

شبیه‌سازی CFD جداکننده گاز - ذره مارپیچی

مبین صفایی‌راد^۱، سیدحسین هاشم‌آبادی^{۱*}، پریسا نوری‌اصل^۲

۱- تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقاتی CFD

۲- تهران، شرکت انتقال گاز ایران

پیام‌نگار: hashemabadi@iust.ac.ir

چکیده

در این تحقیق به شبیه‌سازی CFD جریان آشفته دوفازی گاز - ذره جداکننده مارپیچی پرداخته شده است. برای شبیه‌سازی جریان چندفازی از دیدگاه اولرین-اولرین استفاده گردیده است. برای اعتبارسنجی ضرایب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی با مقادیر تجربی مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مدل تابع دیوارها مدل اغتشاش $k-\varepsilon$ و RNG و همچنین روش حل آپویند مرتبه دوم مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی دوفازی جریان گاز-ذره در کانال مارپیچ است. در نهایت اثر مقدار بار جامد در جریان گاز، اندازه ذرات و سرعت جریان بر راندمان جداکننده مارپیچی بررسی شده است و مشخص می‌گردد که با افزایش بار جامد بازدهی کاهش می‌یابد. شبیه‌سازی برای ذرات خیلی ریز تا ۱۶ میکرون نشان می‌دهد که تا ۶ میکرون اندازه ذره تاثیر زیادی بر بازدهی عملکرد دارد ولی برای ذرات با اندازه بزرگتر، بازدهی سیکلون نزدیک به ۱۰۰٪ است. همچنین نتایج نشان می‌دهد سرعت ۵ تا ۱۰ متر بر ثانیه در ورودی سرعت، مناسب برای عملکرد سیکلون می‌باشد.

کلمات کلیدی: جریان گاز - ذره، جداکننده مارپیچی، شبیه‌سازی CFD

۱- مقدمه

روی شبیه‌سازی و همین‌طور مطالعه تجربی جداکننده‌های گاز - جامد تحقیقات وسیعی انجام شده است. سو^۱ و همکاران (۲۰۱۱) به مطالعه عددی روی جریان گاز- جامد در سیکلون مربعی با سه نوع شکل ورودی مختلف پرداختند [۱]. همچنین در سال ۲۰۱۰ طلایی و همکاران تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی CFD دوبعدی قطرات گسسته در شوینده ونتوری استوانه‌ای بر اساس روش اولرین انجام دادند [۲]. برورز^۲ (۱۹۹۷) دستگاه جدید براساس ایده جدا کردن ذرات ریز در جریان آرام برای جلوگیری از اتلاف

از آنجا که وجود ذرات جامد در جریان گاز مشکلات عدیده‌ای برای صنعت به‌وجود می‌آورد، بررسی، مطالعه و تحقیق پیرامون دستگاه‌های جداکننده گاز-ذره امری ضروری است. وجود ناخالصی‌ها در جریان گاز موجب کاهش بازدهی کمپرسورها، گرفتگی ابزار و شیرها شده و همچنین در خطوط لوله‌های طولانی افت فشار قابل توجهی ایجاد می‌کند. ذرات غبار ناشی از فعالیت‌های صنعتی مثل سیمان و فولاد و همچنین ریزگردهای ایجاد شده در اثر خشکسالی‌های پی‌درپی تنها نمونه‌هایی از جریان‌ها هستند که باید دستگاه‌های مناسب برای تصفیه آنها طراحی گردد.

1. Su
2. Brouwers

بازدهی به خاطر آشفتگی ابداع نمود و عنوان آن را جداکننده لوله ای چرخشی گذاشت [۳].

