملاً توسعه یافته داخل کانال مستطیلی که از طریق حل عددی سه بعدی به دست آمده بوده و خطوط نقطه چین نتایج حاصل از شبیه سازی عددی جریان دو فاز مایع-جامد برای ذرات با نسبت قطر به ارتفاع  $\left(\frac{d_p}{H}\right)$  معادل ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ می باشد. پیشینه اختلاف سرعت ذرات در مدل سازی تجربی نسبت به شبیه سازی عددی در نواحی میانی کانال در  $\frac{d_p}{H} = 0/1$  حدود ۲ درصد و در نواحی نزدیک به دیواره ها ۱۰ درصد، در  $\frac{d_p}{H} = 0/2$  ۵ درصد و در نواحی نزدیک دیواره ها ۱۵ درصد و در  $\frac{d_p}{H} = 0/3$  پیشینه اختلاف سرعت ذره و سیال

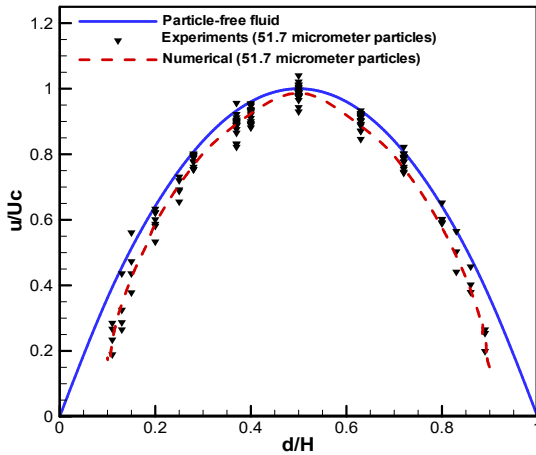
جهت آرام سازی جریان و حذف کلیه اغتشاشات احتمالی جریان تعبیه گردیده است. سپس جریان از این محفظه به داخل کانال به طول ۱۰ سانتی متر، عرض ۵/۵ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میکرومتر جریان پیدا کرده و از طریق یک سوراخ ۰/۵ میلی متری از داخل کانال بیرون می رود. در ورودی و خروجی کانال ۲ سوزن به قطر خارجی ۰/۴۷ میلی متر تعبیه و آب بندی گردیده است. نصب سوزن ها به گونه ای بوده که در مقابل ورود جریان به داخل کانال و یا خروج آن ممانعتی بعمل نمی آورد. ساخت این میکروکانال در مرکز جهاد دانشگاهی دانشگاه انجام گردیده شریف و توسط روش (Wet Etching) و جنس شیشه انجام گردیده است. شکل ۵ نشان دهنده میکروکانال ساخته شده می باشد.



