

شبیه‌سازی تاثیر تغییرات فشار محیط بر عملکرد جداکننده دو مرحله‌ای واسطه سنگین آزمایشگاهی

رضا دهقان^۱، محسن آقایی^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد
۲- دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد

(دریافت ۱۳۹۷/۱۱/۳۰، پذیرش ۱۳۹۸/۰۲/۳۰)

چکیده

از آنجا که در جداکننده دو مرحله‌ای واسطه سنگین، بار ورودی به صورت ثقلی و در فشار اتمسفر به دستگاه وارد می‌شود و اختلاف فشار سیال داخل دستگاه با محیط بیرون، از طریق تنظیم فشار معکوس در خروجی‌های محصول غوطه‌ور و محصول میانی کنترل می‌شود، بنابراین بررسی تاثیر فشار محیط بر عملکرد جداکننده اهمیت دارد. در این تحقیق، اثر فشار محیط بر الگوی جریان در جداکننده واسطه سنگین دو مرحله‌ای با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) به صورت سه فازی (آب، هوا و جامد) مدل‌سازی شده است. بدین منظور، از مدل چندفازی حجم سیال (VOF) برای تعیین شکل اولیه و موقعیت هسته هوا در داخل جداکننده و از مدل فاز مجزا (DPM) برای توصیف جریان ذرات جامد استفاده شد. آشفتگی با استفاده از مدل تنش رینولدز (RSM) توصیف شده است. بر همین اساس شبیه‌سازی در فشار یک اتمسفر (در سطح آب‌های آزاد)، ۰٫۸۶ اتمسفر (در ارتفاع ۱۲۵۰ متر از سطح دریا) و ۰٫۶۴ اتمسفر (در ارتفاع ۳۵۰۰ متر از سطح دریا) انجام شد. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، تغییر در فشار محیطی منجر به تغییراتی در میدان جریان، پارامترهای ماکروسکوپیکی و عملکرد جداکننده می‌شود. اعتبار نتایج شبیه‌سازی با مقایسه و انطباق بر نتایج آزمایشگاهی حاصل از یک دستگاه جداکننده شفاف ساخته شده به همین منظور تأیید شده است. نتایج الگوی هسته هوا و سرعت‌های خروجی سیال در اعتبارسنجی استفاده شده‌اند. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که با کاهش فشار محیط، مقدار خطای احتمال (Ep) کاهش و بازیابی واسطه افزایش می‌یابد اما مقادیر این تاثیرات کمتر از ۲ درصد به دست آمد. بنابراین می‌توان از جداکننده واسطه سنگین گریز از مرکز دو مرحله‌ای در موقعیت‌های مکانی با ارتفاع مختلف از سطح دریا بدون این که خللی در عملکرد جداکننده ایجاد شود، استفاده کرد.

کلمات کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی، فشار اتمسفر، مدل فاز مجزا، جدایش واسطه سنگین.

۱- مقدمه

جداکننده‌های واسطه سنگین دو مرحله‌ای که به عنوان جداکننده تری‌فلو^۱ شناخته می‌شود، در صنعت زغال‌شویی مدرن برای پرعیارسازی زغالسنگ در محدوده ابعادی ۰٫۵ تا ۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. از زمان اختراع این جداکننده در دهه ۱۹۸۰ تا دهه حاضر، قابلیت‌های تری‌فلو در صنعت زغال‌شویی به اثبات رسیده است. امروزه جداکننده‌های تری‌فلو در تناژهای مختلف در کارخانه‌های زغال‌شویی استفاده می‌شوند [۵-۱]. جریان در یک تری‌فلو به علت وجود جریان چرخشی، هسته هوا، تفکیک واسطه و چندفازی بودن جریان (شامل هوا، مایع، ذرات ماده معدنی و ذرات واسطه با ابعاد و چگالی‌های مختلف)، بسیار پیچیده است. مهندسان و طراحان برای پیش‌بینی عملکرد تجهیزات، به طور مرسوم از معادلات تجربی که تابعی از شرایط عملیاتی، هندسی و ویژگی‌های مواد است، استفاده می‌کنند و در گذشته مطالعات تجربی زیادی در این زمینه برای جداکننده‌های سیکلونی انجام شده است. با این وجود، این امر منجر به درک بهتر رفتار جریان تحت شرایط مختلف نمی‌شود و نتایج اغلب کاربرد محدودی دارند. امروزه، درک جامع از اثرات پارامترهای عملیاتی، محیطی و هندسی بر طراحی و کنترل جداکننده‌های واسطه سنگین از چالش‌های پیش روی مهندسان فرآوری مواد معدنی است. اندازه‌گیری ساختار جریان‌های داخلی و نیروها در جداکننده‌های سیکلونی از طریق بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی بسیار دشوار و پرهزینه بوده و به ندرت انجام شده است. بدون چنین اطلاعات میکروسکوپی، این جداکننده‌ها عمدتاً به عنوان یک جعبه سیاه عمل می‌کنند. بنابراین، توسعه یک مدل کامپیوتری که قادر به توصیف اصول حاکم بر جریان چندفازی و پیش‌بینی عملکرد جداکننده تحت شرایط مختلف باشد، به عنوان گامی مهم برای غلبه بر این مشکل شناخته شده است.

در دو دهه گذشته، مطالعات مختلفی برای توسعه چنین مدل ریاضی بر اساس مبانی جریان و دینامیک سیالات محاسباتی^۲ (CFD) انجام گرفته است. شبیه‌سازی CFD توسط بسیاری از محققان برای تخمین عملکرد سیکلون و درک اثر پارامترهای هندسی و عملیاتی در میدان جریان داخل سیکلون استفاده شده است [۱۳-۶]. ویژگی‌های اصلی عملکرد جداکننده‌های سیکلونی، کارایی جمع‌آوری، بازبایی حجمی واسطه و افت فشار است. افت فشار جداکننده سیکلون بستگی به هندسه سیکلون و شرایط عملیاتی دارد [۱۶-۱۴]. هندسه

سیکلون بر الگوی جریان و عملکرد سیکلون تاثیر می‌گذارد. واکامالاً^۳ و همکاران، اثر شیب قراگیری سیکلون واسطه سنگین را با استفاده از شبیه‌سازی گردابه بزرگ^۴ و حجم سیال^۵ بررسی کردند و مشاهده شد که با افزایش شیب قطر هسته هوا به طور جزئی کاهش می‌یابد [۱۷]. السید^۶ و همکارش، تاثیر ابعاد دریچه سرریز (قطر و طول) بر عملکرد و الگوی میدان جریان در سیکلون را با استفاده از مدل LES، بررسی کردند و نشان دادند که افزایش قطر و طول دریچه سرریز منجر به افزایش افت فشار می‌شود [۱۸]. این محققان در پژوهشی دیگر اثر ابعاد ورودی سیکلون با استفاده از مدل آشفتگی تنش رینولدز^۷ را مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که با افزایش ابعاد ورودی سیکلون، حداکثر سرعت مماسی در سیکلون و همچنین افت فشار کاهش می‌یابد [۱۹]. چوها^۸ و همکاران، اثر ابعاد مخروط سیکلون بر عملکرد و هیدرودینامیک سیکلون را مورد ارزیابی قرار دادند و گزارش دادند که بالاترین سرعت‌های مماسی و محوری در مخروط‌های کوچک اتفاق می‌افتد که منجر به کارایی جمع‌آوری و افت فشار بالاتر می‌شود [۲۰]. آزادی و همکاران، اثر ابعاد سیکلون بر جریان داخلی را با استفاده از یک مدل سه بعدی اویلری-لاگرانژی^۹ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که با افزایش ابعاد سیکلون، افت فشار سیکلون افزایش می‌یابد [۲۱]. رئوفی و همکاران، اثر شکل دریچه سرریز بر الگوی جریان به کمک روش CFD را مورد بررسی قرار دادند [۲۲]. مورتی^{۱۰} و همکارش، برای درک اثر شرایط عملیاتی و هندسی بر فرآیند سیکلون، با رویکرد CFD و با استفاده از مدل آشفتگی RSM در حالت پایا، شبیه‌سازی انجام دادند. مطالعات نشان داد که اندازه حد جدایش سیکلون با افزایش قطر سرریز، کاهش قطر ته‌ریز، کاهش سرعت ورودی سیال و کاهش گرانروی سیال، افزایش می‌یابد [۲۳]. صفی‌خانی و همکاران، اثر طول بخش‌های استوانه‌ای و مخروطی به صورت نسبتی از قطر سیکلون را با استفاده از روش CFD و مدل آشفتگی RSM بررسی کردند. تجزیه و تحلیل عددی نشان داد که افت فشار، سرعت و آشفتگی تقریباً مستقل از قطر بدنه سیکلون است [۲۴]. دمیر^{۱۱} و همکاران، از روش CFD، اثر ارتفاع بخش استوانه‌ای و مخروطی بر افت فشار و میدان جریان داخل سیکلون را مورد بررسی قرار دادند. افت فشار تابعی از ارتفاع هر دو بخش استوانه‌ای و مخروطی است که با افزایش ارتفاع بخش استوانه‌ای و یا مخروطی، افت فشار کاهش می‌یابد [۲۵]. کومار^{۱۲} و همکارش، اثر قطر بدنه اصلی

که رفتار جریان سیال در یک جداکننده سه محصوله آشفته، تراکم‌ناپذیر است. معادلات نویر استوکس میانگین‌گیری شده رینولدز^۱ در روابط ۱ و ۲ ارایه شده است:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2)$$

که در این روابط:

u : سرعت

p : فشار

ρ : چگالی

μ : گرانروی سیال

i : نشان‌دهنده جهت x

j : نشان‌دهنده جهت y است.

