



تحلیل سیالاتی جریان ذرات جامد درون نازل به کمک مدل دو فازي اویلر-لاگرانژ

رضا سلطانی^۱، سبحان صفوی منش^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی/مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا/دانشگاه صنعتی مالک اشتر/شاهین شهر/اصفهان/ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی/مجمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا/دانشگاه صنعتی مالک اشتر/شاهین شهر/اصفهان/ایران

*safavisobhan@gmail.com

ارسال: بهمن ماه ۹۵ پذیرش: اردیبهشت ماه ۹۶

خلاصه

در این تحقیق، در یک شرایط کاملاً اشفته، توزیع پارامترهای سرعت، غلظت، فشار و همچنین نحوه حرکت ذرات در یک نازل با استفاده از مدل دوفازی اویلر-لاگرانژ شبیه سازی شده است. ذرات جامد در ورودی نازل با سرعت بالا به مدت سه ثانیه به جریان هوا درون نازل تزریق می شوند. کل تخلیه ذرات از نازل پنج ثانیه به طول می انجامد. نتایج به دست آمده در قالب نمودارها و کانتورها برای زمان های مختلف بدست آمده است. نتایج حاکی از آن است که همه پارامترهای جریان متأثر از هم هستند. تزریق ذرات جامد به درون نازل باعث بوجود آمدن نواحی کم فشار درون نازل شده است. همچنین نشان خواهیم داد که تغییرات اصطکاک پوسته ای بر حسب زمان رفتاری شبیه به تغییرات غلظت بر حسب زمان دارد. جهت اعتبار بخشی به نتایج، نتایج به دست آمده با نحوه حرکت ذرات درون لوله صحت سنجی شده است و با یک کار عددی - تجربی مقایسه شده است. همچنین تست استقلال از شبکه برای دو پارامتر حساس اشفستگی و هشت شبکه محاسباتی انجام شده است.

کلمات کلیدی: جریان ذرات ؛ مدل دوفازی ؛ اویلر-لاگرانژ ؛ نازل.

۱. مقدمه

اطلاع از چگونگی حرکت ذرات در بستر سیال ها می تواند ایده و کمکی برای جداسازی ذرات جامد از سیال توسط میکرو کانال ها و تجهیزات جداسازی باشد. با توجه به کاربردهای گسترده حرکت ذرات جامد در سیالات، شناخت رفتار سیال در این زمینه می تواند کمکی برای جدا کردن و دفع ذرات از جریان اصلی باشد. جریان های جامد-سیال در بیشتر فرایندهای طبیعی و مکانیکی وجود دارد. از جمله این فرایندها مخلوط کن های مکانیکی و ته نشین شدن شن در آب می باشد. در صنعت نفت و گاز نیز سیالات خام تولید شده از طریق لوله و تجهیزات به ایستگاههای تصفیه مخازن منتقل می شود و در انجا ذرات جامد از سیال خام جدا می شود. ذرات معلق الاینده در هوا و گرد و غبار مخلوط با هوا هنگام ورود به محفظه احتراق از جمله کاربردهای دیگر جریان ذرات است. بنابراین پرداختن به نحوه ی حرکت ذرات درون سیال در شرایط و هندسه های مختلف امری مورد نیاز می باشد. در کارهای اخیر صورت گرفته در این زمینه محققان زیادی مطالعات انجام داده اند. در کارهای اخیر

در داخل کشور در سال ۱۳۹۲ فاطمه سرشتی و مرتضی کلاهدوزان به بررسی تاثیر نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر حرکت ذرات حین رسوب گذاری برای سیال درون کانال پرداخته اند. مدل توسعه داده شده به منظور پیشبینی الگوی جریان سیال از یک روش اولری استفاده میکند. سپس حرکت ذرات رسوب با نگرش لاگرانژی و با اعمال نیروهای مؤثر بر حرکت ذرات و حل معادله انتقال ذره، ردیابی شده است [۱]. حسن سید سراجی و همکاران به ردیابی ذرات ریز جامد (رسوب) درون جریان سیال (آب) در شرایط مرزی جریان آرام و مغشوش پرداخته اند [۲]. الویید در سال ۲۰۱۲ [۳] جریان گاز- جامد را در یک سیلندر استوانه ای شبیه سازی کرده است. این تحلیل در اعداد رینولدز متوسط و با استفاده از مدل اوپلر- لاگرانژ انجام شده است. این شبیه سازی با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است. افت فشار بر حسب زمان و عکس های فوری برای توزیع فضایی ذرات نشان داده شده است. در سال ۲۰۱۳ [۴] شبیه سازی جریان ذرات همراه با انتقال حرارت توسط توسلی و همکاران انجام گرفته شده است. برای حل معادلات مومنتوم از یک شبکه اوپلری استفاده شده است. در این مقاله فعل و انفعالات حرارتی بین مایع و ذرات نشان داده شده است. تمام نتایج رضایت بخش با نتایج تجربی و عددی است. در یک کار عددی در سال ۲۰۱۳ [۵] لسانی و همکاران گردابه های بزرگ را در یک جریان اشفته حامل ذرات جامد مدل کرده اند. در این مطالعه تاثیر ذرات جامد بر انتقال حرارت بررسی شده است. این تحقیق با استفاده از مدل دو فازی اوپلر- لاگرانژ انجام شده است. مطالعه پارامتری رسوب گذاری ذرات در سال ۲۰۱۴ [۶] توسط یانگ انجام شده است. در این تحقیق ذرات الومینیوم در آب در طیف وسیعی تجزیه و تحلیل شده است. این مطالعه یک کار پایه برای بررسی حرکت ذرات متعدد در یک سیال چسبناک است. در سال ۲۰۱۴ [۷] در یک تحلیل سه بعدی با استفاده از مدل دو فازی لاگرانژ جریان های جامد- مایع در یک مخزن استوانه ای دوار مدل سازی شده است. در این تحقیق اثرات ضریب اصطکاک بر رفتار ذرات جامد به وضوح بررسی شده است. در سال ۲۰۱۴ [۸] شبیه سازی سه بعدی جریان گاز- جامد- مایع با استفاده از روش DEM-VOF توسط سان و همکاران انجام شده است. روش ارائه شده در این تحقیق موفق و با داده های تجربی صحت سنجی شده است. در این مقاله تصاویری از ورود ناگهانی ذرات به آب تفسیر شده است. در سال ۲۰۱۵ [۹] یانگ و همکاران با استفاده از روش مرزی مدلی برای ذرات غوطه ور در سیال ارائه داده اند. شبیه سازی عددی همراه با انتقال حرارت و در یک حفره مربعی انجام شده است. در این مقاله نحوه رسوب گذاری و تاثیر آن بر انتقال حرارت نشان داده شده است. همچنین اثر رانش حرارتی بر رفتار ذرات بررسی شده است. در سال ۲۰۱۶ با استفاده از یک مدل سه بعدی نفوذ آب به داخل یک تپه ماسه شبیه سازی شده است. این مطالعه به بررسی امواج ساحلی هنگام رسیدن به ذرات شن می پردازد. در یک کار عددی در سال ۲۰۱۶ [۱۰] توصیف رفتار ذرات و سرعت سقوط یک ذره در سیال بررسی شده است. این تحقیق در اعداد $Re < 10$ انجام شده است. با توجه به تحقیقات پیشین بدست آمده در خصوص جریان ذرات جامد درون سیال، مطالعات گوناگونی در زمینه های مختلف انجام شده است. در هر کدام از کارهای انجام شده، جریان ذرات با استفاده از روش های مختلف و برای هندسه های مختلف مدل سازی شده است. با این حال یک کار عمومی که بتواند همه ی پارامترهای جریان را به هم مربوط سازد با کمبود هایی مواجهه است. در مقاله ی حاضر با نمایش کانتورهای سرعت، غلظت، نحوه ی حرکت ذرات و فشار در زمان های مختلف به یک نتیجه گیری جامع برای جریان ذرات در حالت کاملاً اشفته خواهیم رسید. همچنین تغییرات غلظت ذرات و تغییرات اصطکاک ناشی از حرکت ذرات بر پوسته نازل بدست آورده خواهد شد، کاری که در دیگر تحقیقات کمتر به چشم خواهد خورد.

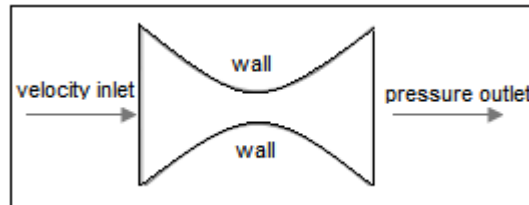
۲. هندسه و شرایط مرزی مسئله

ذرات جامد با سرعت ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در بازه زمانی ۰-۳ ثانیه درون یک نازل- دفیوزر سوار بر جریان هوا به عنوان سیال اصلی، تزریق می شوند. کل فرایند ۵ ثانیه طول کشیده است. روش حل جریان آشفتگی در این مدل، RANS و مدل آشفتگی مورد استفاده $k-\omega$ است.