کانال‌های مارپیچ، جداکننده‌هایی با بازدهی بالا برای جداکردن ذرات مایع یا جامد از جریان گاز هستند. این جداکننده‌ها از کانال‌های مارپیچی با قطرهای کوچک تشکیل شده‌اند که مایع یا جامد به همراه گاز با فشار از این کانال‌ها وارد می‌شوند و بر اثر نیروی گریز از مرکز ذرات جامد یا مایع در کنار دیواره تجمع یافته و جدا می‌شوند و گاز تمیز از هرکدام از کانال‌ها خارج و به طرف نازل خروجی گاز هدایت گردد. این جداکننده‌ها معمولاً در فرایندهای پیوسته که باید ذرات از گاز با بازدهی بالا جدا شوند و احتیاج به حداقل زمان توقف عملیات برای تعمیر و نگه داری است، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این جداکننده برای جدا کردن ذرات جامد، روغنی و هیدروکربنی از گاز طبیعی هنگام استخراج، بسیار کاربرد دارد زیرا اگر قبل از جدا شدن ذرات گاز وارد کمپرسور شود به کمپرسور آسیب می‌زند. شکل (۱) شمای کلی از جداکننده‌های مارپیچی را نشان می‌دهد. اندازه ذرات جدا شده به عواملی مانند چگالی ذره، چگالی و گرانشی گاز، سرعت جریان گاز و شعاع انحنای کانال جداکننده ذرات بستگی دارد. این جداکننده قادر است ۹۹/۹۵٪ از ذرات جامد یا مایع با قطر ۶ میکرون و بزرگتر را در شرایطی که شدت جریان گاز در هر کانال بین ۱۰ تا ۱۰۹ فوت مکعب بر دقیقه و چگالی ذرات بین ۶۰ تا ۱۲۰ پوند بر فوت مکعب باشد جدا می‌کند. جداسازی ذرات کمتر از ۶ میکرون با بازدهی کمتری انجام می‌پذیرد. افت فشار در کانال‌های جداکننده تابعی از ضریب اصطکاک جداکننده و کانال گاز تمیز شده می‌باشد. افت فشار متناسب با مجذور سرعت گاز و ضریب اصطکاک از مشخصات طراحی و مقداری ثابت است. افت فشار کلی شامل افت در نازل ورودی و افت ناشی از دیواره کانال‌ها و افت ناشی از نازل خروجی است [۴].

در سال ۲۰۰۹ افت فشار جریان آرام برای روغن ویسکوز درون کانال‌های مارپیچ مربعی و مستطیلی که دارای تیغه‌هایی در دو سطح مخالف کانال بودند توسط ساها^۱ انجام شد. و به این نتیجه رسید که اصطکاک جریان و خصوصیات حرارتی به نسبت ابعاد کانال، زاویه پیچش کویل، ارتفاع و فاصله تیغه‌ها از یکدیگر و

همچنین عدد رینولدز بستگی دارد [۵]. سنتینی^۲ و کیونکولینی^۳ (۲۰۰۶) آزمایشات فراوانی در مورد ضریب اصطکاک فانیگ در لوله‌های صاف مستقیم و مارپیچ انجام دادند و به بررسی حالت گذار جریان از آرام به آشفته در لوله‌های مارپیچ پرداختند و رابطه بین ظهور آشفتگی و انحنای پیچش توسط آنها مورد ارزیابی قرار گرفت و روابطی بدست آمد که با نتایج تجربی همخوانی خوبی دارند [۶]. در این تحقیق جهت شبیه‌سازی جریان گاز-ذره در کانال مارپیچی از روش دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) استفاده شده است. امروزه این روش به دلیل کم هزینه بودن و دقیق بودن در بسیاری از موارد جایگزین آزمایش شده است.

۲- معادلات حاکم

شکل (۱) شمای کلی از جداکننده‌های مارپیچی را نشان می‌دهد. در جریان دوفازی حاکم بر این دستگاه، می‌توان هرفاز را از لحاظ معادلات ریاضی و معادلات انتقال به صورت جداگانه در نظر گرفت. یعنی برای هر جریان دوفازی از دیدگاه اولرین-اولرین باید استفاده گردد. در این دیدگاه معادلات جرم و مقدار حرکت برای هر فاز به صورت جداگانه حل می‌شود. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، معادله کلی پیوستگی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k v_k) = 0 \quad (1)$$

معادله کلی مقدار حرکت برای فاز k ام به صورت زیر است:

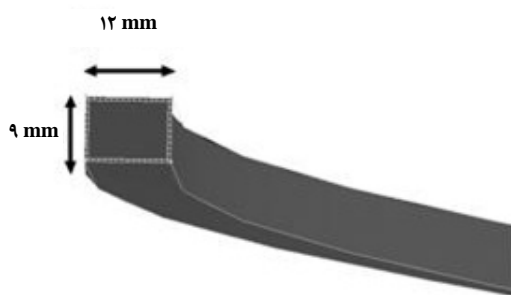
$$\frac{\partial (\rho_k v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k v_k v_k) = -\nabla \alpha_k P + \nabla \cdot \alpha_k (\tau_k + \tau_k^t) + p_k g \quad (2)$$

در این مطالعه، تنش مربوط به اغتشاش (τ^t) با استفاده از حل معادلات انتقال انرژی جنبشی در جریان مغشوش (k) و تلفات انرژی جنبشی در جریان درهم (ε) در مدل RNG k-ε و حل معادلات RSM محاسبه شده است [۷]. مقدار تجربی ضریب اصطکاک فانیگ برای کانال‌های مارپیچ از روابط زیر محاسبه می‌شود [۶].