R_{ij} به شکل رابطه ۳ تعریف می‌شود:

$$R_{ij} = -\rho \overline{u_i u_j} \quad (3)$$

که در آن:

\bar{u}_i : سرعت متوسط

u_i' : نوسان سرعت (که $u_i' = u_i - \bar{u}_i$)

u_i : سرعت لحظه‌ای است.

در رابطه ۳، ترم R_{ij} تانسور تنش رینولدز نامیده می‌شود که اثر نوسان‌های آشفتگی و سرعت بر روی جریان سیال را نشان می‌دهد. تانسور تنش رینولدز است که با رابطه‌های ۴ تا ۸ مدل می‌شود:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i u_j}) = D_{Tij} + P_{ij} + \Phi_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

$$D_{Tij} (\text{Turbulent Diffusion}) = -\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_i u_j u_k} + p (\delta_{kj} u_i + \delta_{ik} u_j)) \quad (5)$$

$$P_{ij} (\text{Stress Production}) = -\rho \left(\overline{u_i u_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

$$\Phi_{ij} (\text{Pressure Strain}) = p \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} \quad (7)$$

سیکلون را بر عملکرد آن به کمک مدل RMS بررسی کردند و مشخص شد که با افزایش قطر سیکلون، افت فشار و کارایی جمع‌آوری و شدت آشفتگی افزایش می‌یابد [۲۶]. قدرت و همکاران، یک مطالعه عددی جریان چندفازی در هیدروسیکلونها با چیدمان‌های مختلف قطر ته‌ریز و ابعاد سیکلون انجام دادند. کارایی جدایش با افزایش قطر سیکلون کاهش می‌یابد. درصد جامد خوراک ورودی بر کارایی جدایش معنی‌دار است. کارایی جدایش با افزایش درصد جامد خوراک ورودی کاهش می‌یابد. هر دو قطر بزرگ و کوچک ته‌ریز منجر به عملکرد ضعیف می‌شود. به این ترتیب، قطر ته‌ریز بهینه بسته به غلظت جامدات خوراک ورودی، تعیین می‌شود [۲۷]. ژو^{۱۲} و همکاران، اثر نسبت قطر سرریز به قطر ته‌ریز بر پایداری هسته هوا را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که میزان پایداری هسته هوا عمدتاً با این نسبت تعیین می‌شود. محدوده‌های مختلف این نسبت منجر به حالت‌های پایدار مختلف هسته هوا می‌شود. در تحقیق یاد شده در نسبت ۱ به ۲، هسته هوا در داخل هیدروسیکلون تشکیل نشده بود [۲۸]. بلاردی و همکاران، به طور خلاصه الگوی جریان داخل جداکننده تری‌فلو با قطر ۱۰۰ میلی‌متر را نشان دادند. در عین حال این تحقیق صرفاً دو فازی (بدون منظور کردن ذرات جامد و با استفاده از سیال آب) بوده و هیچ گونه داده‌های آزمایشگاهی یا تجربی در آن ارایه نشده است [۲۹]. علی‌رغم مطالعات متعدد مورد اشاره در مورد مدلسازی سیکلون‌های واسطه سنگین با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی، تاکنون تاثیر فشار محیط بر الگوی جریان در جداکننده تری‌فلو به صورت سه فازی به روش CFD شبیه‌سازی و اعتبارسنجی نشده است.

در میان پارامترهای اثرگذار بر الگوی جریان و عملکرد جداکننده تری‌فلو، در این تحقیق تاثیر عامل فشار محیط بر عملکرد هیدرو دینامیکی جداکننده تری‌فلو مورد توجه قرار گرفت. به همین منظور هیدرو دینامیک جریان و رفتار جداکننده در سه ارتفاع مختلف متناظر با فشارهای محیطی ۱، ۰٫۸۶ و ۰٫۶۴ اتمسفر با روش شبیه‌سازی CFD مورد تحلیل قرار گرفت.

۲- شبیه‌سازی ریاضی

۲-۱- مدل آشفتگی تنش‌های رینولدز

در این مطالعه، رابطه‌های انتقال برای بقای جرم و مومنوم در سیستم کارتیزین سه بعدی حل شده‌اند. فرض بر این است

۲-۳- مدل فاز مجزا

ردیابی حرکت ذرات با استفاده از مدل جریان چندفازی لاگرانژی تعریف شده است. نیروهای فشار و مقاومت سیال (درگ) وارد بر ذرات در یک چارچوب لاگرانژی محاسبه می‌شود. توزیع سرعت ذرات را می‌توان با موازنه نیروهای وارد بر ذره برآورد کرد (رابطه ۱۲).

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (12)$$

که در آن:

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$: نیروی درگ وارد بر ذره است (روابط ۱۳ و ۱۴).

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} C_D \frac{Re_p}{24} \quad (13)$$

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (14)$$

که در آن:

\vec{u}_p : سرعت ذره

\vec{u} : سرعت سیال

ρ_p : چگالی ذره

d_p : قطر ذره

C_D : ضریب درگ

Re_p : عدد رینولدز ذره است.

۳- روش تحقیق

۳-۱- چیدمان آزمایشگاهی و هندسه جداکننده

برای مطالعه اثر ساختار هندسی و شرایط عملیاتی بر عملکرد و الگوی جریان جداکننده تری‌فلو، یک واحد آزمایشگاهی از این جداکننده ساخته شد. این واحد شامل جداکننده سه محصوره، دو مخزن پلی‌اتیلن، سه وان پلی‌اتیلن و دو پمپ آب است. هر یک از پمپ‌ها، همراه با یک کنترل‌کننده شدت جریان، واسطه (در این مطالعه آب) را از مخزن ذخیره و از طریق ورودی‌های حلزونی شکل وارد جداکننده می‌کنند. دو شدت‌تجربانسنج و دو فشارسنج در ورودی جداکننده برای نشان دادن سرعت جریان و فشار سیستم نصب شده‌اند.

شکل ۱ نمای کلی از جداکننده شفاف آزمایشگاهی و تجهیزات جانبی آن را نشان می‌دهد.

جداکننده تری‌فلو در این سیستم از پلکسی‌گلاس شفاف

$$\varepsilon_{ij}(\text{dissipation}) = -2\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} \quad (8)$$

که در این روابط:

D_{Tij} : انتقال R_{ij} به وسیله نفوذ

P_{ij} : آهنگ تولید R_{ij}

\mathcal{O}_{ij} : انتقال R_{ij} به واسطه اثرات متقابل فشار- کرنش

آشفستگی

ε_{ij} : آهنگ استهلاک R_{ij} است.

۲-۲- مدل چندفازی

برای تعیین سطح اشتراک هسته هوا و واسطه در یک جداکننده تری‌فلو از مدل VOF استفاده شد. VOF دو یا چند سیال مخلوط نشدنی شبیه‌سازی می‌کند که در آن موقعیت سطح اشتراک بین سیال‌ها مورد توجه است. ردیابی سطح اشتراک هوا و مایع در جداکننده تری‌فلو با حل رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$\frac{\partial \alpha_p}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_p}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

که در آن:

α_p : کسر حجمی فاز p (بین صفر تا یک متغیر است).

u_i : مولفه سرعت در جهت i است.

یک معادله مومنتوم در سرتاسر دامنه حل می‌شود و میدان سرعت حاصل شده بین دو فاز به اشتراک گذاشته می‌شود. این معادله مومنتوم وابسته به کسر حجمی فاز سیال است و به شکل رابطه ۱۰ نشان داده می‌شود.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho g_i \quad (10)$$

که ρ چگالی میانگین است و با استفاده از رابطه ۱۱ تعیین می‌شود.

$$\rho = \sum \alpha_p \rho_p \quad (11)$$

از الگوریتم ردیابی سطح اشتراک صریح در VOF استفاده شده است.