شکل ۵- میکروکانال ساخته شده

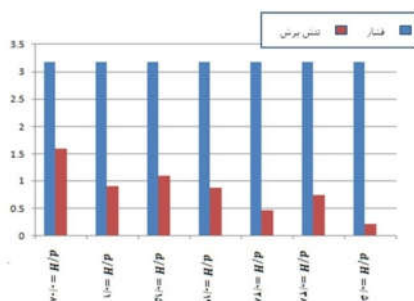
#### ۴- نتایج

رژیم مورد بررسی جریان، استوکس با عدد رینولدز پایین تر از یک و لایه ای بوده و لذا از اثرات اغتشاشی جریان صرف نظر می گردد. روش تجربی مورد استفاده روش دنبال کردن ذره مبتنی بر تکنیک تصویربرداری، مشاهده و ثبت و پردازش داده ها می باشد. در ابتدای بحث ابتدا بستر آزمایش و طراحی آزمایشات انجام شده مورد بررسی قرار می گیرد. سپس، کالیبراسیون میکروکانال و پمپ سرنگی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در نهایت، به نتایج حاصل از میدان سرعت ذرات در سطح مقطع کانال و اثرات دیواره بر رفتار هیدرودینامیکی ذرات پرداخته می شود. در شکل های ۶ تا ۸ سرعت در جهت  $y$  ذرات در قطرهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که نسبت به سرعت سیال در غیاب ذرات ( $U_c$ ) بی بعد شده است. محور  $x$  های شکل ها ارتفاع کانال در  $d/H$  های مختلف می باشد همانطور که در شکل ها مشهود است سرعت ذرات در جهت  $y$  در دو حالت تجربی و عددی با سرعت سیال بدون ذره مورد مقایسه قرار گفته است نتایج نشان می دهد که سرعت در جهت  $y$  ذرات بیشتر در قطر ۲۰ میکرومتر تحت تاثیر قرار گرفته و در قطرهای ۳۱/۷ و ۵۱/۷ به علت سنگینی ذرات تاثیر آنچنانی بر سرعت ذرات نداشته است. نتایج نشان می دهد سرعت ذرات در جهت  $y$  ( عرض کانال ) تا ۶۰ درصد، سرعت ذرات را کاهش می دهد زمانیکه یک ذره در موقعیتی از کانال قرار میگیرد اختلاف زیاد سرعت اطراف ذره و گرادیان فشار باعث نیروی لیفت و درگ بر روی ذره می شود در نتیجه عامل اصلی اختلاف سرعت ذرات با سرعت جریان به دلیل نیروی پسای بوجود آمده از گرادیان فشار و تنش برشی اطراف ذره می باشد.



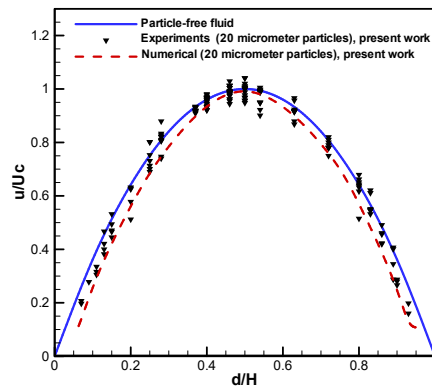
شکل ۱۱- نتایج تجربی سرعت ذرات،  $\frac{u}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۵۱/۷ میکرومتر

علاوه بر تنش برشی، گرادیان فشار نیز بر سرعت ذرات در نواحی مختلف میکروکانال تاثیر می گذارد. همچنین فشار در مقطع مستقیم کانال از معادله  $\frac{P_1 - P_2}{l} = \frac{3}{4} \bar{P}$  میکروپاسکال می باشد [16]. جهت بررسی تنش برشی از معادله  $\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial Y}$  ابتدا نمودار سرعت  $U$  بر حسب  $Y$  رسم شده است. شیب نمودار مذکور در نواحی مختلف، گرادیان سرعت را نشان می دهد که بر اساس آن می توان تنش برشی در نواحی مختلف را محاسبه کرد. سهم تنش برشی و فشار در شکل های ۱۲ تا ۱۴ برای قطرهای مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد گرادیان فشار نسبت به تنش برشی سهم بیشتری در تغییرات سرعت ذرات در قطرهای مختلف ذرات دارد. اختلاف سرعت سیال در اطراف ذره به دلیل تنش برشی سیال باعث ایجاد نیروی لیفت در ذرات شده و سرعت ذرات بیشتر تحت تاثیر گرادیان فشار ایجاد شده در کانال می باشد.

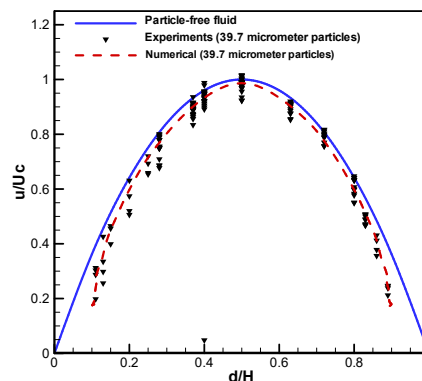


شکل ۱۲- سهم تنش برشی و فشار بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر

در نواحی نزدیک به دیواره ها حدود ۱۹ درصد می باشد. اختلاف سرعت ذرات با سرعت جریان به دلیل نیروی درگ بوجود آمده از گرادیان فشار و تنش برشی اطراف ذره می باشد. دلیل اصلی اختلاف زیاد سرعت سیال و ذرات در کار تجربی و عددی، وجود ناهمواری های دیواره در میکروکانال ساخته شده به روش اسپینگ تر می باشد. همچنین با افزایش قطر ذرات فاصله ذره تا دیواره کاهش یافته و اثرات دیواره ناهموار در کار تجربی باعث افزایش بیشینه اختلاف سرعت ذرات در مدلسازی تجربی نسبت به شبیه سازی عددی می گردد.