۲.۱. شرط مرزی **velocity inlet**: این شرط برای ورودی سرعت استفاده می شود که حوزه کاری آن سیالات تراکم ناپذیر است، اما برای سیالات تراکم پذیر نیز استفاده می شود. که در اینجا سیال ورودی هوا است. که با فرض تراکم ناپذیری حل شده است.

۲.۲. شرط مرزی **pressure outlet**: این شرط برای خروجی مسئله استفاده می شود که فشار، برای جریان تراکم پذیر و هم تراکم ناپذیر در خروجی برای آن قابل استفاده است.

۳.۲. شرط مرزی **wall**: این شرط به معنی دیواره است. که در این جا از شرایط استاندارد دیواره استفاده شده است.



شکل ۱. هندسه مسئله به همراه شرایط مرزی

۴.۲. فرضیات مسئله: فشار نسبی خروجی صفر در نظر گرفته شده است. به این معنی که فشار خروجی برابر فشار محیط است. شدت توربولانسی ۵ درصد است. سیال تراکم ناپذیر است.

۵.۲. مدل آشفتگی: روش حل جریان آشفتگی در این مدل، RANS و مدل آشفتگی مورد استفاده $k-\omega$ است. معادلات RANS، معادلات متوسط زمانی برای حرکت جریان سیال هستند. ایده تشکیل دهنده این معادلات، تجزیه رینولدز است که به وسیله آن یک مقدار لحظه ای، به مقادیر متوسط زمانی و نوسانی خود تجزیه شده است. از معادلات RANS برای توصیف جریان های آشفته استفاده می شود. این معادلات بر اساس خواص جریان آشفته، تقریبی از حل های متوسط زمانی معادلات ناویرستوکس ارائه می دهند. سمت چپ این معادله تغییراتی را در مومنتوم اجزای سیال با توجه به ناپایداری و جابجایی در جریان متوسط نمایش می دهد. این تغییرات به وسیله نیروهای جسمی، تنش های ایزوتروپیک مربوط به میدان فشار، تنشهای لزجی و تنش های ظاهری مربوط به سرعت نوسانی (که به تنهاس رینولدز معروفند) متوازن می شوند. این عبارت تنش رینولدز غیرخطی، نیاز به مدلسازی اضافی به منظور نزدیکی به معادله RANS برای حل شدن دارد و مدل های آشفتگی مختلفی را ایجاد می کنند. مدل کا اسیلون یک مدل دو معادله ای است، به عبارتی شامل دو معادله انتقالی اضافی برای محاسبه خواص آشفتگی جریان میباشد. از این معادلات میتوان برای محاسبه تاثیرات جابجایی و پخش در انرژی آشفتگی بهره برد. اولین متغیر انتقالی، انرژی آشفتگی جنبشی یا همان کا است و دومین متغیر انتقالی در این مدل، اتلاف آشفتگی یا همان اسیلون است. به عبارتی می توان گفت که کا، انرژی را در آشفتگی و اسیلون مقیاس آشفتگی را معین می کند.

۳. معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات بقای جرم و مومنتوم هستند. در این بین، چالش برانگیزترین این معادلات یعنی معادلات مومنتوم، بطور مستقل توسط ناویر^۱ (۱۹۲۷) و استوکس^۲ (۱۸۴۵) به دست آمدند. این معادلات در فرم بقایی یا غیر بقایی ارائه می شوند. معادله بقای جرم یا پیوستگی، به صورت معادله (۱) نوشته می شود:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

1- Neuer
2- Stokes

عبارت S_m ، جرم اضافه شده به جریان است. این جمله می تواند در معادلات مربوط به اجزای شیمیایی (که یک گونه ی شیمیایی تولید می شود یا از بین می رود) و... وارد شود معادله بقای مومنتوم در راستای دلخواه \hat{i} به صورت معادله (۲) است:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

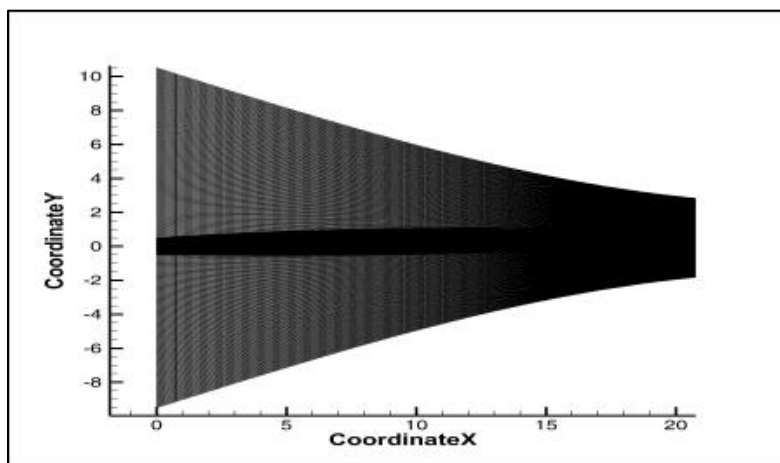
که p فشار استاتیکی، τ_{ij} تانسور تنش ρg_i و F_i نیروهای گرانشی و جسمی خارجی در جهت \hat{i} می باشد. تانسور تنش τ_{ij} به صورت معادله (۳) تعریف می شود:

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

که در آن μ لزجت مولکولی و جمله دوم در سمت راست اثر اتساع حجمی (انبساط و انقباض) است.

۴. نحوه تولید شبکه

تولید شبکه یکی از مهمترین بخش های حل عددی محسوب می شود که در دقت حل عددی بسیار تأثیرگذار است و بیش از ۵۰٪ زمان تحلیل یک مسئله cfd به تولید شبکه آن اختصاص می یابد. در مقاله حاضر برای مش بندی دامنه ی محاسباتی از شبکه بندی مربعی و ساختاری استفاده شده است. همان طور که در شکل (۲) نیز ملاحظه می شود در محل تزریق ذرات جامد و گلوگاه از یک مش بندی ریزتری نسبت به سایر مکان ها استفاده شده است. دلیل این امر تغییرات شدید تر در این نواحی است. در اینجا مش بندی برای یک طرف نازل آورده شده است. مهمترین ویژگی شبکه مربعی ساده بودن سازمان اطلاعات آن و نیاز به حافظه و محاسبات کمتر است.



شکل ۲. نحوه ی المان بندی هندسه مسئله

۵. تست استقلال از شبکه

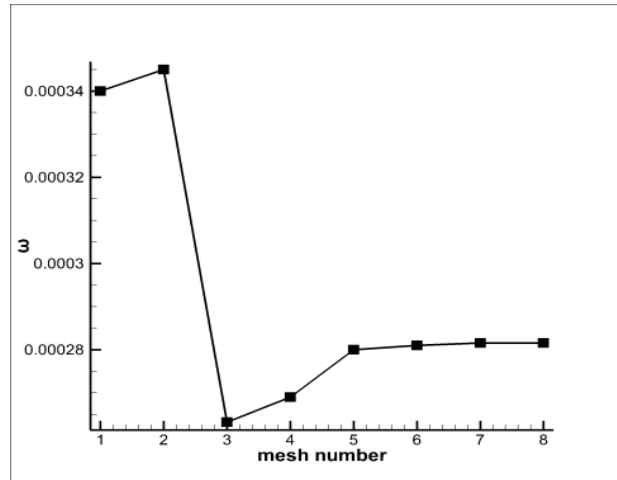
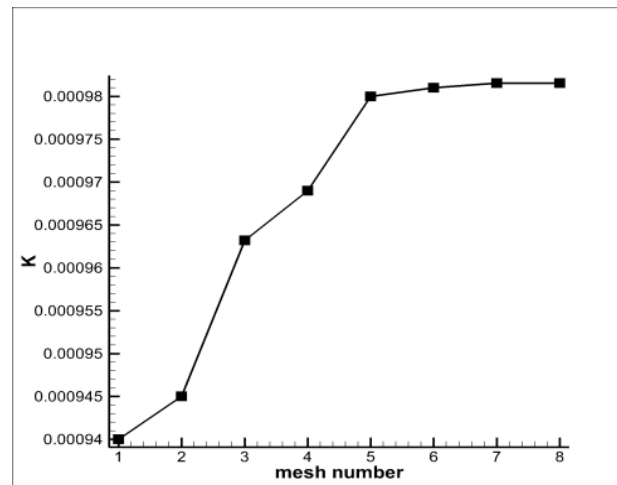
بدیهی است که هر چه شبکه ریزتر باشد جواب های به دست آمده دقیق تر هستند ولی به علت محدود بودن هزینه ها و زمان و حافظه رایانه ای مجبور به محاسبه ی بهینه ترین حالت از شبکه بندی برای به دست آوردن بهترین جواب است. برای محاسبه مسئله از یک شبکه بندی ۲۴۱۰۰۰ نقطه استفاده شده است. شبکه بندی از نوع مربعی است که برای مناطق نزدیک به دیواره ی نازل ناحیه ای دیگر تعریف شده است که ساختار شبکه بندی در آن ریز تر شده است. علت این امر این است که مدل آشفستگی