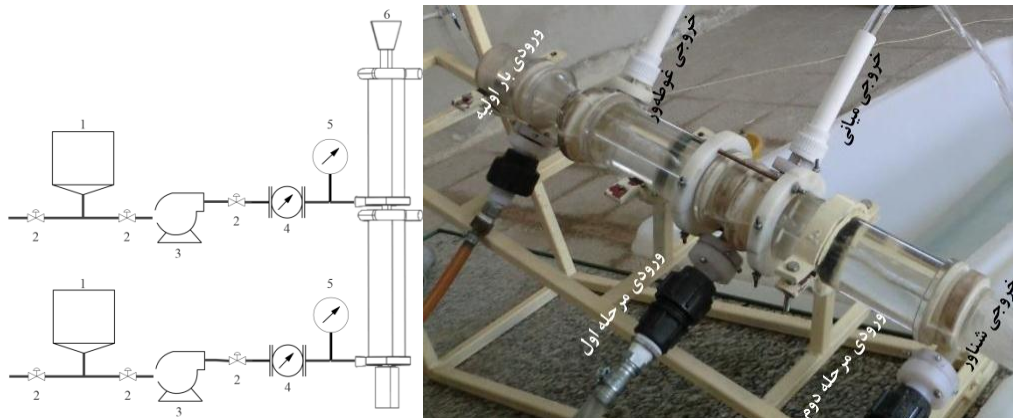
طریق ورودی‌های مرحله اول و مرحله دوم با سرعت میانگین ۱٫۸۶ متر بر ثانیه وارد جداکننده شد. عدد رینولدز بر اساس قطر هیدرولیک دهانه ورودی برابر با 4.2×10^4 و براساس قطر بدنه دستگاه برابر با 1.5×10^5 محاسبه شد. جداکننده از طریق دهانه‌های ورودی بار اولیه و خروجی شناور به اتمسفر ارتباط دارد، در حالی که در دهانه‌های خروجی غوطه‌ور و میانی فشار معینی اعمال می‌شود. بدین ترتیب شرایط مرزی برای حل مساله به صورت زیر تعریف شد:

برای ورودی‌های مرحله اول و دوم، سرعت ورودی و قطر هیدرولیک ۲۰ میلی‌متر به عنوان شرایط مرزی استفاده شد. برای ورودی بار اولیه و خروجی شناور، فشار خروجی با فشار

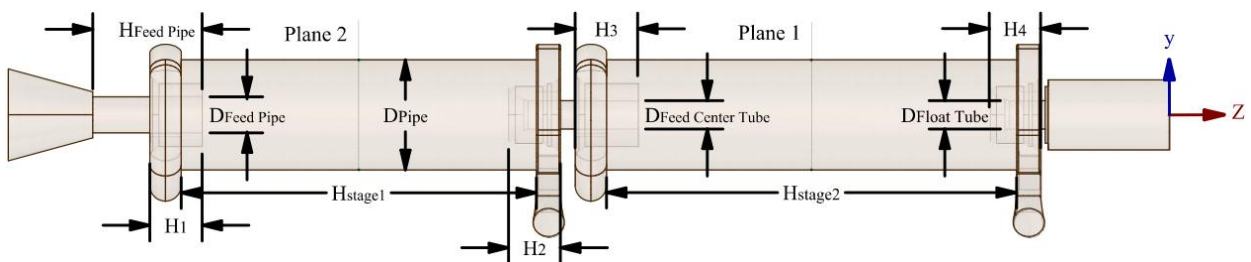
ساخته شده است تا پدیده میدان جریان داخل جداکننده مشاهده شود. یک دوربین نیز برای ضبط فرآیند و تغییرات جزئی هسته هوا استفاده شد.

۳-۲- هندسه و شرایط مرزی

هندسه جداکننده سه محصوله در نرم‌افزار سالیدورک^{۱۴} طراحی شد و شماتیکی از هندسه در شکل ۲ نشان داده شده است. جزییات ابعاد هندسی در جدول ۱ ارایه شده است. شیب قرارگیری دستگاه نسبت به افق ۳۰ درجه و همچنین شیب لوله‌های خروجی (غوطه‌ور و میانی) و لوله‌های ورودی واسطه به ترتیب نسبت به افق دارای زاویه ۴۵ و ۳۰ درجه بود. آب از



شکل ۱: شماتیکی از واحد آزمایشگاهی جداکننده استوانه‌ای سه محصولی: ۱- مخزن قیفی پلی‌اتیلن، ۲- شیرهای کنترلی، ۳- پمپ گریز از مرکز، ۴- شدتجریان‌سنج، ۵- فشارسنج و ۶- جداکننده استوانه‌ای سه محصولی



شکل ۲: شماتیکی از هندسه جداکننده سه محصوله

جدول ۱: جزییات هندسه جداکننده سه محصوله (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

H ₄	H ₃	H ₂	H ₁	D _{Pipe}	D _{Float Tube}	D _{Feed Center Tube}	H _{Stage2}	H _{Stage1}	D _{Feed Pipe}	H _{Feed Pipe}
۳۲٫۸	۴۰	۳۳٫۲	۳۳٫۵	۷۰	۱۸	۱۸	۲۶۲٫۴	۲۲۷٫۴	۲۳	۷۰

و ایده آل است که تمام ذرات با ارزش سبک به عنوان محصول نهایی به خروجی شناور و ذرات بی ارزش سنگین به عنوان باطله به جریان خروجی غوطه‌ور بروند. با این حال، در عمل، جدایش همیشه ایده آل نیست زیرا ذرات با ارزش و ذرات بی ارزش به علت تقابل ذره-ذره، بی‌ثباتی سیستم و عوامل دیگر به اشتباه به ترتیب در جریان رو به بالا و جریان رو به پایین قرار می‌گیرند. در نتیجه، عملکرد یک جداکننده واسطه سنگین با چند پارامتر مانند منحنی توزیع^{۲۱}، چگالی جدایش (ρ_{50}) یا انحراف^{۲۲} و خطای احتمال یا احتمال اکارت^{۲۳} (Ep) ارزیابی می‌شود. منحنی توزیع سهم هر ذره با چگالی معین را در ورودی به جریان کنسانتره یا باطله نشان می‌دهد. ρ_{50} به صورت چگالی ذراتی تعریف می‌شود که احتمال قرارگیری آن ذره در جریان کنسانتره و یا باطله یکسان باشد. انحراف چگالی برابر با اختلاف بین ρ_s و چگالی واسطه ورودی به جداکننده است. $Ep = (\rho_{75} - \rho_{25}) / 2$ که ρ_{25} و ρ_{75} به ترتیب چگالی‌هایی‌اند که ۷۵ و ۲۵ درصد از ذرات خوراک به جریان شناور می‌روند. در این بخش، جریان ذرات با استفاده از این پارامترها بررسی خواهند شد.

۳-۳- تولید مش

برای دستیابی به نتایج عددی معنی‌دار، کیفیت مش اهمیت زیادی دارد که عمدتاً با سه عامل، نوع، ابعاد و آرایش مش تعیین می‌شود. در این مطالعه دامنه محاسباتی به شبکه‌های هگزاهدرال تقسیم شد. به دلیل ماهیت غیرمحموری ورودی و خروجی‌های حلزونی شکل جداکننده‌های استوانه‌ای سه محصولی، نمی‌توان آن را به صورت دوبعدی مدل‌سازی کرد. مدل محاسباتی حاضر بر اساس هندسه سه‌بعدی است. سه شبکه با تعداد سلول ۴۶۸۶۲۷، ۷۳۸۸۴۵ و ۱۲۵۸۲۵۳ با استفاده از بسته نرم‌افزاری نیومکا/ اتومش^{۲۴} تولید شد. عدد اوپلر^{۲۵} برای بررسی استقلال از شبکه مورد استفاده قرار گرفت. مقدار عدد اوپلر با استفاده از شبکه‌های درشت، متوسط و ریز در شبیه‌سازی به ترتیب ۲،۶۸۰۱، ۲،۶۴۷۴ و ۲،۶۳۲۰ بوده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، اختلاف بین نتایج شبکه درشت و ریز ۱،۷۹ درصد و اختلاف بین نتایج شبکه متوسط و ریز ۰،۵۸ درصد است. با توجه به اختلاف کمتر از یک درصد بین شبکه متوسط و ریز، شبکه متوسط با تعداد ۷۳۸۸۴۵ سلول برای شبیه‌سازی CFD استفاده شد (شکل ۳).

استاتیک صفر پاسکال و قطر هیدرولیک به ترتیب ۵۸،۶۴ و ۴۴،۶ میلی‌متر استفاده شد. برای هر دو مرز خروجی غوطه‌ور و میانی شرط مرزی شامل فشار معکوس خروجی و قطر هیدرولیک ۲۰ میلی‌متر انتخاب شد. شدت آشفتگی برای تمام مرزها ۵ درصد و در نهایت شرط مرزی عدم لغزش برای دیواره جداکننده سه محصوله انتخاب شد. ویژگی‌های دو فاز سیال انتخاب شده در مدل VOF در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: ویژگی‌های فازهای استفاده شده در شبیه‌سازی

چگالی (kg m^{-3})		گرانروی (Pa s)	
آب	هوا	آب	هوا
۹۹۸،۲	۱،۲۲۵	1×10^{-3}	$1,8 \times 10^{-5}$

شرط مرزی فاز مجزای escape برای جریان خروجی شناور و برای هر دو مرز خروجی غوطه‌ور و میانی انتخاب شد. شرط مرزی escape، ذرات را به عنوان "escaped" گزارش می‌کند. برای دیواره از شرط مرزی reflect استفاده شد. معادله کارایی جمع‌آوری تری‌فلو (η) از رابطه ۱۵ به دست می‌آید:

$$\eta = \frac{\text{تعداد ذرات جمع‌آوری شده در شناور}}{\text{تعداد ذرات تزریق شده در ورودی بار اولیه}} \quad (15)$$

برای ردیابی حرکت ذرات، قانون درگ غیرکروی^{۱۵}، نیروی لیفت صافمن^{۱۶} و نیروی گرادیان فشار^{۱۷} انتخاب شده است. حداکثر تعداد گام 1×10^6 و معادله حرکت ذرات از طرح دوزنقه‌ای^{۱۸} مورد استفاده قرار گرفت. برای مدل‌سازی پخش آشفته^{۱۹} ذرات از مدل گام تصادفی مجزا^{۲۰} استفاده شده است. در DPM، ذرات با قطر ۳،۱ میلی‌متر و با توزیع چگالی ۹۰۰، ۹۱۰، ۹۲۰، ۹۳۰، ۹۴۰، ۹۵۰، ۹۶۰، ۹۷۰، ۹۸۰، ۹۹۰، ۱۰۰۰ و ۱۱۰۰ گرم بر سانتیمتر مکعب استفاده شد. ۲۰۰۰ ذره در هر یک از چگالی‌های فوق به عنوان فاز مجزا تزریق شد. بر این اساس درصد وزنی فاز گسسته در ناحیه جدایش دستگاه ۷،۵ درصد بوده است. بعد از جمع‌آوری داده‌های تعداد ذرات ورودی به هر یک از جریان‌های شناور، غوطه‌ور و میانی، عدد توزیع و شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شدند.