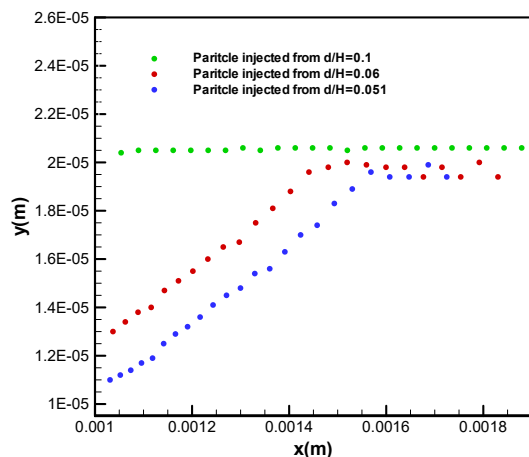
شکل ۹- نتایج تجربی سرعت ذرات،  $\frac{u}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر



شکل ۱۰- نتایج تجربی سرعت ذرات،  $\frac{u}{U_c}$  بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$  برای ذرات با قطر ۳۹/۷ میکرومتر

جهت بررسی نیروی لیفت وارد بر ذرات در نزدیکی دیواره از حل عددی استفاده شده است. عدم استفاده از حل تجربی این است که می بایست از ذرات در راستای  $\gamma$  فیلمبرداری گردد. برای این امر باید دوربین در ۱ میلیمتری نزدیک دیواره کناری قرار گیرد. تراشیدن اطراف میکروکانال باعث از بین رفتن چسب های موجود در دیواره بالایی و پایینی می شود به همین دلیل از حل عددی جهت بررسی نیروی لیفت وارد بر ذرات از طرف دیواره و به تعادل رسیدن آنها مورد استفاده قرار گرفته است. مطابق شکل (۱۶) سه ذره در نسبت فاصله به ارتفاع های  $0.1, 0.06, 0.051$  به داخل کانال با سرعت اولیه برابر سرعت سیال تزریق شده است. نتایج نشان میدهد ذرات در ۲۰ میکرومتری دیواره به تعادل رسیده و در این فاصله از دیواره به حرکت خود ادامه میدهند. از طرف دیواره به ذرات نیروی روانکاری دیواره وارد شده و ذرات بیشتر از فاصله ۲۰ میکرومتری به دیواره نزدیک نمی شوند.

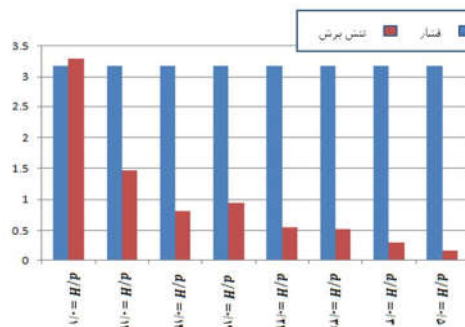
( WALL LUBRICATION FORCE )



شکل ۱۶- نتایج عددی دنبال کردن ذرات در  $\frac{d}{H}$  های نزدیک دیواره جهت بررسی تاثیر دیواره بر ذرات

## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور بررسی پارامترهای تاثیرگذار در میکروکانال مستقیم حاوی جریان دوفازی جامد- مایع، آزمایشات تجربی و شبیه سازی سه بعدی با رهیافت اولیری- لاگرانژی بر روی جریان در یک میکروکانال مستقیم با مقطع مستطیلی با ارتفاع ۲۳۰ میکرومتر انجام شده است. به منظور بررسی رفتار هیدرودینامیکی تک ذره داخل کانال از یک هدف اصلی در این پژوهش بررسی سرعت ذرات در جهت عرض کانال، تاثیر نیروی فشاری و تنش برشی بر سرعت ذرات، ته نشینی ذرات و اثر دیواره های پایین- بالا بر ذرات می باشد. برای این منظور از ۳ نوع ذره با قطرهای  $2.0 \pm 0.4, 3.9 \pm 0.4$  و  $5.1 \pm 0.4$  میکرومتر استفاده گردیده است. جنس ذرات پلی استایرن و از لحاظ بارهای الکتروستاتیکی خنثی می باشد. چگالی ذرات ۱۰۵۰ گرم بر سانتی متر مکعب و ضریب شکست آنها ۱/۵۹ می باشد. رژیم مورد بررسی جریان، استوکس با عدد رینولدز پایین تر از یک و لایه ای بوده و لذا از اثرات اغتشاشی جریان صرفنظر می گردد. روش تجربی مورد استفاده روش دنبال کردن ذره مبتنی بر تکنیک