2. Santini
3. Cioncolini

1. Saha

در شبیه‌سازی صورت گرفته، برای شرط مرزی دیواره در جریان مغشوش از دو دیدگاه تابع دیواره^۳ (WF) و مدل نزدیک دیواره^۴ (EWT) و همچنین مدل‌های اغتشاش Standard k-ε، RNG k-ε و Realizable k-ε استفاده شده است. برای گسسته‌سازی جمله‌های جابجایی روش‌های آپویند مرتبه اول^۵، آپویند مرتبه دوم^۶ و کوئیک^۷ استفاده گردید. نتایج برای جریان‌های آشفته آب در بازه $2800 > Re > 26000$ با یکدیگر مقایسه شده اند. شبیه‌سازی صورت گرفته از لحاظ مقدار γ نیز بررسی شده که برای WF بین ۳۰ تا ۳۰۰ و برای EWT تقریباً برابر با ۱ بوده است.



شکل ۲- ابعاد کانال مارپیچی در جداکننده

برای توسعه یافتگی جریان در انتهای کوئل، کانال مستقیمی طراحی و دو شرط مرزی دیواره یکی برای کوئل و دیگری برای کانال مستقیم در نظر گرفته شده است تا بتوان ضریب اصطکاک شبیه‌سازی را صرفاً برای دیواره کوئل بدست آورد و با نتایج رابطه (۴) مقایسه کرد.

بعد از بررسی استقلال جواب از مش برای شبیه‌سازی سه بعدی، تعداد ۵۵۰۰۰ مش سازمان‌یافته برای مدل WF و ۶۵۰۰۰ مش سازمان‌یافته نیز برای مدل EWT مورد محاسبه قرار گرفت. زمان محاسبات شبیه‌سازی به طور میانگین در حدود ۱۵۰ دقیقه بوده است که این زمان برای مدل WF کمتر و برای مدل EWT بیشتر است، همچنین مدل اغتشاش RSM از مدل‌های k-ε دارای زمان محاسبات بیشتری می‌باشد. روش حل کوئیک نیز دارای زمان محاسباتی بیشتر از آپویند می‌باشد. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی

3. Wall Function
4. Enhanced Wall Treatment
5. First Upwind
6. Second Upwind
7. QUICK

$$f_{coil} = \frac{344 \left(\frac{D_{coil}}{d}\right)^{-0.5}}{\left\{1/56 + \log\left[Re \left(\frac{D_{coil}}{d}\right)^{-0.5}\right]\right\}^{5/73}} \quad (3)$$

$$\frac{13}{5 \left(\frac{D_{coil}}{d}\right)^{0.5}} \leq Re \leq 2000 \left[1 + \frac{13}{2 \left(\frac{D_{coil}}{d}\right) - 0.6}\right] \cup 5 \leq \frac{D_{coil}}{d} \leq 2000$$

$$f_{coil} = 0.076 Re^{-0.25} + 0.00725 \left(\frac{D_{coil}}{d}\right)^{-0.5} \quad (4)$$

$$Re \geq 15000 \cup 5 \leq \frac{D_{coil}}{d} \leq 2000$$



شکل ۱- طرح کلی از جداکننده‌های مارپیچی

شرط مرزی در ورودی به دلیل ثابت بودن سرعت در ورودی‌ها، سرعت ورودی^۱ و در خروجی‌ها، جریان خروجی^۲ در نظر گرفته شد و برای بکار بردن شرط جریان خروجی، طول کانال به اندازه کافی بلند در نظر گرفته شده تا اینکه جریان توسعه یابد.