جریان ذره برای جداکننده تری‌فلو حیاتی و ضروری است زیرا از طریق آن کارایی تولید تعیین می‌شود. مطلوب

طبق شرط پایداری کورانت-فریدریش-لووی^{۳۲}، عدد کورانت^{۳۳} کمتر از ۱ باشد [۳۰]. مقدار گام زمانی برای تمام شبیه‌سازی‌ها 1.3×10^{-4} انتخاب شد. در این مطالعه، شبیه‌سازی عمدتاً بر تفاوت بین میدان‌های جریان در داخل جداکننده سه محصوله متمرکز شده است. در این رابطه، معادلات RANS در نرم‌افزار فلوئنت برای مطالعه تخمین قطر هسته هوا در جداکننده تری‌فلو حل شده است. مدل با مقایسه نتایج به دست آمده از داده‌های آزمایشگاهی اعتبارسنجی شده است.



شکل ۳: شماتیکی از مش استفاده شده در شبیه‌سازی

۴- نتایج

۴-۱- اعتبارسنجی مدل

اعتبار دقت مدل‌های ریاضی و رویکرد حل مورد استفاده در این مقاله باید سنجیده شود. بدین منظور مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی از جمله سرعت‌های خروجی در غوطه‌ور، میانی و شناور و همچنین قطر و شکل ظاهری هسته هوا مقایسه شد. در جدول ۴ نتایج سرعت‌های خروجی شبیه‌سازی و آزمایشگاهی آورده شده است.

در شکل ۴ هسته هوا شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴، هسته هوای شبیه‌سازی به طور قابل قبولی تغییرات عمودی هسته هوای آزمایشگاهی را به تصویر کشیده است و همچنین انحراف قطر هسته هوای شبیه‌سازی از آزمایشگاهی در مرحله اول و مرحله دوم به ترتیب برابر با ۴/۳ و ۵/۲ درصد است. با توجه به جدول ۴ و شکل ۴، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج شبیه‌سازی دارای انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

۴-۲- چیدمان محاسباتی

انتخاب روش‌های گسسته‌سازی^{۳۶} تاثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی دارد و حل‌کننده فلوئنت^{۳۷} روش‌های مختلفی برای کوپلینگ سرعت-فشار^{۳۸}، مومنتوم فشار^{۳۹}، انرژی جنبشی^{۴۰}، میزان اتلاف انرژی جنبشی^{۳۱} می‌دهد. تنظیمات عددی استفاده شده برای شبیه‌سازی‌ها در جدول ۳ آمده است. با توجه به معیارهای همگرایی، باید دو جنبه را در نظر گرفت. جنبه اول اینکه باقیمانده حل برای تمام معادلات 10^{-5} باشد (معیار همگرایی فلوئنت به طور پیش فرض برای همه معادلات پایین‌تر از 10^{-3} است). جنبه دوم، بعضی از مقادیر نماینده از قبیل سرعت و فشار باید کنترل شوند تا زمانی که ثابت شوند. اگر چه شبیه‌سازی‌های حاضر در حدود $(t = 2 \text{ s})$ همگرا بودند، اما شبیه‌سازی‌ها در $t = 10 \text{ s}$ ثانیه خاتمه یافت تا قطر ستون هوا نیز تقریباً ثابت شود. زمان اجرای هر شبیه‌سازی ۱۴۴ ساعت بود. گام زمانی شبیه‌سازی به گونه‌ای تعریف شده است که بر

جدول ۳: تنظیمات عددی استفاده شده برای شبیه‌سازی

تنش رینولدز	نرخ اتلاف آشفتگی	انرژی جنبشی	مومنتوم	کوپلینگ سرعت-فشار	فشار	
Second order Upwind	Second order Upwind	Second order Upwind	Second order Upwind	NITA (fractional)	PRESTO	طرح

جدول ۴: مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی سرعت‌ها

انحراف (درصد)	سرعت (متر/ثانیه)		موقعیت
	شبیه‌سازی	آزمایشگاهی	
۳/۹	۱/۵۸	۱/۵۲	خروجی غوطه‌ور
۶/۱	۱/۵۶	۱/۴۷	خروجی میانی
۲/۱	۰/۹۲	۰/۹۴	خروجی شناور

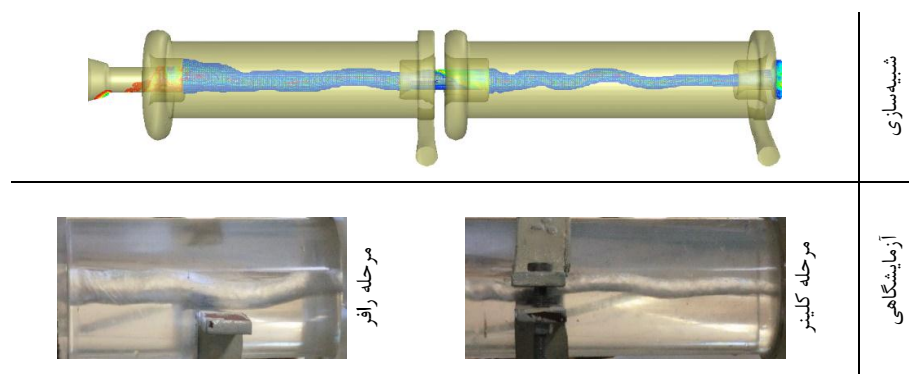
فشار گیج منفی تشکیل می‌شود. با توجه به فشار مشابه بین ورودی بار اولیه جداکننده و اتمسفر، منطقه فشار گیج منفی قادر به مکش هوا از طریق لوله ورودی بار اولیه است، بنابراین هسته هوا تشکیل می‌شود. در

شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی توسعه هسته هوا در فشارهای محیطی مختلف نشان داده شده است. هسته هوا تنها در وسط جداکننده قرار دارد، در حالی که سیال در نزدیکی دیواره است. که سیال به رنگ آبی و هوا به رنگ قرمز نشان داده شده است. دلیل آن این است که نیروی گریز از مرکز، جریان سیال را تحت جریان چرخشی قرار می‌دهد. وقتی که هوا به طور کامل در جداکننده توسعه یافت، کسر حجمی هوا در مرکز جداکننده نزدیک به یک است و از طریق ورودی بار اولیه و خروجی شناور به هوای آزاد ارتباط برقرار می‌کند. فشار اتمسفر بر روند توسعه

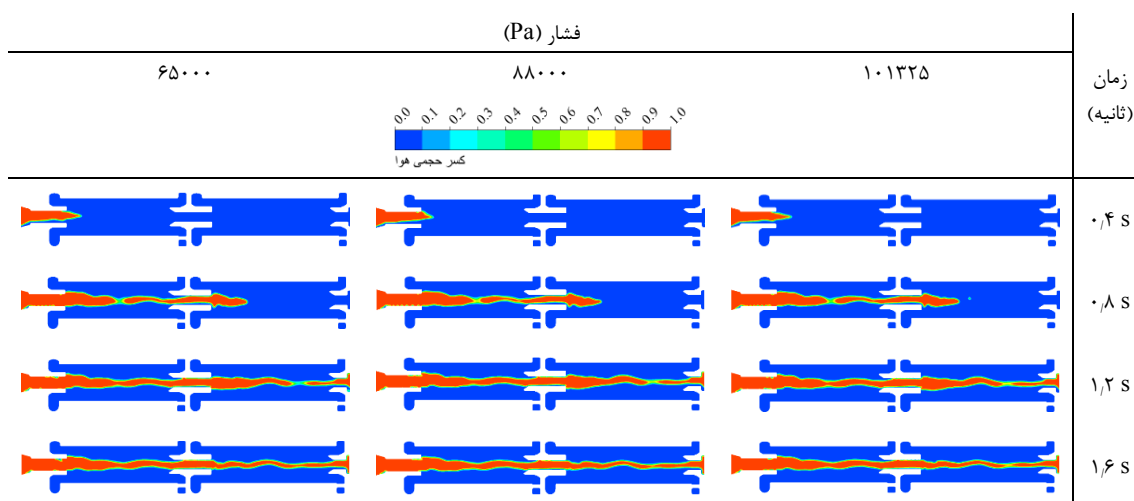
برای اعتبارسنجی نتایج فاز گسسته، ابتدا در آزمایشگاه با استفاده از ذرات جامد با ابعاد 3.1 میلی‌متر و در دو چگالی 900 و 1600 کیلوگرم/مترمکعب با نرخ 2.224 کیلوگرم/دقیقه به جداکننده آزمایشگاهی خوراک‌دهی شد که تمام ذرات با چگالی 900 به جریان شناور و تمام ذرات با چگالی 1600 کیلوگرم/مترمکعب به جریان غوطه‌ور راه یافتند. سپس در محیط شبیه‌سازی و در شرایط عملیاتی مشابه، ذرات با دو چگالی یاد شده به جداکننده خوراک‌دهی شد که نتایج توزیع ذرات عینا تکرار شد.