که در این مسئله استفاده شده از روش متوسط گیری زمانی RANS است که برای نواحی نزدیک به دیواره جامد جواب بهتری نسبت به دیگر روش‌ها همچون LES دارد. برای به دست آوردن شبکه بندی بهینه که بتواند پیش بینی های درستی را نسبت به مسئله در اختیار قرار می دهد، ۸ شبکه مختلف لحاظ شده است که در جدول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۱. شبکه های مختلف مورد استفاده برای مش بندی

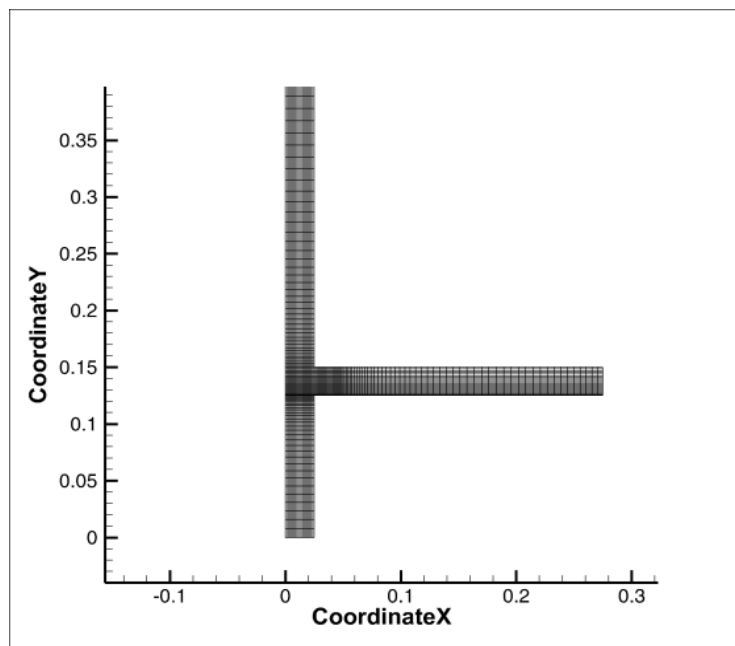
تعداد	تعداد نقاط شبکه
۱	۲۲۰۰۰
۲	۳۹۲۰۰
۳	۱۰۳۰۰۰
۴	۱۵۰۰۰۰
۵	۱۹۰۵۱۰
۶	۲۴۱۰۰۰
۷	۲۹۰۰۰۰
۸	۳۲۱۲۰۱

در اینجا دو متغیر حساس k و ε را به عنوان جواب معادلات مستقل از شبکه بندی در نظر گرفته که نمودار جواب‌ها به شکل زیر است.

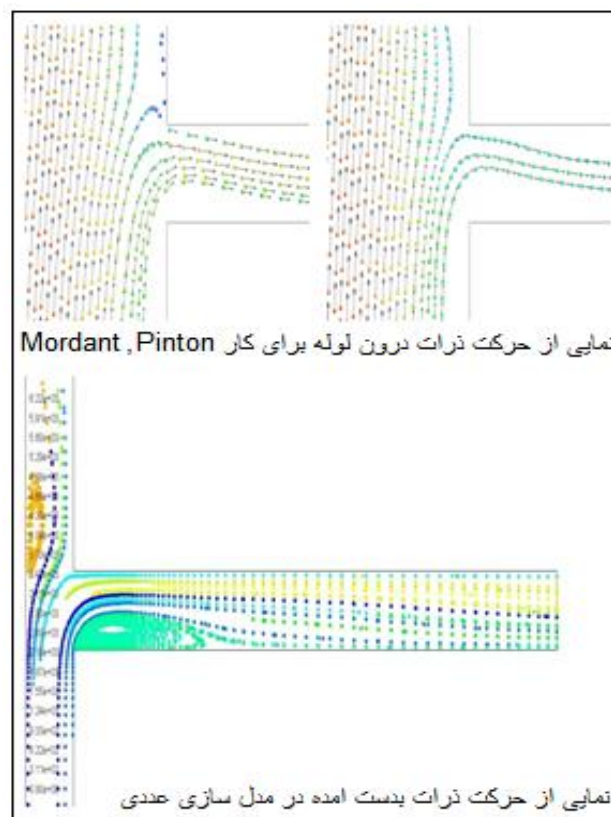
شکل ۳. تغییرات متغیر ε با تعداد المان‌هاشکل ۴. تغییرات متغیر k با تعداد المان‌ها

۶. صحت سنجی نتایج

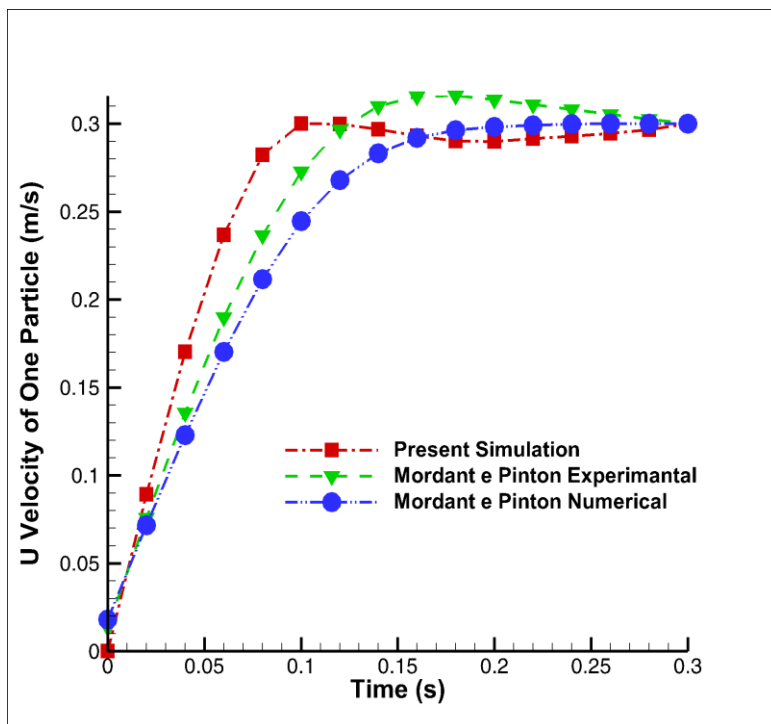
برای صحت سنجی از یک لوله T شکل استفاده شده است. از آنجا که سیال تراکم ناپذیر است روش مورد استفاده درون لوله را با دقت خوبی می توان برای نازل تعمیر داد. نمای حرکت ذرات درون لوله انجام شده و با کار عددی - تجزیه پیتون و موردانت مقایسه شده است. ابعاد لوله ی مورد بررسی بر حسب متر می باشد.



شکل ۵. شرایط مرزی و هندسه مسئله برای لوله (ابعاد بر حسب متر)



شکل ۶. نمای حرکت ذرات درون لوله انجام شده و مقایسه آن با کار عددی-تجزیه



شکل ۷. نمودار صحت سنجی برای مقایسه شبیه سازی به دست آمده با کارهای عددی و تجربی Mordant و Pinton

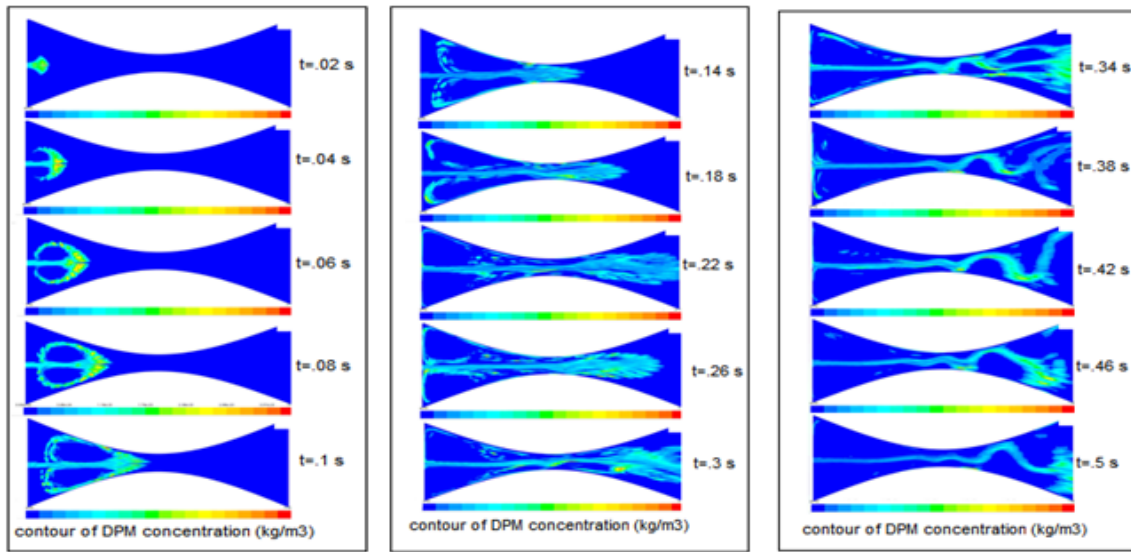
همان طور که در شکل های ۶ و ۷ مشخص است، نمودار به دست آمده برای حرکت یه ذره در طول مسیر لوله برای زمان t پیش بینی خوبی را دارد.