۳- شبیه‌سازی و روش حل

۳-۱-۱ اعتبارسنجی

شکل (۲)، هندسه طراحی شده سیستم برای شبیه‌سازی کانال مستطیلی صاف مارپیچ را نمایش می‌دهد. که ابعاد سطح مقطع آن $12/18 \times 9/135$ میلی‌متر است که قطر هیدرولیک آن برابر با $10/44$ میلی‌متر می‌شود و قطر پیچش برابر با $368/9$ میلی‌متر و طول گام آن برابر با 200 میلی‌متر مطابق با آزمایشات مرجع [۶] در نظر گرفته شده است.

1. Velocity Inlet
2. Out Flow

بیشتری نسبت به مدل‌های سری $k-\epsilon$ نشان می‌دهد که به علت استفاده از یک مش یکسان برای همه این شبیه‌سازی‌ها می‌باشد.

۲-۳ شبیه‌سازی جریان دوفازی گاز - ذره در جداکننده مارپیچی

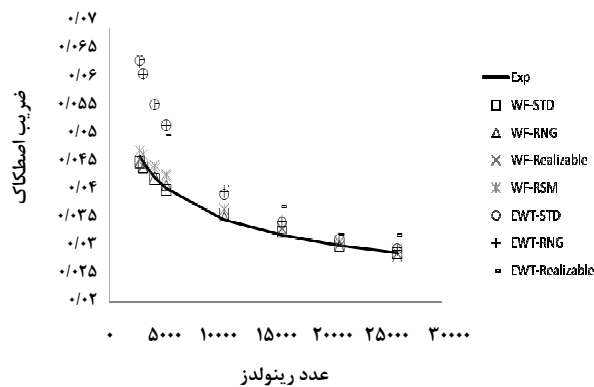
بعد از مرحله اعتبارسنجی و مشخص شدن روش شبیه‌سازی، نوبت به طراحی هندسی جداکننده و شبیه‌سازی جریان گاز - ذره درون آن می‌رسد که با اطلاعات موجود در مورد مشخصات جریان [۸]، فاز پیوسته جریان گاز طبیعی و فاز پراکنده، فاز جامد در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۵) نمای کلی و برش خورده دستگاه جداکننده مارپیچی که مورد شبیه‌سازی قرار گرفته نشان داده شده است.

جدول (۱) مشخصات جریان گاز و جامد همراه را نشان می‌دهد. اما قبل از آن بررسی نیروهای وارد بر ذرات در جریان گاز ضروری می‌باشد. نیروهایی که در این جریان دوفازی باید مورد بررسی قرار بگیرند عبارتند از نیروی گریز از مرکز، نیروی شناوری، نیروی لیفت، نیروی درگ و نیروی وزن. در این جداکننده عامل اصلی جدایش، چرخش و اختلاف زیاد چگالی گاز و ذرات جامد، نیروی گریز از مرکز می‌باشد. همچنین به علت اختلاف زیاد چگالی گاز و ذرات جامد می‌توان از نیروی شناوری صرف نظر کرد. در ضمن می‌توان نشان داد که مقدار خالص نیروی لیفت بر کره برابر با صفر است، زیرا میدان‌های جریان و فشار در بالا و پایین ذره کروی تقریباً متقارن هستند [۹]. در نهایت آثار نیروی وزن و درگ در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند.

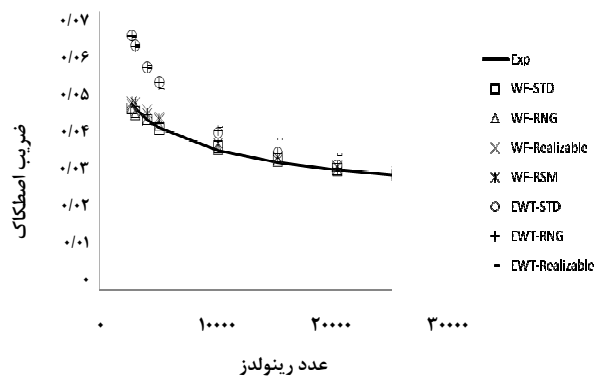
جدول ۱- مشخصات جریان گاز - جامد [۸]

| مقدار | عنوان |
|-----------------------|---------------------------------|
| ۷۶۹۹۵۴ | شدت جریان جرمی گاز (kg/hr) |
| ۳۶/۲۶۹ | چگالی گاز (kg/m ³) |
| ۱/۱۹×۱۰ ^{-۵} | گرانروی گاز (kg/m.s) |
| ۳۰۸ | شدت جریان جرمی ذرات (kg/hr) |
| ۰/۱ - ۱۵ | محدوده سایز ذرات (μm) |
| ۲۶۵۰ | چگالی ذرات (kg/m ³) |