۴-۲- توسعه هسته هوا

هسته هوا یک پدیده منحصر به فرد در داخل جداکننده‌های گریز از مرکز است و در مرکز این جداکننده‌ها، یک منطقه



شکل ۴: مقایسه هسته هوا آزمایشگاهی و شبیه‌سازی شده



شکل ۵: توسعه الگوی جریان در جداکننده تری‌فلو در فشارهای محیطی مختلف

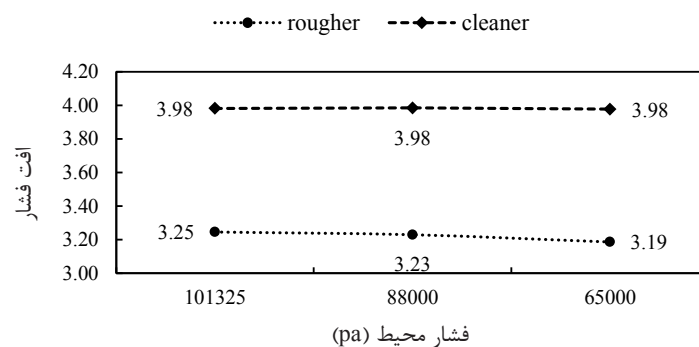
محصول شناور نسبت به مجموع واسطه ورودی به جداکننده است. مشاهده می‌شود که با کاهش فشار محیطی، هد عملیاتی در مرحله رافر کاهش ولی در مرحله کلینر تقریباً ثابت است و به عبارت دیگر فشار محیط بر روی مرحله کلینر تأثیر ندارد (شکل ۶). با کاهش فشار محیطی از ۱ به ۰٫۶۴ اتمسفر، نسبت جدایش واسطه و بازیابی واسطه به ترتیب ۱٫۹۶ و ۱٫۵۲ درصد افزایش می‌یابد (شکل ۷).

ساختار جریان فاز واسطه (آب) در داخل جداکننده تری‌فلو در شکل‌های ۸، ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. فشار استاتیک از دیواره به مرکز جداکننده به طور شعاعی کاهش می‌یابد. سرعت مماسی از دیواره به سمت مرکز جداکننده، کاهش و حداکثر مقدار آن در ناحیه نزدیک به دیواره قرار دارد. شکل ۸ نشان می‌دهد که فشار در تمامی نواحی جداکننده تری‌فلو با افزایش فشار محیطی افزایش می‌یابد. دلیل این رفتار این است که با افزایش فشار محیطی، برای پمپاژ کردن همان مقدار واسطه از طریق دهانه‌های ورودی واسطه به فشار بالاتری

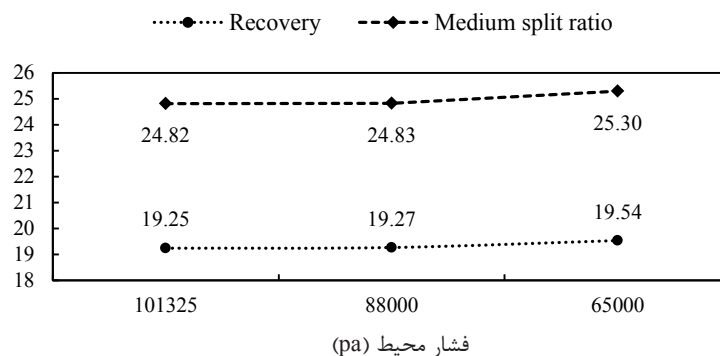
هسته هوا در جداکننده تری‌فلو تأثیر نمی‌گذارد. به عبارت دیگر در هر سه فشار محیطی، هسته هوا که مهمترین پدیده برای جدایش ذرات در جداکننده تری‌فلو است، تشکیل شده است.

۴-۳- بررسی میدان جریان

جریان واسطه به دلیل این که جریان ذرات جامد را کنترل می‌کند، مهم است. پارامترهای ماکروسکوپی که معمولاً برای توصیف جریان واسطه استفاده می‌شود عبارت از هد^{۳۴} عملیاتی، نسبت جدایش واسطه و بازیابی واسطه است. هد عملیاتی به صورت افت فشار بین ورودی و خروجی‌های هر مرحله جداکننده تری‌فلو تقسیم بر چگالی واسطه ورودی، شتاب گرانشی و قطر جداکننده تعریف می‌شود. نسبت جدایش واسطه، شدت جریان حجمی واسطه در خروجی شناور تقسیم بر مجموع شدت جریان حجمی واسطه در خروجی‌های غوطه‌ور و میانی است. بازیابی واسطه، مقدار واسطه ورودی در



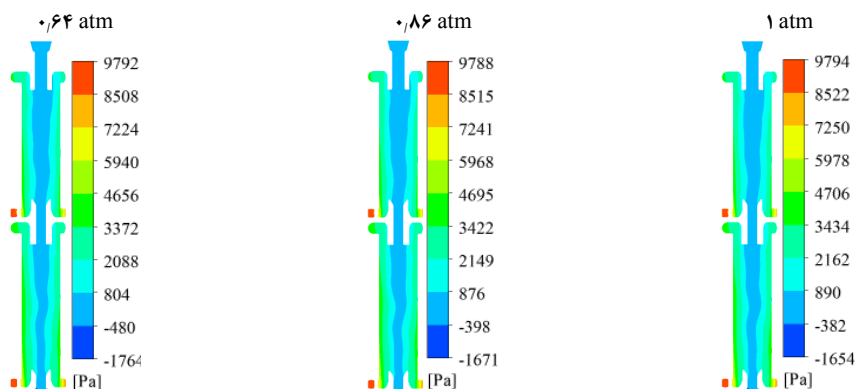
شکل ۶: هد عملیاتی تابعی از فشار محیطی



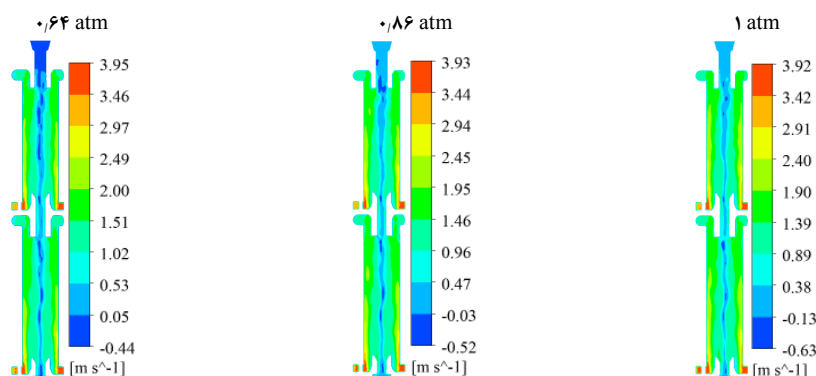
شکل ۷: نسبت جدایش واسطه و بازیابی واسطه تابعی از فشار محیطی

مورد نیاز است. این نتایج با داده‌های هد عملیاتی (شکل ۶) مطابقت دارد. از آنجا که یک گرداب قوی در بدنه جداکننده شکل می‌گیرد و مقدار زیادی سیال به دیواره پرتاب می‌شود، فشار استاتیک به سرعت از دیوار به مرکز کاهش می‌یابد، همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است. بزرگترین گرادیان فشار در امتداد جهت شعاعی است. بنابراین نیروی گرادیان فشار بر یک ذره در جهت شعاعی بالا و غالب است. تعادل بین نیروی گرادیان فشار و نیروی گریز از مرکز که مربوط به جریان چرخشی است، مقصد ذرات ماده معدنی را تعیین می‌کند. هنگامی که نیروی گرادیان فشار بر ذرات ماده معدنی بزرگتر از نیروی گریز از مرکز باشد، ذرات به جریان رو به پایین انتقال می‌یابد و از طریق خروجی شناور از جداکننده خارج می‌شود، در غیر این صورت، از طریق خروجی غوطه‌ور یا خروجی میانی تخلیه می‌شود. بنابراین نیروی گرادیان فشار برای عملیات