۷. نتایج

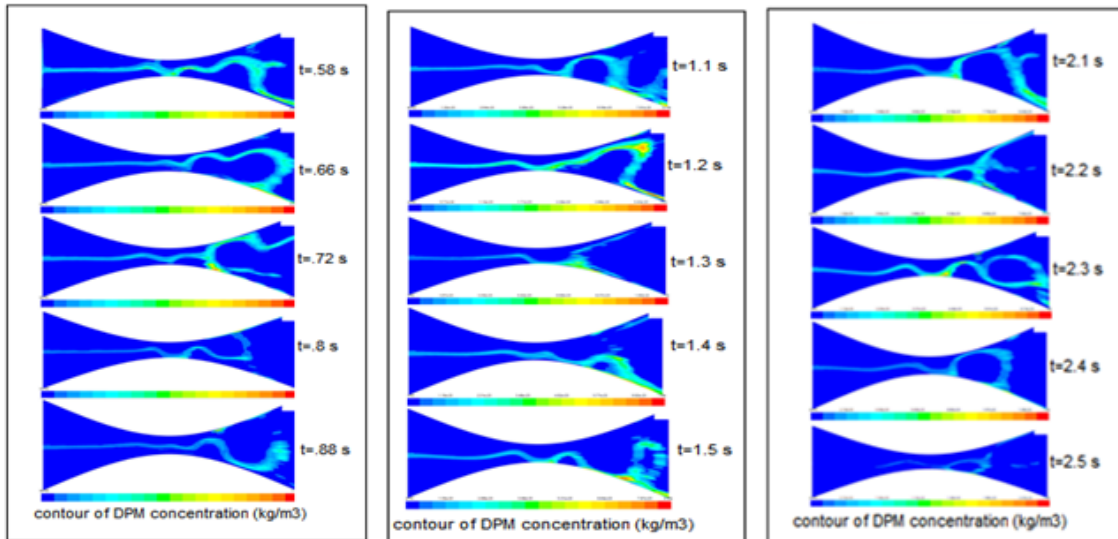
۷.۱. توزیع غلظت ذرات در طول تزریق

توزیع غلظت ذرات در طول تزریق کانتورهای بدست آمده مرتبط به غلظت ذرات در دیدگاه لاگرانژی است. در این روش جریان سیال بر روی یک شبکه ثابت حل می شود و ذرات به صورت لاگرانژی دنبال خواهد شد. در این بخش پراکندگی ذرات ناشی از توربولانس در فاز سیال پیش بینی خواهد شد. شکل (۹) مربوط به تزریق ذرات در ثانیه های ابتدایی تزریق می باشد. با توجه به اینکه سرعت تزریق خیلی بالاست مشاهده می شود که در ۱ ثانیه غلظت ذرات در گلوگاه افزایش یافته و در ۳ ثانیه اثرات ذرات به خروجی کانال رسیده است. عمده تمرکز ذرات مربوط به محور مرکزی کانال می باشد. به دلیل مقاومت هوا و سرعت ذرات، ذرات جامد در طول تزریق به اطراف پراکنده شده است. میزان غلظت و فشردگی ذرات در شکل های (۸) و (۹) و (۱۰) و (۱۱) به خوبی مشخص شده است. در لحظه پرتاب ذرات مشخص است که ذرات به دلیل مقاومت هوا معلق شده اند و هنگام رسیدن به گلوگاه نازل، کل مساحت نازل را می پوشانند. شکل ۹ کانتور غلظت ذرات در اواسط تزریق را نشان می دهد. توجه شود که در این ثانیه ها هنوز عملیات تزریق در حال انجام شدن هست. بعد از گذشت چند ثانیه مشخص است که در نیمه دوم نازل (سمت راست) پراکندگی و دامنه پخش ذرات بیشتر شده است. دلیل این موضوع این است که در نیمه دوم نازل انرژی جنبشی ذرات کمتر شده، که این کاهش سرعت و مقاومت هوا اجازه ی پخش شدن هرچه بیشتر ذرات را خواهند داد. بنابراین در نیمه دوم نازل ذرات دارای پراکندگی بیشتر ولی غلظت کمتر به حرکت خود ادامه خواهند داد. در نیمه اول نازل با توجه به سرعت بالای ذرات، ذرات فرصت پخش شدن به اطراف را نخواهند داشت و در این نیمه پراکندگی ذرات

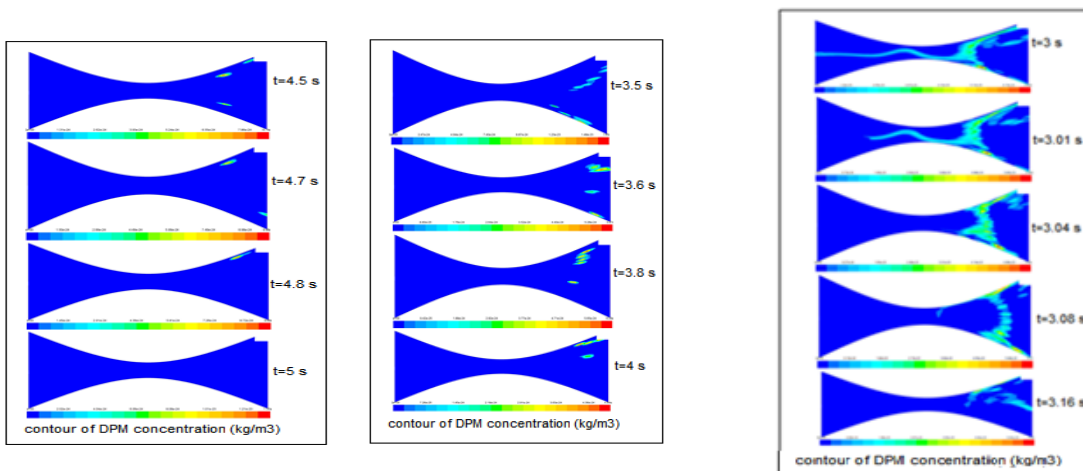
کمتربه چشم میخورد. شکل ۱۰ کانطور غلظت ذرات را در زمانی که عملیات تزریق متوقف شده است نشان می دهد. در زمان ۳ ثانیه عملیات تزریق متوقف شده است.