با نتایج تجربی [۶] مقایسه شده و مشخص شد که با تعداد مش‌های تقریباً یکسان مدل WF نسبت به مدل EWT با نتایج تجربی همخوانی بیشتری دارد. همچنین استفاده از روش‌های آپویند مرتبه دوم و کوئیک و مدل‌های $k-\epsilon$ و RNG و RSM، به دلیل خطای کمتر نسبت به نتایج تجربی مناسب‌تر است، از آنجا که روش آپویند مرتبه دوم زمان محاسباتی کمتری دارد بهتر است از این روش در شبیه‌سازی استفاده شود. در شکل‌های (۳) و (۴) نتایج تجربی و شبیه‌سازی باین دو طرح گسسته سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. دیده می‌شود استفاده از مدل‌های اغتشاش $k-\epsilon$ Standard، Realizable، RNG $k-\epsilon$.



شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در کانال مستطیلی صاف مارپیچ با روش آپویند مرتبه دوم

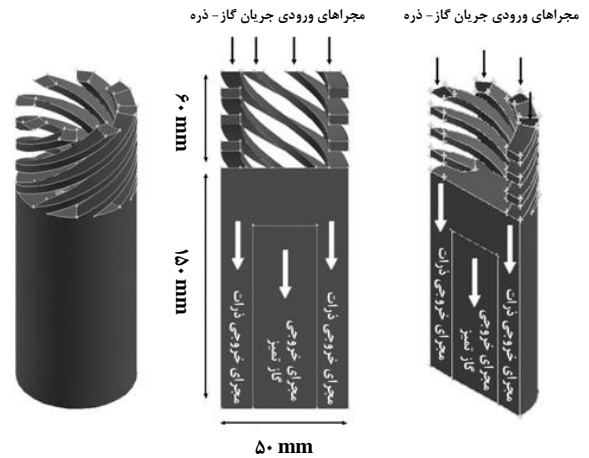


شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی در کانال مستطیلی صاف مارپیچ با روش کوئیک

$k-\epsilon$ و RSM به همراه تابع دیواره (WF) توانسته‌اند پیش‌بینی دقیقی نسبت به داده تجربی در هر دو طرح گسسته‌سازی (آپویند مرتبه دوم و کوئیک) ایجاد کنند. بر خلاف انتظار، مدل RSM خطای

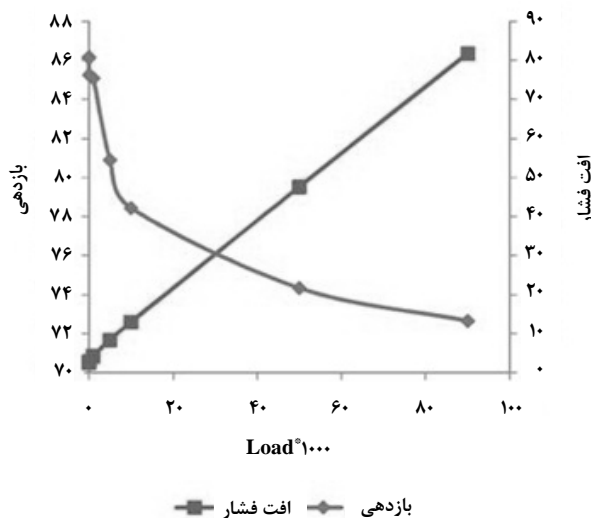
جدول ۲- نتایج شبیه‌سازی با میزان بارهای مختلف ذرات جامد

| میزان بار جامد | بازدهی | افت فشار |
|-----------------------|---------|----------|
| ۰/۰۹ | ۷۲/۶۴۹ | ۸۱/۷۳۹ |
| ۰/۰۵ | ۷۴/۳۳۳۱ | ۴۷/۶۱۱ |
| ۰/۰۱ | ۷۸/۴۳۷۷ | ۱۳/۰۳۶ |
| ۰/۰۰۵ | ۸۰/۸۹۴۴ | ۸/۴۸۴ |
| ۰/۰۰۱ | ۸۵/۰۹۱۸ | ۴/۳۱۲ |
| ۰/۰۰۰۱ | ۸۵/۲۵۱۸ | ۲/۹۸ |
| ۰/۰۰۰۰۱ | ۸۶/۱۴۹۱ | ۲/۶۷۸ |
| $۵/۴۷ \times 10^{-6}$ | ۸۶/۱۵۸۶ | ۲/۶۲۹ |