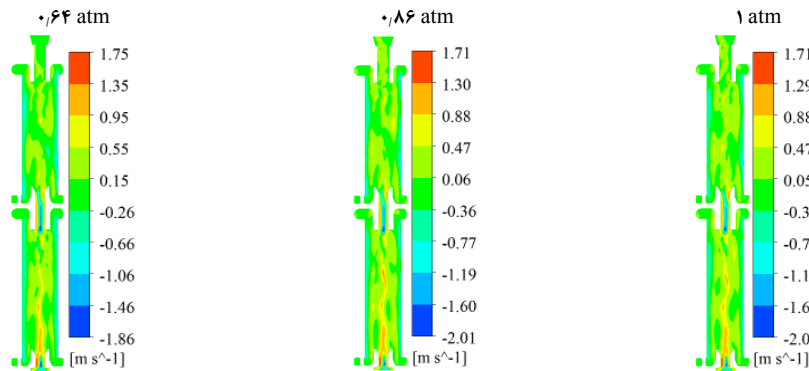
جداکننده تری‌فلو بسیار مهم است [۳۱]. همچنین با کاهش فشار محیطی، سرعت مماسی افزایش می‌یابد (شکل ۹) که به دلیل کاهش هد عملیاتی با کاهش فشار محیطی است (شکل ۶). میدان جریان در جداکننده تری‌فلو نشان‌دهنده ترکیبی از گردابه‌های تحت اجبار^{۳۵} و آزاد^{۳۶} گرداب رنکین^{۳۷} است [۳۲]. سرعت مماسی در دیواره و مرکز جداکننده صفر است (هسته هوا، گردابه تحت اجبار است). در شکل ۱۰، اعداد منفی، جریان رو به بالا و اعداد مثبت جریان رو به پایین نشان می‌دهد. به عبارت دیگر در مجاورت با دیواره جداکننده، جریان رو به بالا (طیفهای آبی رنگ) و در مجاورت با هسته هوا جریان رو به پایین (طیفهای سبز، زرد و قرمز) قرار دارد. حداکثر سرعت جریان رو به پایین و رو به بالا در فشار محیطی ۰٫۶۴ اتمسفر اتمسفرنسبت به دو فشار محیطی دیگر، به ترتیب بیشتر و کمتر است. این با نتایج نسبت جدایش واسطه و بازیابی واسطه در شکل ۷ مطابقت دارد.



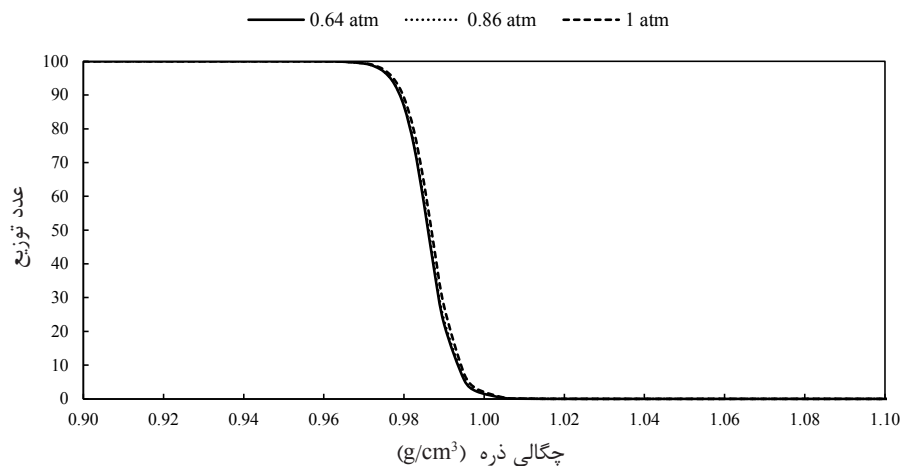
شکل ۸: کانتورهای فشار استاتیکی در فشارهای محیطی مختلف



شکل ۹: کانتورهای سرعت مماسی در فشارهای محیطی مختلف



شکل ۱۰: کانتورهای سرعت محوری در فشارهای محیطی مختلف



شکل ۱۱: منحنی توزیع ذره ۳٫۱ میلی‌متری برای فشارهای محیطی مختلف

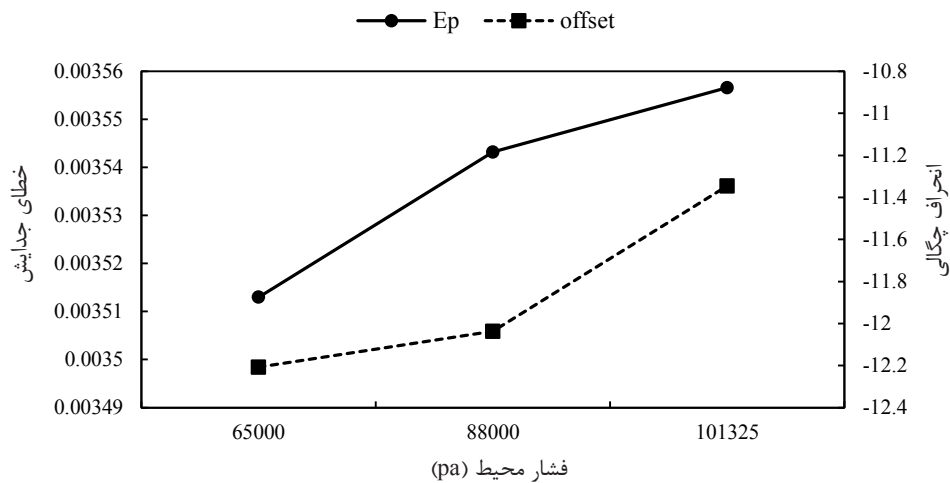
۴-۴- توزیع جریان ذره

شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با کاهش فشار محیطی منحنی توزیع به صورت جزئی به سمت چپ انتقال می‌یابد ولی به طور کلی تأثیر چندانی بر روی منحنی توزیع نشان نمی‌دهد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که عملکرد شبه‌سازی شده جداکننده، تحت تأثیر فشار محیطی است. همچنین شکل ۱۲ نشان می‌دهد که با کاهش فشار محیطی، خطای احتمال و انحراف چگالی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. این می‌تواند ناشی از کاهش هد عملیاتی در شکل ۶ باشد. با کاهش فشار محیطی، کارایی جداکننده برای ذره‌ای به ابعاد ۳٫۱ میلی‌متر ۱٫۲۳ درصد بهبود می‌یابد. در جدول ۵ موازنه تعداد ذرات و شدت جریان جرمی حاصل از شبه‌سازی ارایه شده است. همچنین شکل ۱۳ مسیر ذره با چگالی ۹۰۰ و ۱۱۰۰ کیلوگرم/مترمکعب را نشان می‌دهد.

۵- نتیجه‌گیری

برای مطالعه اثر فشار محیطی بر الگوی جریان داخل جداکننده واسطه سنگین تری‌فلو، سه شبه‌سازی با استفاده از روش CFD و با رویکرد اویلری-لاگرانژی انجام شد. نتایج مهم این مطالعه به طور خلاصه به شرح زیر است:

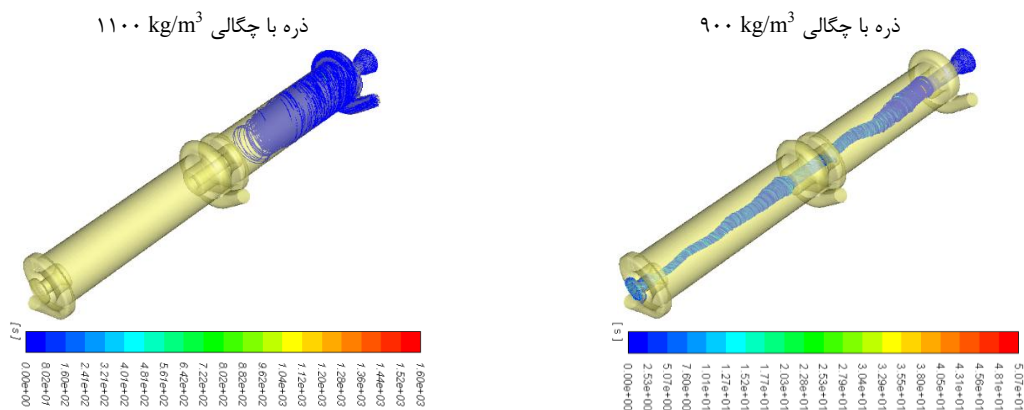
۱- طبق بررسی‌های به عمل آمده، تحقیق حاضر به احتمال زیاد نخستین بررسی شبه‌سازی سه فاز تری‌فلو در داخل و خارج کشور است که تا حد امکانات موجود به اعتبارسنجی هر چند محدود داده‌های آزمایشگاهی اقدام شده است و نتایج این تحقیق پایه و اساس تحقیقات تکمیلی بعدی در این زمینه خواهد بود. تأثیرات متقابل الگوی جریان در مراحل رافر و کلیتر یکی از تفاوت‌های بارز جداکننده دو مرحله‌ای تری‌فلو با سیکلون‌های واسطه سنگین است و در تحقیقات قبلی گزارش نشده است.



شکل ۱۲: خطای احتمال و انحراف به صورت تابعی از فشار محیطی

جدول ۵: مقادیر شدت جریان جرمی ذرات و موازنه تعداد ذرات فاز گسسته

Boundary	Stream	Mass Flow (kg/s)			Number
		Initial	Final	Change	
Escaped-Zone 5	Float	۰٫۱۷۰	۰٫۱۷۰	۰٫۰۰۰	۱۸۳۸۲
Escaped-Zone 6 + Zone 9	Sink	۰٫۰۵۲	۰٫۰۵۲	۰٫۰۰۰	۵۶۱۸
Net	Feed	۰٫۲۲۲	۰٫۲۲۲	۰٫۰۰۰	۲۴۰۰۰

شکل ۱۳: مسیر ذره با چگالی‌های 1100 kg/m^3 و 900 kg/m^3 پیش‌بینی‌شده به وسیله DPM

۳- با کاهش فشار محیطی، پارامترهای هد عملیاتی، نسبت جدایش واسطه و بازیابی واسطه (پارامترهای ماکروسکوپیک) به ترتیب 0.86% درصد کاهش، 1.96% و 1.52% درصد افزایش می‌یابد. کارایی جدایش جداکننده از نظر خطای احتمال با کاهش فشار محیطی، 1.23% درصد بهبود می‌یابد.