شکل ۸. کانطور غلظت ذرات در ثانیه های ابتدایی تزریق



شکل ۹. کانطور غلظت ذرات در اواسط تزریق

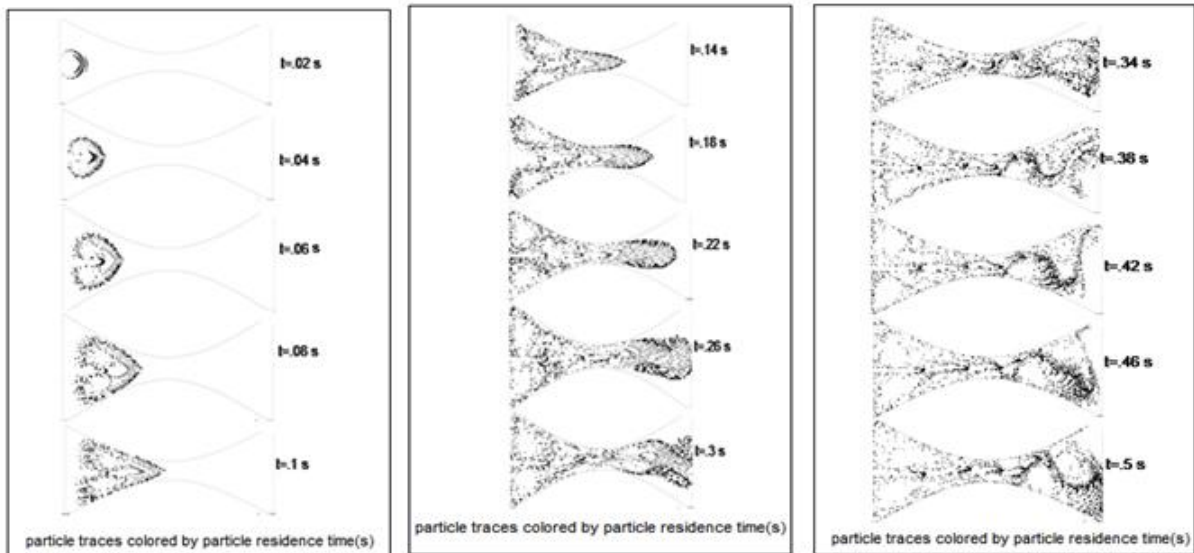


شکل ۱۱. کانطور غلظت ذرات در ثانیه های پایانی

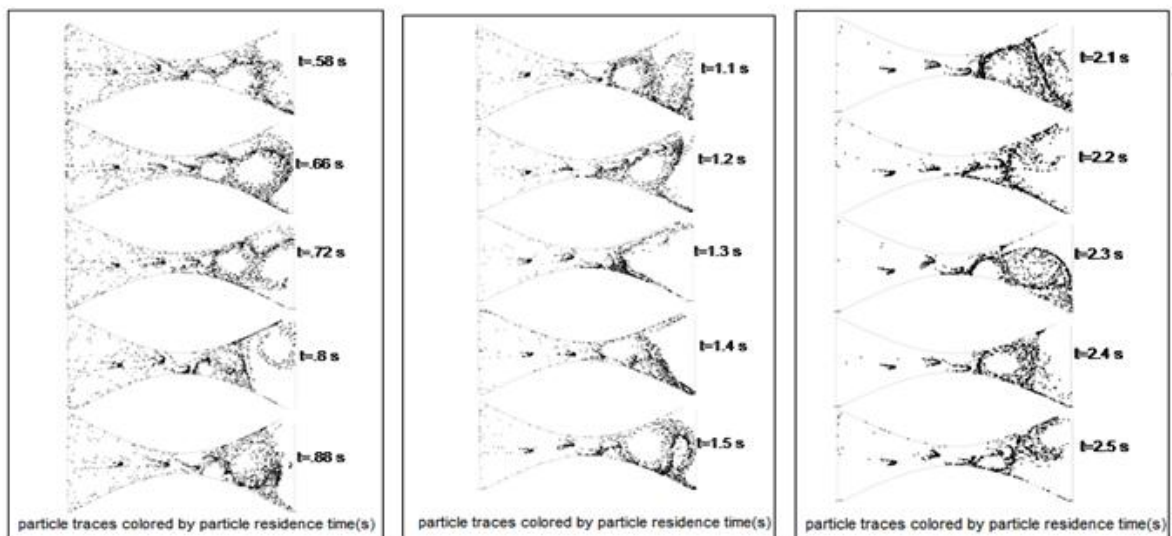
شکل ۱۰. کانطور غلظت ذرات در ثانیه های توقف تزریق

در شکل ۱۰ مشخص است که بعد از ثانیه سوم کاملاً تزریق متوقف شده و دنباله ی غلظت ذرات در ابتدای کانال به کلی از بین رفته است. به طوری که در ثانیه ی ۳.۱۶ ثانیه نیمه ی اول کانال به کلی از ذرات جامد خارج شده است. قطع شدن دنباله ی تزریق درست در ۳.۰۱ ثانیه انجام شده است. سرعت بالای ذرات باعث شده که در نیمه ی اول نازل ذره ای باقی نماند و در یک مدت زمان کوتاه خود را به نیمه ی دوم نازل برسانند. شکل ۱۱ کانتور غلظت ذرات در ثانیه های پایانی را نشان می دهد. توجه شود در ثانیه ی سوم به بعد تزریق متوقف شده و فقط ذرات باقی مانده در نازل در حال خارج شدن هستند. مشاهده می شود که در زمان ۳.۵ ثانیه عمده ی اصلی ذرات خارج شده است و غلظت ذرات در این زمان ها بسیار پایین است، به طوری که در زمان ۴ ثانیه به بعد تقریباً کل نازل از ذرات جامد خالی شده است. در زمان ۵ ثانیه هیچ ذره ای در نازل مشاهده نمی شود. با توجه به صحبت های گفته شده، همان طور که در شکل ۱۱ نیز مشخص است عملیات تخلیه کل ذرات ۵ ثانیه طول کشیده است که در دو ثانیه ی پایانی عملیات تزریق متوقف شده است و ذرات فقط با توجه به انرژی از قبل داشته اند از نازل خارج شده اند. لازم به ذکر است که ماگزیمم غلظت ذرات در دهانه نازل در زمان ۰.۱/ ثانیه می باشد.

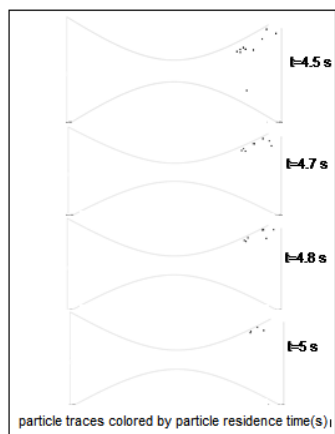
۲.۷. نحوه حرکت ذرات در فرایند تزریق



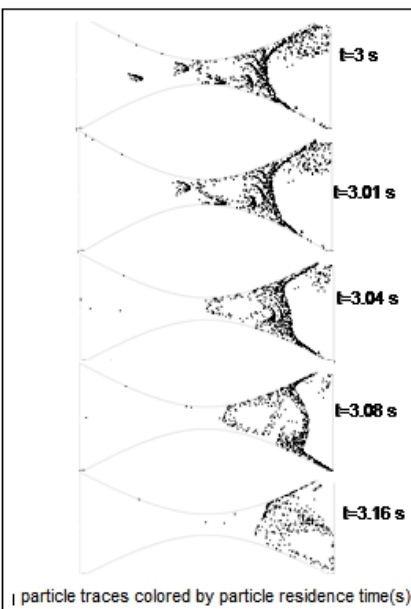
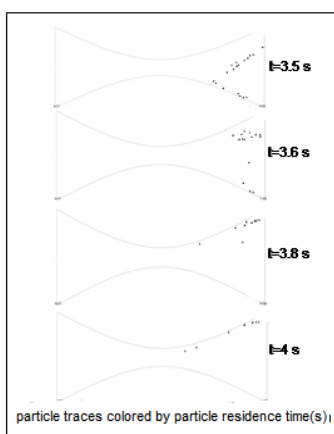
شکل ۱۳. نحوه حرکت ذرات در ثانیه های ابتدایی تزریق