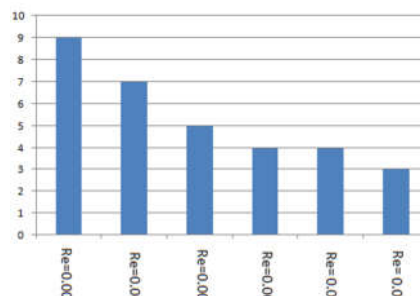


شکل ۱۳- سهم تنش برشی و فشار بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$ ، برای ذرات با قطر  $3.9/7$  میکرومتر



شکل ۱۴- سهم تنش برشی و فشار بر حسب فاصله مرکز ذرات از دیواره پایینی،  $\frac{d}{H}$ ، برای ذرات با قطر  $5.1/7$  میکرومتر

مطابق شکل (۱۵) ته نشینی ذرات در میکروکانال مستقیم نشان داده شده است. با توجه به شکل ته نشینی ذرات در کانال مستقیم تا ۳ دقیقه اول اتفاق می افتد. مطابق شکل ۱۵ با افزایش عدد رینولدز ته نشینی ذرات کاهش پیدا می کند. دلیل اصلی این امر افزایش سرعت ذرات و افزایش نیروی لیفت ناشی از اختلاف سرعت در اطراف ذره می باشد.



شکل ۱۵- تاثیر عدد رینولدز بر ته نشینی ذرات برای ذرات با قطر ۲۰ میکرومتر

- multiphase flows using filtering functions. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001. 27(12): p. 2129-2153.
- [12] Kulshreshtha, A.K., O.N. Singh, and G.M. Wall, Pharmaceutical suspensions. From Formulation Development to Manufacturing. Springer, New York, 2010.
- [13] Lomholt, S. and Maxey, M.R., Force-coupling method for particulate two-phase flow: Stokes flow. *Journal of Computational Physics*, 2003. 184(2): p. 381-405.
- [14] Myung, J.S., Song, Sunjin, Ahn, Kyung Hyun, Lee, Seung Jong, Self-consistent particle simulation of model-stabilized colloidal suspensions. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2011. 166(19): p. 1183-1189.
- [15] Ookawara, S., Higashi, R., Street, D and Ogawa, K., 2004, Feasibility study on concentration of slurry and classification of contained particles by microchannel, *Chemical Engineering Journal* 101, 171-178.
- [16] Razaghi, R and Saidi, M.H., 2016, Experimental Investigation of Drag and Lift Forces on Microparticles in Low Reynolds Number Poiseuille Flow in Microchannel, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Volume37-issue12,P:1767-1777.
- [17] Razaghi, R and Saidi, M.H., 2015, Transportation and Settling Distribution of Microparticles in Low-Reynolds-Number Poiseuille Flow in Microchannel, *Journal of Dispersion Science and Technology*, Volume37-issue4,P:582-594.
- [18] Razaghi, R., Shirinzadeh, F., Zabetian, M and Aghanoorian, E., 2016, Velocity Domain and Volume Fraction Distribution of Heavy Micro-Particles in Low-Reynolds Number Flow in Microchannel, *Journal of Dispersion Science and Technology*. Volume0-issue ja
- [19] Wang, L., Guo, Z.L., Shi, B.C., and Zheng, C.G., 2013, Evaluation of three lattice Boltzmann models for particulate flows, *Commun. Comput. Phys.*, 13: 1151-1172.
- [20] White, F.M., 2006, *Viscous Fluid Flow*, MacGraw-Hill, Third Edition, 168-170.
- [21] Xing, Di., Yan, C., Wang, C and Sun, L., 2013, A theoretical analysis about the effect of aspect ratio on single-phase laminar flow in rectangular ducts, *Progress in Nuclear Energy* 65 ,1-7.
- [22] Xuan, X and Li, D., 2006, Particle motions in low-Reynolds number pressure-driven flows through converging-diverging microchannels, *Micromech Microeng*, 16: p62-69.
- [23] Nikoubashman, A., Likos, C.N., and Kahl, G., Computer Simulations of Colloidal Particles Under Flow in Microfluidic Channels, *Soft Matter* 9, vol. 9, pp. 2543-2770, 2013.