۲- میدان‌های جریان در یک جداکننده تری‌فلو در فشارهای محیطی مختلف متفاوتند. تغییرات فشار محیطی به طور عمده بر میدان‌های فشار و مولفه‌های سرعت تاثیر می‌گذارد. فشار اتمسفری تاثیر اندکی بر هسته هوا و سطح اشتراک بین هسته هوا و آب دارد.

- Mekhaïl, T. A. (2017). "Numerical study of the effect of changing the cyclone cone length on the gas flow field". *Applied Mathematical Modelling*, 46: 81-97.
- [11] Kozolub, P., Klimanek, A., Bialecki, R. A., and Adamczyk, W. P. (2017). "Numerical simulation of a dense solid particle flow inside a cyclone separator using the hybrid Euler-Lagrange approach". *Particology*, 31: 170-180.
- [12] Demir, S., Karadeniz, A., and Aksel, M. (2016) "Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones". *Powder Technology*, 295: 209-217.
- [13] Elsayed, K., and Lacor, C. (2014). "Analysis and Optimisation of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies". In *Turbulence and Interactions. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 125: 65-74.
- [14] Elsayed, K. (2015). "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure". *Powder Technology*, 269: 409-424.
- [15] Elsayed, K., and Lacor, C. (2010). "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop". *Chemical Engineering Science*, 65: 6048-6058.
- [16] Brar, L. S., and Elsayed, K. (2018). "Analysis and optimization of cyclone separators with eccentric vortex finders using large eddy simulation and artificial neural network". *Separation and Purification Technology*, 207: 269-283.
- [17] Vakamalla, T. R., Kumbhar, K. S., Gujjula, R., and Mangadoddy, N. (2014). "Computational and experimental study of the effect of inclination on hydrocyclone performance". *Separation and Purification Technology*, 138: 104-117.
- [18] Elsayed, K., and Lacor, C. (2013). "The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES". *Computers & Fluids*, 71: 224-239.
- [19] Elsayed, K., and Lacor, C. (2011). "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance". *Applied Mathematical Modelling*, 35: 1952-1968.
- [20] Chuah, T. G., Gimbin, J., and Choong, T. S. Y. (2006). "A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics". *Powder Technology*, 162(2): 126-132.
- [21] Azadi, M., Azadi, M., and Mohebbi, A. (2010). "A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters". *Journal of Hazardous Materials*, 182: 835-841.
- ۴- به طور کلی اثر فشار محیطی بر پارامترهای مختلف جداکننده تری‌فلو زیر ۲ درصد است، بنابراین فشار اتمسفری تأثیر اندکی بر جداکننده تری‌فلو دارد. از سوی دیگر، با توجه به این که با کاهش فشار محیطی، میدان‌های جریان و هسته هوای داخل جداکننده پایدار است، جداکننده قابلیت عملیاتی در شرایط مختلف دارد.
- ### ۶- مراجع
- [1] Aplan, F. F. (1985). "Gravity Concentration". In *SME Mineral Processing Handbook*, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 1: 1-52.
- [2] Babu, S. P., and Leonard, J. W. (1985). "Section 25: Coal". In *SME Mineral Processing Handbook*, Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, New York, 2: 1-31.
- [3] Leonard, J. W., and Hardinge, B. C. (1991). "Coal Preparation". 5th Edition, Maryland: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Colorado, 383-403.
- [4] Burt, R., and Mills, C. (1984). "Gravity Concentration Technology (Developments in Mineral Processing)". Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam, Netherlands, 162-178.
- [5] Ferrara, G., Machiavelli, G., Bevilacqua, P., and Meloy, T. (1994). "Tri-Flo: a multistage high-sharpness DMS process with new applications". *Minerals & Metallurgical Processing*, 11(2): 63-73.
- [6] Parvaz, F. S., Hosseini, H., Elsayed, K., and Ahmadi, G. (2018). "Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators". *Separation and Purification Technology*, 201: 223-237.
- [7] Luciano, R. D., Silva, B. L., Rosa, L. M., and Meier, H. F. (2018). "Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics". *Powder Technology*, 325: 452-466.
- [8] Juengcharoensukying, J., Poochinda, K., and Chalermisinsuwan, B. (2017). "Effects of Cyclone Vortex Finder and Inlet Angle on Solid Separation Using CFD Simulation". *Energy Procedia*, 138: 1116-1121.
- [9] Wei, J., Zhang, H., Wang, Y., Wen, Z., Yao, B., and Dong, J. (2017). "The gas-solid flow characteristics of cyclones". *Powder Technology*, 308: 178-192.
- [10] Hamdy, O., Bassily, M. A., El-Batsh, H. M., and

¹ Tri-Flo
² Computational Fluid Dynamics
³ Vakamalla
⁴ Large Eddy Simulation (LES)
⁵ Volume of Fluid (VOF)
⁶ Elsayed
⁷ Reynolds Stress Model (RSM)
⁸ Chuah
⁹ Eulerian– Lagrangian
¹⁰ Murthy
¹¹ Demir
¹² Kumar
¹³ Xu
¹⁴ Solidworks
¹⁵ Non-spherical drag law
¹⁶ Saffman's lift force
¹⁷ Pressure gradient force
¹⁸ Trapezoidal scheme
¹⁹ Turbulent dispersion
²⁰ Discrete Random Walk
²¹ partition curve
²² Offset
²³ Ecart probable
²⁴ Numeca/AutoMesh
²⁵ Euler number
²⁶ Discretization schemes
²⁷ Fluent
²⁸ Pressure– velocity coupling
²⁹ Pressure momentum
³⁰ Kinetic energy
³¹ Rate of kinetic energy dissipation
³² Courant–Friedrichs–Lewy (CFL)
³³ Courant number (C)
³⁴ Head
³⁵ Forced vortex
³⁶ Free vortex
³⁷ Rankine vortex

- [22] Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., and Ebrahimi, R. (2008). "Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder". Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 47(1): 128-137.
- [23] Murthy, Y. R., and Bhaskar, K. U. (2012). "Parametric CFD studies on hydrocyclone". Powder Technology, 230: 36-47.
- [24] Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Shams, M., and Rahimyan, M. H. (2010). "Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators". Advanced Powder Technology, 21: 435-442.
- [25] Demir, S., Karadeniz, A., and Aksel, M. (2016). "Effects of cylindrical and conical heights on pressure and velocity fields in cyclones". Powder Technology, 295: 209-217.
- [26] Kumar, A., and Brar, L. S. (2015). "CFD simulations of cyclone separators with different diameters: Analysis of gas cyclones with different cylinder diameters". In 2015 International Conference on Futuristic Trends on Computational Analysis and Knowledge Management, Noida, 180-185.
- [27] Ghodrat, M., Kuang, S. B., Yu, A. B., Vince, A., Barnett, G. D., and Barnett, P. J. (2013). "Computational Study of the Multiphase Flow and Performance of Hydrocyclones: Effects of Cyclone Size and Spigot Diameter". Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(45): 16019-16031.
- [28] Xu, Y., Song, X., Sun, Z., Tang, B., Li, P., and Yu, J. (2013). "Numerical Investigation of the Effect of the Ratio of the Vortex-Finder Diameter to the Spigot Diameter on the Steady State of the Air Core in a Hydrocyclone". Industrial & Engineering Chemistry Research, 52(15): 5470-5478.
- [29] Belardi, G., Bozano, P., Mencinger, J., Piller, M., and Schena, G. (2014). "Numerical simulation of water–air flow pattern in a tri-flo@cylindrical separator". Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 1-9.
- [30] Sharma, A. (2017). "Introduction to Computational Fluid Dynamics: Development, Application and Analysis". Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 194-215.
- [31] Chu, K. W., Wang, B., Yu, A. B., and Vince, A. (2012). "Particle scale modelling of the multiphase flow in a dense medium cyclone: Effect of vortex finder outlet pressure". Minerals Engineering, 31: 46-58.
- [32] Wang, B., Chu, K. W., Yu, A. B., and Vince, A. (2009). "Modeling the Multiphase Flow in a Dense Medium Cyclone". Industrial & Engineering Chemistry Research, 48(7): 3628-3639.