شکل ۱۴. نحوه حرکت ذرات در اواسط تزریق



شکل ۱۶. نحوه ی حرکت ذرات در ثانیه های پایانی

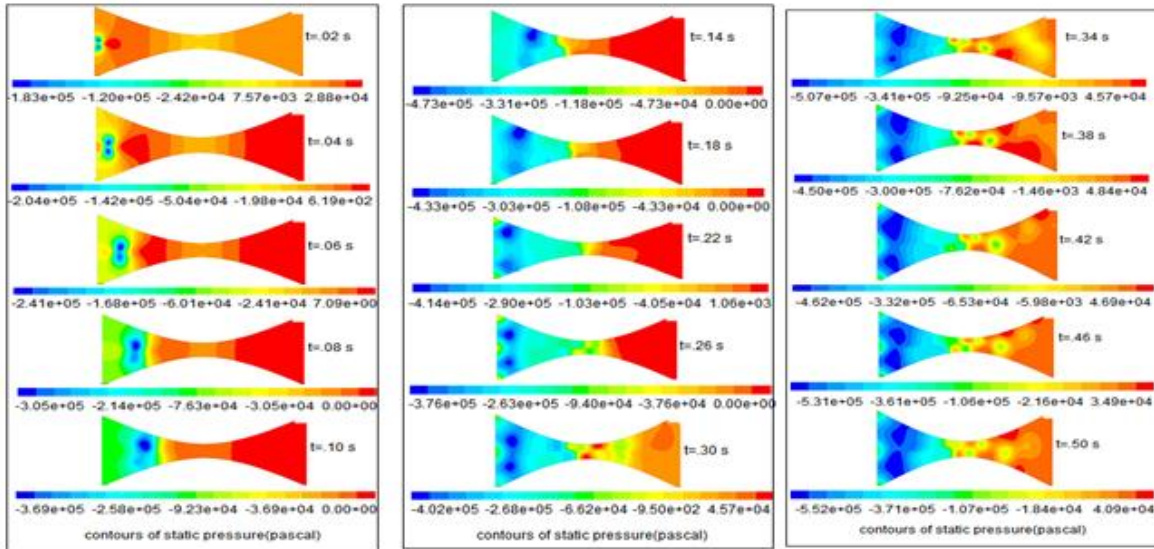


شکل ۱۵. نحوه ی حرکت ذرات در ثانیه های توقف تزریق

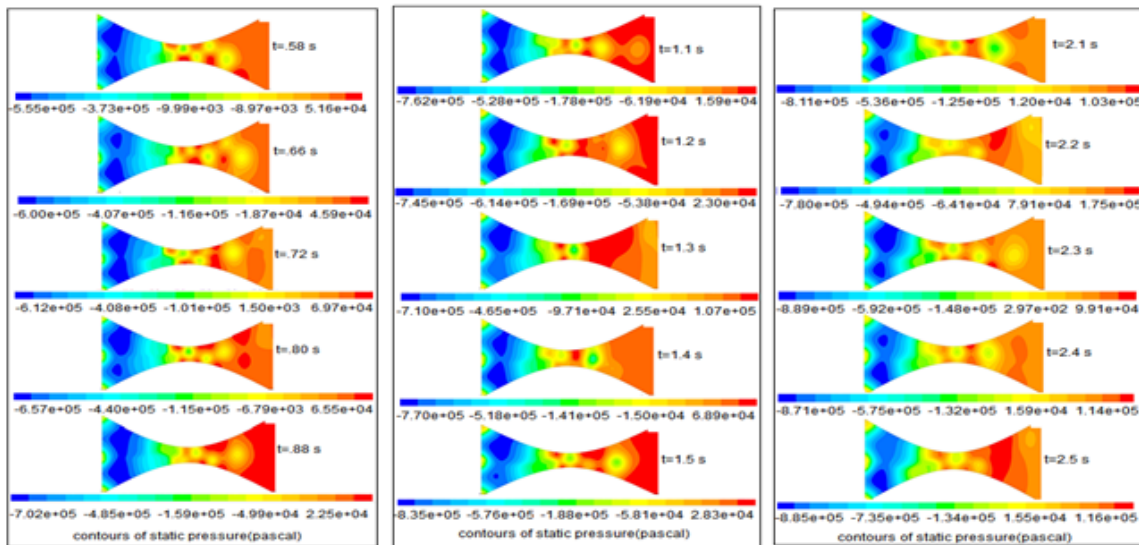
در این بخش نحوه ی حرکت ذرات درون سیال دنبال خواهد شد. شکل ۱۳ نحوه ی حرکت و پخش ذرات در ثانیه های ابتدایی تزریق را نشان می دهد. در یک دبی بالا در ثانیه های ابتدایی ذرات جامد به محض ورود به سیال از هم جدا شده و نیروی پسای سیال به آن ها وارد می شود. ذرات تحت تاثیر پسای سیال قرار می گیرند و در سیال معلق شده اند. به دلیل سرعت بالای تزریق مشخص است که در انی از ثانیه ذرات جامد به گلوگاه نازل رسیده اند به طوری که در نیمی از ثانیه به انتهای نازل رسیده اند. شکل ۱۴ نحوه ی حرکت ذرات در اواسط تزریق را نشان می دهد. با مقایسه شکل های مربوط به نحوه ی حرکت ذرات و غلظت ذرات مشاهده می شود که کانتورها در دو حالت خیلی به هم نزدیک هستند و هرکجا غلظت بالاتر هست در آنجا تجمع ذرات بیشتر است و حرکت ذرات بیشتر در آن ناحیه است. شکل ۱۵ نحوه ی حرکت ذرات را درست زمانی است که تزریق متوقف شده نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود در ثانیه ی سوم به بعد حرکت ذرات بیشتر در نیمه ی دوم نازل هست و تعداد ذرات در این نیمه خیلی بیشتر از نیمه ی اول نازل است. مقایسه ی شکل ۱۵ با شکل ۱۰ به خوبی متناسب بودن کانتور غلظت و ذرات را نشان می دهد. در زمان ۳.۱۶ ثانیه نیمه ی سمت چپ نازل کاملاً از حرکت ذرات خالی شده است. شکل ۱۶ نحوه ی حرکت ذرات در ثانیه های پایانی که تزریق متوقف شده است را نشان می دهد. نحوه ی خارج شدن ذرات معلق باقی مانده ناشی از انرژی از پیش گرفته در شکل مشخص است. در ۵ ثانیه به طور کامل نازل از ذرات معلق خارج شده است. به طور کلی با توجه به سرعت بالای تزریق و اشفته بودن جریان یک حرکت مشخص و از پیش تعریف شده ای برای ذرات وجود ندارد و به طور تصادفی در کل نازل پخش می شوند و به سمت خارج شدن پیش می روند. عمده ی تجمع ذرات در محوریت نازل می باشد. پراکندگی ذرات در نیمه ی سمت چپ نازل بسیار کمتر از نیمه ی راست نازل است. دلیل این موضوع غلبه کردن سرعت تزریق بر مقاومت هوا در نیمه ی سمت چپ نازل می باشد. کاهش انرژی ذرات جامد بعد از عبور از گلوگاه باعث بیشتر معلق شدن ذرات به اطراف شده است.

۳.۷. توزیع فشار استاتیکی در فرایند تزریق:

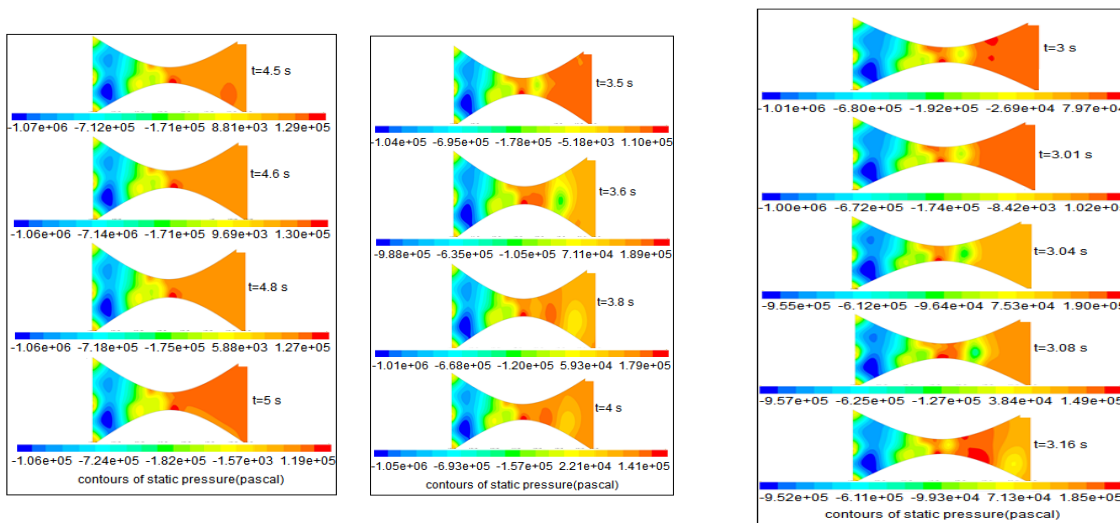
شکل های توزیع فشار استاتیکی در کل کانتورها (شکل های ۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰) به طور کلی نشان می دهد که وارد شدن ذرات جامد به ناحیه نازل کاهش فشار نسبی در نازل را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۱۷. کانتور فشار استاتیکی در ثانیه های ابتدایی تزریق



شکل ۱۸. کانتور فشار استاتیکی در اواسط تزریق



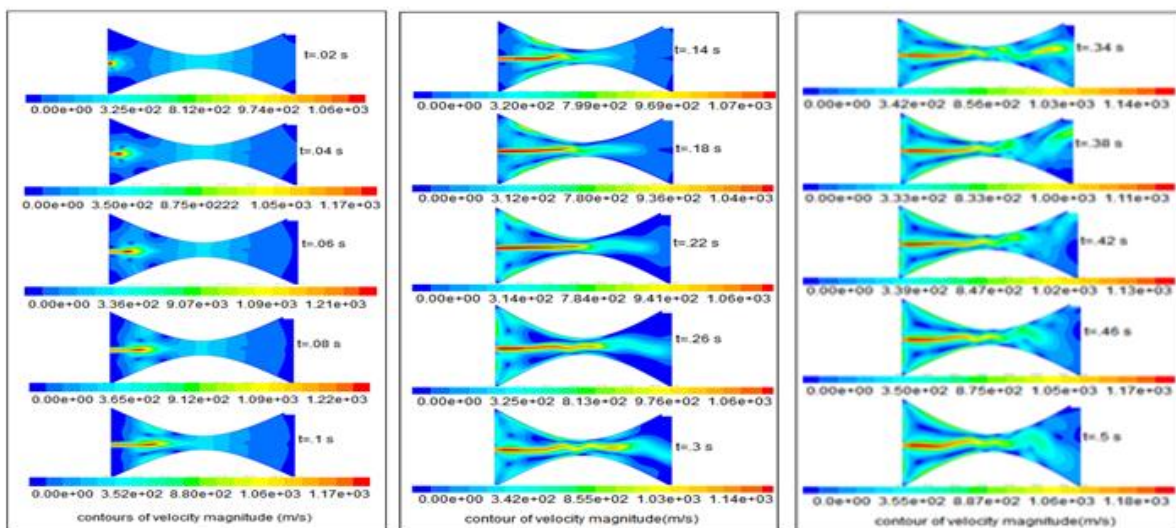
شکل ۱۹. کانتور فشار استاتیکی در ثانیه های توقف تزریق