تصویربرداری، مشاهده و ثبت و پردازش داده ها می باشد. نتایج عددی جهت صحت سنجی نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفته است و حاکی از تطابق قابل قبول حل عددی و تجربی می باشد. نتایج تجربی و عددی نشان می دهد سرعت در جهت Y ذرات بیشتر در قطر ۲۰ میکرومتر مشهود بوده و در قطرهای دیگر به علت سنگینی ذرات تحت تاثیر قرار نمی گیرد. نتایج تجربی و عددی نشان می دهد اندازه گیری میدان سرعت ذرات با قطر  $20 \pm 0.5$  میکرومتر نشان می دهد که ماکزیمم اختلاف سرعت ذرات در مدلسازی تجربی نسبت به شبیه سازی عددی در نواحی میانی کانال حدود ۲ درصد و در نواحی نزدیک به دیواره ها ۱۰ درصد می باشد. این اختلاف در قطرهای دیگر افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد گرادیان فشار نسبت به تنش برشی سهم بیشتری در تغییرات سرعت ذرات در قطرهای مختلف ذرات دارد. یکی از پدیده های مضر در میکرو کانال ها ته نشینی ذرات و متعاقب آن مسدود شدن کانال می باشد. یکی از نتایج این رساله بررسی ته نشینی ذرات می باشد. نتایج نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز ته نشینی ذرات کاهش پیدا می کند. دلیل اصلی این امر افزایش سرعت ذرات می باشد. یکی دیگر از نتایج عددی این رساله بدست آوردن نیروی پسا و برآ بر حسب ارتفاع کانال می باشد نتایج نشان می دهد که ذرات در ۲۰ میکرومتری دیواره به تعادل رسیده و در این فاصله از دیواره به حرکت خود ادامه میدهند.

#### ۶- منابع

- [1] Ai, Y., Joo, S.W., Jiang, y., Xuan, X., and Qian, s., 2009, Pressure-driven transport of particles through a converging-diverging microchannel. *Biomicrofluidics* 3, 022404.
- [2] Allen, T., Particle Size Measurement: Volume 2: Surface Area and Pore Size Determination. Vol. 2. 1997: Springer Science & Business Media.
- [3] Ashwood, A., Hogen, SJ Vanden, Rodarte, M.A., Kopplin, C.R., Rodríguez, 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*, 2015. 68: p. 27-39.
- [4] Crowe, C.T., *Multiphase flow handbook*. 2014: CRC press.
- [5] Fang, Z.G. and Michaelides, E.E., 2002, Interparticle forces and lift on a particle attached to a solid boundary in suspension flow, *Phys. Fluids* v14, pp 49-60.
- [6] 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*, 2001. 44(3): p. 298-308.
- [7] Hashemi, Z., Abouali, O., and Kamali, R., 2013, Thermal three-dimensional Lattice Boltzmann simulations of suspended solid particles in microchannels, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65, p 235-243.
- [8] Iglberger, K., Thiirey, N., and Rude, U., 2008, Simulation of moving particles in 3D with the lattice Boltzmann method, *Computers & Mathematics with Applications* 55 .p 1461-1468.
- [9] Khiabani, R.H. and Joshi, Y. and Aidun, C.K., 2010, Heat transfer in microchannels with suspended solid particles: lattice-Boltzmann based computations, *Journal of Heat Transfer*, vol. 132, 4, p.1-9.
- [10] Kim Y.W and Yoo J.Y., 2012, Transport of solid particles in microfluidic channels, *Optics and Lasers in Engineering* 50, 87-98.
- [11] Kitagawa, A., Murai, Y., and Yamamoto, F., Two-way coupling of Eulerian-Lagrangian model for dispersed