شکل ۵- نمای کلی و برش خورده دستگاه جداکننده شبیه‌سازی شده

همانطور که در شکل (۶) مشخص است هرچه از میزان بار جامد کاسته می‌شود بازدهی افزایش می‌یابد تا جایی که حدود کسر حجمی ۰/۰۰۱ و کمتر از آن بازدهی تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین افزایش بار ذرات جامد باعث افزایش افت فشار نیز می‌شود.



شکل ۶- اثر بار ذرات جامد بر بازدهی و افت فشار

اثر اندازه قطر ذرات جامد بر عملکرد جداکننده در سرعت جریان ورودی ۵ m/s و کسر حجمی ۰/۰۰۰۰۰۵۴۷ نیز شبیه‌سازی شده است که محدوده این اندازه با توجه به جدول (۱) در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل (۷) مشخص است با افزایش مقدار قطر ذرات بر بازدهی جداسازی نیز افزوده می‌شود.

بعد از مشخص شدن نیروهای موثر در جداسازی، به بررسی استقلال جواب از مش در شبیه‌سازی جداکننده پرداخته می‌شود. همانطور که در قسمت اعتبارسنجی مشخص شد، شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از مدل اغتشاش RSM و روش آپویند مرتبه دوم انجام شده و برای پیش بینی جریان دوفازی از روش اولرین-اولرین استفاده شده است. ضمناً برای مقایسه بهتر بازدهی شبیه‌سازی در مراحل مختلف سرعت ورودی جریان دو فازی به دستگاه جداکننده برابر ۵ m/s، میزان کسر حجمی ذرات برابر با ۰/۰۱ و قطر ذرات برابر با ۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی استقلال جواب از مش، میانگین سرعت در قسمت خروجی مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که در اندازه فاصله ۰/۰۳۲۵ متر بین گره‌های شبکه محاسباتی، شرط استقلال جواب برقرار می‌شود، که تعداد کل مش‌ها در حدود ۴۰۰۰۰۰ عدد خواهد شد.

۳-۲-۱ تأثیر مقدار بار جامد، قطر ذرات و سرعت ورودی

در این مرحله با پارامترهای طراحی که مشخص شده و با سرعت جریان ورودی ۵ m/s و با عدد رینولدزی برابر با ۲۵۰۰۰۰ و شدت آشفتگی ۳/۳۸، اثر میزان بار جامد در جریان گاز از کسر حجمی ۰/۰۹ تا ۰/۰۰۰۰۰۵۴۷ که مطابق با اطلاعات جدول (۱) است، بر بازدهی و افت فشار بررسی شده است. جدول (۲) نتایج شبیه‌سازی با میزان بارهای مختلف ذرات جامد را نشان می‌دهد.

1. Load

می‌دهد. در مورد روش‌های حل نیز روش حل کوئیک و آپویند مرتبه دوم خطای کمتری نسبت به روش آپویند مرتبه اول داشتند که زمان محاسباتی آپویند مرتبه دوم کمتر از مدل کوئیک می‌باشد. در شبیه‌سازی دوفازی مشخص شد دیدگاه اولرین - اولرین مناسب‌ترین روش شبیه‌سازی جریان دوفازی در این جداکننده است و هرچه از میزان بار جامد کاسته می‌شود بازدهی افزایش می‌یابد تا جایی که حدود کسر حجمی ۰/۰۰۱ و کمتر از آن، بازدهی تقریباً ثابت می‌ماند. همچنین افزایش بار ذرات جامد باعث افزایش افت فشار نیز می‌شود. همچنین با افزایش مقدار قطر ذرات، بازدهی جداسازی نیز افزوده می‌شود. و در نهایت همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش سرعت ورودی، بازدهی جداسازی و همچنین افت فشار افزایش یافته است.