شکل ۲۰. کانتور فشار استاتیکی در ثانیه های پایانی

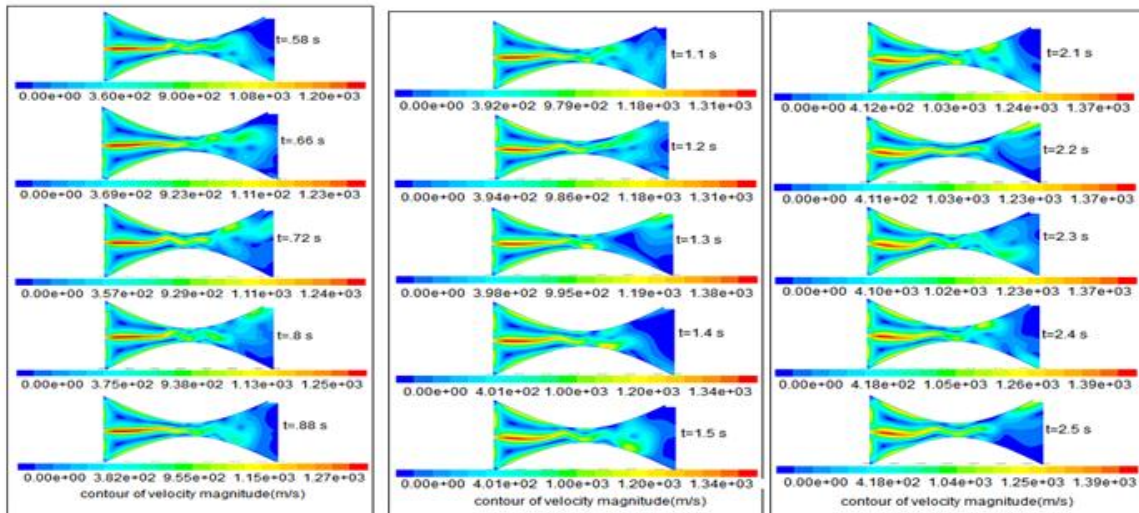
شکل ۱۷ کانتور فشار استاتیکی در ثانیه های اولیه ی تزریق را نشان می دهد. در ثانیه های ابتدایی تزریق ناحیه ی سمت چپ نازل فشار پایین تری نسبت به نیمه ی راست نازل را تجربه می کند. به محض ورود ذرات با سرعت بالا یک ناحیه کم فشار (پایین تر از فشار نازل) بوجود آمده است. شکل ۱۷ و مقایسه آن با شکل ۸ و ۱۳ به وضوح نشان می دهد که در هر کجا تجمع ذرات زیادتر است در آن محل فشار کمتر است. توجه شود که فشار نشان داده شده در کانتورهای فشار نسبی هستند (با فشار اتمسفر جمع می شوند). از ثانیه ی ۰ تا ۱/ ثانیه در شکل ۱۷ نیمه ی سمت راست کانال پرفشار تر از نیمه ی سمت چپ است. رنگ قرمز در شکل بیشترین فشار و رنگ آبی کمترین فشار را نشان می دهد. با استناد به شکل ۱۳ در اواسط تزریق مشاهده می شود که گذر زمان و رسیدن ذرات به نیمه ی دوم نازل باعث کاهش فشار در سمت راست نازل شده است. در گلوگاه نیز به دلیل کاهش مساحت افقی را در فشار شاهد هستیم. شکل های ۱۹ و ۲۰ کانتورهای فشار استاتیکی را زمانی که تزریق متوقف شده است نشان می دهد. نکته ی قابل توجه در کانتورهای فشار استاتیکی این است که در همه ی حالات فشار درون نازل از فشار اتمسفر مقدار کمتری دارد. یعنی تزریق ذرات جامد درون یک نازل افقی را در همه ی نقاط نازل بوجود آورده است. عمده ی نقاط کم فشار در طول ۵ ثانیه مربوط به نیمه ی سمت چپ نازل است. مطمئناً این حالت گذرا بوده و بعد از مدتی فشار درون نازل به فشار جو خواهد رسید. شکل ۲۰ بیانگر این موضوع است که با خارج شدن ذرات و اشفستگی از نازل در ثانیه های پایانی افزایشی را در فشار شاهد هستیم به طوری که فشار درون نازل به سمت فشار جو پیش می رود، هرچند که نقاط کم فشار درون نازل هنوز وجود دارد. این موضوع را از اعداد فشار روی نوار رنگی می توان مشاهده کرد. نقاط آبی پر رنگ یک ناحیه ی ویک مانند را بوجود آورده است. در این نواحی حضور ذرات و اشفستگی جریان به مراتب بیشتر از بقیه نقاط است.

۴.۷. توزیع سرعت در فرایند تزریق:

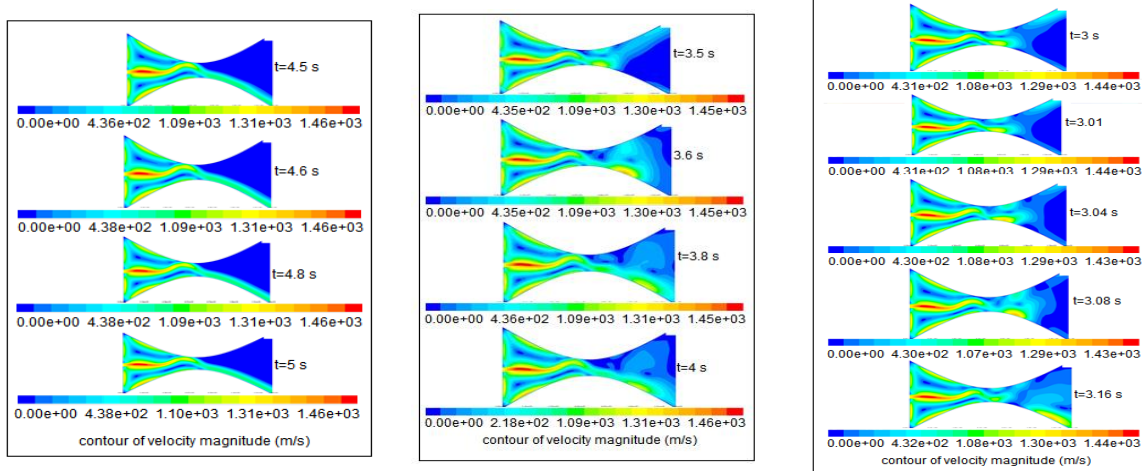
در همه ی حالت ها برای کانتور سرعت (شکل های ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴) شاهد این هستیم که میزان سرعت در خط مرکزی کانال بیشتر است، همچنین نیمه ی سمت چپ نازل دارای نقاط پرسرعت تری است و وقتی ذرات به نیمه ی سمت راست نازل رسیده اند سرعت به میزان قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. به طور کلی در نقاط پرسرعت غلظت ذرات بیشتر از نقاط کم سرعت هست. این موضوع را می توان با مقایسه ی کانتورهای سرعت (شکل های ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴) با کانتورهای غلظت (شکل های ۸، ۹، ۱۰، ۱۱) پی برد. شکل ۲۱ کانتور سرعت در ثانیه های ابتدایی تزریق را نشان می دهد.



شکل ۲۱. کانتور سرعت در ثانیه های ابتدایی تزریق



شکل ۲۲. کانتور سرعت در اواسط تزریق



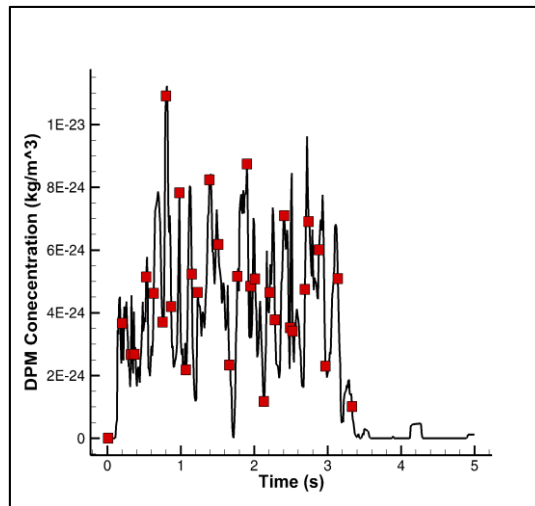
شکل ۲۳. کانتور سرعت در ثانیه های توقف تزریق

شکل ۲۴. کانتور سرعت در ثانیه های پایانی

رنگ ایی پر رنگ سرعت صفر و رنگ قرمز سرعت ۱۰۰۰ متر بر ثانیه را نشان می دهد. در ۰/۲ ثانیه در ورود تزریق، سرعت ذرات همان طور که در شکل ۲۱ پیداست برابر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه است، این در حالی است که بقیه نقاط نازل دارای سرعت صفر هستند. در ۵/ ثانیه به طور کامل نازل تحت تاثیر سرعت ذرات قرار گرفته است و یک آشفتنگی را در کل نازل بوجود آورده است. شکل ۲۲ کانتور سرعت در اواسط تزریق را نشان می دهد. به خوبی مشخص است که پخش سرعت در نیمه ی سمت راست نازل بیشتر است و سرعت جریان ذرات در این نیمه توسط مقاومت هوا گرفته شده است. به همین خاطر است که در نیمه ی سمت راست میزان پخش ذرات بیشتر از نیمه ی سمت چپ نازل است (شکل ۱۴). با در نظر گرفتن مقایسه ی کانتور های سرعت (شکل های ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴) با کانتورهای فشار استاتیکی (۱۷، ۱۸، ۱۹، ۲۰) شاهد این هستیم که در نقاط پرسرعت فشار استاتیکی دارای مقدار کمتری است. شکل ۲۳ کانتور سرعت در ثانیه های توقف تزریق را نشان می دهد. همان طور که پیداست به دلیل تزریق قبلی با سرعت بالا هنوز آثار آن در کل نازل وجود دارد. در ثانیه های پایانی تزریق (شکل ۲۴) با گذشت زمان نقاط کم فشار درون کانال بیشتر شده به طوری که نیمه ی سمت راست نازل تقریباً به سمت ساکن شدن پیش می رود. توجه شود که پنج ثانیه طول کشیده است که کل ذرات از نازل خارج شوند. مطمئناً با خارج شدن همه ی ذرات از نازل هنوز هم نقاط دارای سرعت نیز در نازل وجود دارد که در زمان های بعدی به سمت ساکن شدن پیش خواهد رفت. نکته قابل توجه در کل کانتور ها این است که در گلوگاه میزان سرعت به دلیل کاهش هندسه، افزایش یافته است. این موضوع به خصوص در ثانیه های ابتدایی تزریق مشخص است.

۵.۷. نمودار غلظت ذرات در نازل در طول زمان

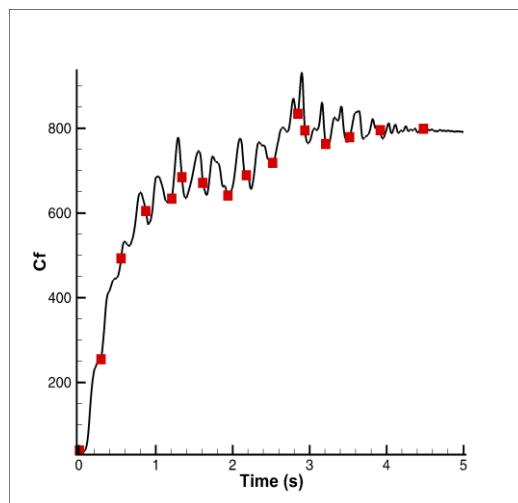
در انتهای فرایند تزریق به این علت که تزریق از ثانیه ۰ الی ۳ انجام می‌شود، فرایند در کل ۵ ثانیه به طول می‌انجامد که در ۲ ثانیه آخر تزریق ذرات متوقف و تنها ذراتی که درون نازل باقی مانده اند حرکت دارند. درست بعد از ثانیه ۵ سوم که تزریق متوقف شده است، افتی را در غلظت ذرات شاهد هستیم، لذا در نمودار در انتهای نازل غلظت به سمت صفر رفته است. در ابتدای تزریق و در زمان صفر مشاهده می‌شود که میزان غلظت ذرات تا ۱ ثانیه به طور نوسانی افزایش یافته است و بعد از آن تا ثانیه ۵ سوم به طور نوسانی تغییر کرده است. نمودار غلظت ذرات در طول زمان ۵ ثانیه در شکل ۲۵ بر حسب $\frac{kg}{m^3}$ نشان داده شده است.



شکل ۲۵. نمودار غلظت ذرات در نازل در طول زمان

۶.۷. نمودار اصطکاک پوسته ای که ذرات بر دیواره نازل وارد می‌کنند

شکل ۲۶ نمودار ضریب درگ که ذرات بر دیواره نازل وارد می‌کنند را در طول زمان نشان می‌دهد. به طور کلی در فرایند تزریق اصطکاک پوسته ای وارد بر دیواره نازل در سه ثانیه اول سیر صعودی دارد. در لحظه ی شروع تزریق همان طور که در شکل ۲۶ نشان داده شده هیچ اصطکاک پوسته ای متوجه سطح داخلی نازل نیست. با افزایش زمان از ۰ به ۱ ثانیه شاهد افزایش اصطکاک پوسته ای به صورت یکنواخت هستیم و از ثانیه ۱ تا سوم این افزایش نسبی به صورت نوسانی خواهد بود. از ثانیه سوم که غلظت متوقف شده است افتی را در اصطکاک پوسته ای شاهد هستیم. با مقایسه ی شکل ۲۵ و ۲۶ می‌توان گفت نمودار غلظت و اصطکاک پوسته ای رفتاری شبیه به هم دارند. ماگزیمم اصطکاک وارد شده در ثانیه ۵ سوم (توقف تزریق) می‌باشد.



شکل ۲۶. نمودار اصطکاک پوسته ای (ضریب درگ) وارد شده بر دیواره نازل

۸. نتیجه گیری

برای تمام کانتورها عمده ی تغییرات مربوط به محور مرکزی نازل می باشد. به دلیل سرعت بالای تزریق در نیمی از ثانیه کل نازل تحت تاثیر جریان ذرات قرار خواهد گرفت. پراکندگی و سرعت ذرات در نیمه سمت راست نازل بسیار بیشتر از نیمه ی سمت چپ نازل می باشد. همچنین بعد از گلوگاه کاهش انرژی ذرات منجر به بیشتر معلق شدن آن ها در فضای نازل می باشد. برای کانتورهای فشار به طور کلی نیمه ی سمت چپ نازل فشار کمتری را نسبت به نیمه ی سمت راست تجربه می کند و در هر کجا تجمع ذرات بیشتر است، در آن مکان سرعت بیشتر و فشار کمتر است. تزریق ذرات به نازل یک ناحیه ی کم فشار درون نازل بوجود می آورد. در نقاط پر فشار درون نازل که عمدتاً مربوط به نیمه ی سمت راست نازل است، سرعت دارای میزان کمتری نسبت به نقاط کم فشار است. به طور کلی غلظت ذرات در طول سه ثانیه اول به طور نوسانی افزایش می یابد و بعد از توقف شدن تزریق در ثانیه ی سوم میزان غلظت به سمت صفر میل می کند. همچنین اصطکاک پوسته ای تا ثانیه ی سوم افزایش پیدا می کند و بعد از ثانیه سوم که تزریق متوقف شده است، اصطکاک پوسته ای کاهش پیدا می کند. به طور کلی تغییرات اصطکاک پوسته ای و غلظت ذرات مشابه به هم هستند.

۹. قدردانی

تقدیم به نام نیک پدرم، مهر پرفروغ مادرم و تقدیم به همسر فداکارم که حمایت های بی پایانش تنها سرمایه ی من است.

۱۰. مراجع

۱. فاطمه سرشتی، مرتضی کلاهدوزان/ بررسی تأثیر نیروهای هیدرودینامیکی مؤثر بر حرکت ذرات رسوب برای جریان سیال در کانال ها/ مجله علمی- پژوهشی هیدرولیک/ دوره ۸، شماره ۲، تابستان ۹۲.
۲. حسن سید سراجی، هادی پارسا، امیرحسین دهقانی پور، حامد حاتمی نیا، ردیابی ذرات ریز جامد (رسوب) درون جریان سیال (آب) در شرایط مرزی جریان آرام و مغشوش، یازدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران، ۱۳۹۱.
3. Falah Alobaid , Bernd Epple/Improvement, validation and application of CFD/DEM model to dense gas–solid flow in a fluidized bed/Particuology(2012).
4. H. Tavassoli, S.H.L. Kriebitzsch, M.A. van der Hoef, E.A.J.F. Peters, J.A.M. Kuipers/Direct numerical simulation of particulate flow with heat transfer/International Journal of Multiphase Flow/57(2013) 29-37.
5. B. Lessani, M.H. Nakhaei/Large-eddy simulation of particle-laden turbulent flow with heat transfer/International Journal of Heat and Mass Transfer/67(2013)974-983.
6. Lingqi Yang and Huiming Yin/// Parametric study of particle sedimentation by dissipative particle dynamics simulation/ PHYSICAL REVIEW E 90, 033311 (2014).
7. Sakai , Masa-Toshi Sakai , Yoshinori Yamada/A Lagrangian–Lagrangian coupled method for three-dimensional solid–liquid flows involving free surfaces in a rotating cylindrical tank/Chemical Engineering Journal 246(2014)122-141 Xiaosong Sun , Mikio.
8. Xiaosong Sun, Mikio Sakai/Three-dimensional simulation of gas – solid–liquid flows using the DEM–VOF method/Chemical Engineering Science/134(2015)531-548
9. Hao Zhang , Haizhuan Yuan c, F. Xavier Trias b, Aibing Yu d, Yuanqiang Tan e ,Assensi Oliva b/Particulate Immersed Boundary Method for complex fluid–particle interaction problems with heat transfer/Computers and Mathematics with Applications(2015).
10. Ameneh S. Arabi and R. Sean Sanders*/Particle Terminal Settling Velocities in Non-Newtonian Viscoelastic Fluids/ The Canadian Journal of Chemical Engineering/ Volume 94, June 2016.

Analysis of Fluid Flow of Solid Particles in Nozzle Using Model Two-Phase Euler-Lagrange

Abstract

In this study, in very turbulent conditions, distribution of velocity, density, pressure, and also, The movement of particles in a nozzle is Simulation Using the Euler-Lagrange two phase models. Solid particles in the inlet nozzle injected by high-speed in to the air stream for three seconds. The particles discharged from the nozzle it takes time for five seconds. The results are shown in diagram form and contour for different times. The results showed that all flow parameters Influence on each other. Solid particles injected into the nozzle Is due to engender areas of low pressure in the nozzle. It will be shown that skin friction changes over time, has it Behavior like concentration changes over time. To validate the results, the results have been validated with how particles move inside the tube T shape and Compared with numerical - experimental Piton and Mordant, also Independence of network test done for two critical parameters k and ε and eight computational grids.

Keywords: Particle Flow; Model Two-phase; Euler-Lagrange; Nozzle.