۵- تشکر و قدرانی

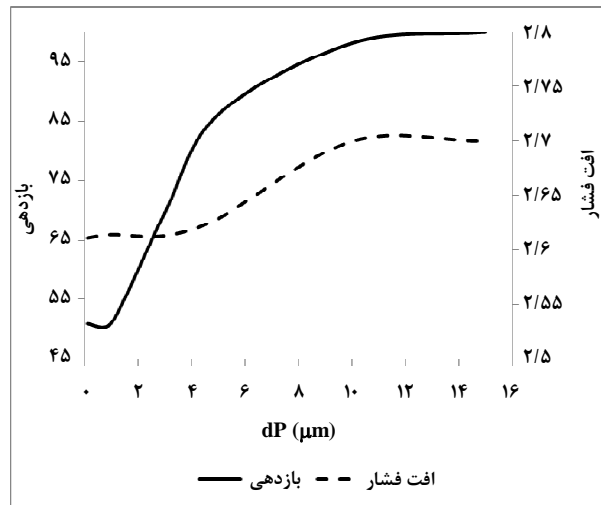
از حمایت مالی و پشتیبانی شرکت انتقال گاز ایران در انجام این پژوهش تشکر می‌شود.

مراجع

- [1] Su, Y., Zheng, A., Zhao, B., "Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance", Powder Technology 210 P.293-303 (2011).
- [2] Fathikalajahi, J., Talaie, M. R., Taheri, M., "Theoretical study of liquid droplet dispersion in a Venturi scrubber", Air Waste Manage. Assoc. 45 P.181-185 (1995).
- [3] Brouwers, J. J. H. "Particle collection efficiency of the rotational particle separator". Powder Technol. 92 P.89-99 (1997).
- [4] Mueller Environmental Designs, Inc, www.muellerenvironmental.com, (2011-08-29).
- [5] Saha, S. K., "Thermal and friction characteristics of laminar flow through rectangular and square ducts with transverse ribs and wire coil inserts", Experimental Thermal and Fluid Science. 34 P.63-72 (2010).
- [6] Cioncolini, A., Santini, L., "An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes", Experimental Thermal and Fluid Science. 30 P.367-380 (2006).
- [7] Ranade, V., "Computational Flow Modeling For Chemical Reactor Engineering". 1st ed. Academic Press, London P.67 (2002).

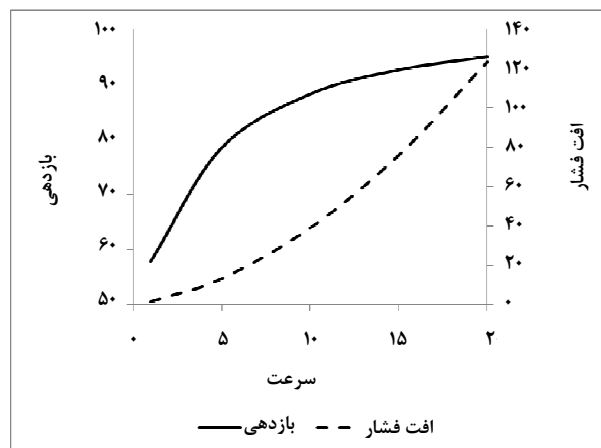
[۸] رضایی، س "شبیه‌سازی CFD تفکیک‌گرهای ذرات جامد از گاز طبیعی"، رساله کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، ص. ۱۰۶ (۱۳۹۰).

[۹] استریتر، وایلی، بدفورد، "مکانیک سیالات". مترجمین ملک‌زاده، کاشانی حصار. ویرایش نهم. نشر نما و جهان فردا، مشهد. ص. ۳۱۰ (۱۳۸۴).



شکل ۷- اثر اندازه قطر ذرات بر بازدهی و افت فشار

در گام نهایی با کسر حجمی ۰/۰۱ و قطر ۵ میکرون به بررسی اثر سرعت جریان در بازدهی پرداخته شده است.



شکل ۸- اثر سرعت جریان ورودی (m/s) بر بازدهی و افت فشار

همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش سرعت ورودی، بازدهی جداسازی و همچنین افت فشار افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق جریان دوفازی گاز-جامد در کانالی مارپیچ و با سطح مقطع مستطیل با استفاده از تکنیک‌های CFD شبیه‌سازی گردید. ضریب اصطکاک در کانال مستطیلی صاف مارپیچ جهت اعتبارسنجی مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج تجربی نشان داد که مدل تابع دیواره دارای زمان محاسباتی، و همچنین، خطای کمتری می‌باشد. در مورد مدل‌های اغتشاش، مدل RSM و RNG k-ε خطای کمتری نسبت به سایر مدل‌ها نشان