DOI: 10.30479/jmre.2019.10142.1232

Simulation of the Effect of Atmospheric Pressure on the Performance of Laboratory Two-Stage Dense Medium Separator

Dehghan R.^{1*}, Aghaei M.²

1- Assistant Professor, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
rdehghans@yazd.ac.ir

2- Ph.D Student, Dept. of Mining and Metallurgical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
aghaei.m.mohsen@stu.yazd.ac.ir

(Received: 19 Feb. 2019, Accepted: 20 May 2019)

Abstract: The effects of atmospheric pressure of the site of installation of a centrifugal two-stage heavy medium separator is of crucial importance because the pressure difference between the medium input and the sink output streams is adjusted by the back pressure rings. However, contrary to the dense medium cyclone, the raw feed ore into this separator is sluiced without pumping. In this research, the effect of atmospheric pressure on the flow pattern inside the Tri-Flo separator is investigated using the computational fluid dynamic (CFD) simulation. Therefore, the volume of fluid (VOF) model and discrete phase model (DPM) were used for the calculation of the diameter of the air core and the behavior of solid particles, respectively. Reynolds stress model (RSM) was used for turbulence modeling. Simulations were performed in three different atmospheric pressure including 1, 0.86 and 0.64 atm, representing the site of installation at sea level and heights of 1250 meters and 3500 meters above the sea level, respectively. The CFD simulation results showed that the change in atmospheric pressure has some effects on the flow fields, macroscopic parameters and the performance of the Tri-Flo separator. The results of simulation were validated against the experimental data achieved using the transparent laboratory Tri-Flo separator. The fluid velocity in output streams and the size and the pattern of air core were used for validation. The decrease in Ecart propale error (Ep) of the separator and increase in the medium recovery were observed, when the atmospheric pressure was decreased. However, the effects were in the margin of 2%. According to the results of this research, the Tri-Flo separator can be used in different elevations from the sea level, without serious problem in the operation regime.

Keywords: CFD simulation, Atmospheric pressure, Discrete phase model (DPM), Dense medium separation (DMS).

INTRODUCTION

Dense-medium cylindrical separators are extensively used for mineral processing and coal preparation. These separators offer a more precise separation in comparison with the other types of gravity separators. The centrifugal two-stage heavy medium separator comprises two Dynawhirpool separators in series. The

medium enters the separator from the medium inlet ports under constant pressure. Heavier particles migrate toward the wall of the separator and exit from the upper tangential outlet of sink. The light product discharge from the float port. The flow in a centrifugal two-stage heavy medium separator is very complicated due to the presence of swirling turbulence, an air core and particle segregation. It involves multiple phases including the water, air, magnetite and coal particles having different densities, sizes and other properties. Therefore, the efficient mathematical models are needed for the study and the prediction of the flow behaviour inside the separators. The past few years have seen remarkable progress in the CFD-based numerical modelling of the classification cyclones and DMCs [1-3]. Belardi et al. simulated the flow field in a two-stage cylindrical cyclone, using the RSM turbulence model and VOF multiphase model and they calculated the velocity field in the separator. In that research, the air core interface formed in the internal axis of the cylindrical sections was also identified and illustrated [4]. There are not, however, computational investigations in the literature related to the effect of atmospheric pressure on the centrifugal two-stage heavy medium separator. Considering the more complex geometry of this separator in comparison with DMC and classifying cyclone, the CFD simulation is assumed to be an effective tool for better understanding of separator behaviour.

METHODS

An experimental setup including a two-stage cylindrical separator that was made of transparent Plexiglas and the complementary components such as two tanks, pumps and instruments were manufactured to perform the physical experiments. The medium (water) in the polyethylene tanks was pumped by the centrifugal pumps into the cylindrical separator through medium inlets. The medium flows were adjusted by the control valves. The air core pattern and size were recorded using a high speed camera. In simulation studies, the effect of atmospheric pressure on the flow pattern of the separator was evaluated in three levels (1, 0.86 and 0.64 atm). The current computational model is based on a 3D geometry. In the simulations, uniform velocity boundary condition is used for the medium inlets. In feed and float outlets, the atmospheric pressure with an air volume fraction of 1 is applied. This enables the simulation to generate the air-core by suction of the air from these outlets. The velocity and pressure coupling was selected using NITA (Non-Iterative Time Advancement) and fractional step scheme. The PRESTO (Pressure Staggering Option), a pressure interpolation scheme reported to be useful for predicting the highly swirling flow characteristics prevailing inside the separator, was adopted. The second order upwind scheme was used to calculate the momentum, turbulence dissipation, and Reynolds stresses. The residuals was set at 10^{-5} for all equations. The time step was selected as 1.3×10^{-4} for all simulations. The simulation process continued until the mean pressure drop and air core geometry did not change significantly with more iterations.

FINDINGS AND ARGUMENT

It is necessary to ascertain the validities of the accuracy of the mathematical models and solution methods used in this study. To this end, the simulation and experimental results are compared. The output velocities at sink and float streams, and the diameter and shape of the air core were used for validation. the deviation of the simulation results is about 6% or less and the output velocities were simulated precisely. there is a good agreement between the air core pattern in experimental condition and simulation. The deviation of the air core size in the first and second stages were 4.3% and 5.2%, respectively.

The flow pattern inside the separator is as follows: An outer layer of water that flows upward along the wall and surrounds a water that flows downward, which in turn encompasses a downward air core. With decreasing the atmospheric pressure from 1 atm to 0.64 atm, the medium recovery and the flow split ratio 1.96% and 1.52% were increased, respectively. One of the results of CFD simulation was the reduction in pressure drop and Euler number with increasing the internal tubes diameter. One of the results of CFD simulation was the reduction in head with decreasing the atmospheric pressure at rougher stage of the separator (Figure 1).

The tangential velocity increases radially toward the separator wall. In vicinity of the separator wall, the tangential velocity decreases from inlet toward outlet in each stage. Results show that there exists a pressure gradient along the radial direction and the pressure decreases from the wall toward the centre line. In general, the separation mechanism can be explained logically based on the flow dynamics. The balance

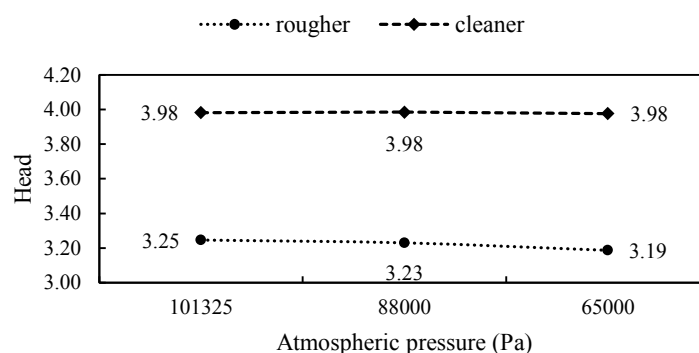


Figure 1. Head in rougher and cleaner stages under different atmospheric pressure

between pressure gradient force and centrifugal force on each particle determine the pathway of the particle into the sink or the float stream. The particle reports to the float stream when the pressure gradient force is larger.

Figure 2 shows the E_p and offset of the centrifugal two-stage heavy medium separator. the E_p decreases with decreasing the atmospheric pressure.

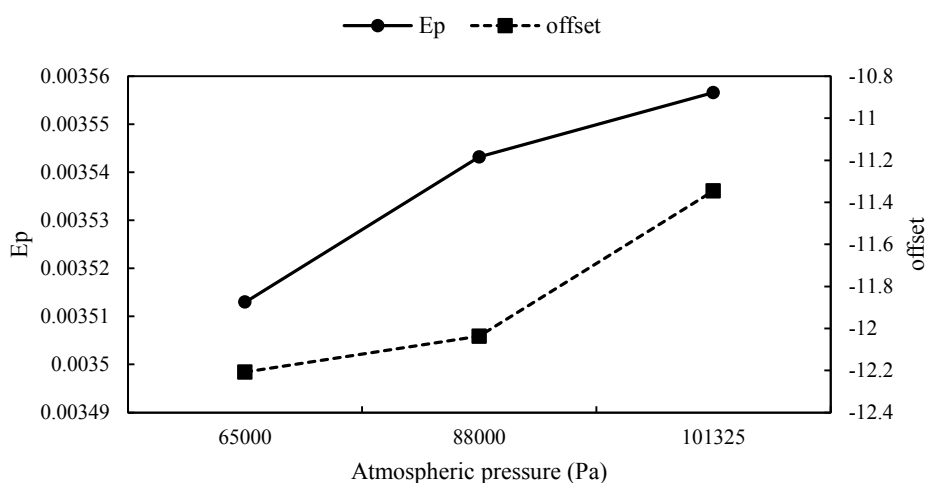


Figure 2. E_p and offset under different atmospheric pressure

CONCLUSIONS

A computational fluid dynamics simulation of the centrifugal two-stage heavy medium separator was carried out using the RSM and VOF models to investigate the effect of the atmospheric pressure. To our knowledge, this is the first report of the effects of the atmospheric pressure on the separator behaviour using three dimensional CFD simulation. A CFD model of separator was developed and validated against experimental data. The evidence from this study suggests that a two-way vortex flow forms in the separator: an initial external spiral flows upward and is discharged through sink ports. The back flow medium from the upper part of the separator forms a secondary internal downward spiral and is discharged through the float port. The lower atmospheric pressure leads to decreased E_p , and at the same time an increased medium recovery, the flow split ratio and offset. 1.23% reduction in E_p was observed when the atmospheric pressure was decreased from 1.0 atm to 0.64 atm.

REFERENCES

- [1] Parvaz, F. S., Hosseini, H., Elsayed, K., and Ahmadi, G. (2018). "Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators". Separation and Purification Technology, 201: 223-237.

- [2] Luciano, R. D., Silva, B. L., Rosa, L. M., and Meier, H. F. (2018). "Multi-objective optimization of cyclone separators in series based on computational fluid dynamics". Powder Technology, 325: 452-466.
- [3] Juengcharoensukying, J., Poochinda, K., and Chalermisinsuwan, B. (2017). "Effects of Cyclone Vortex Finder and Inlet Angle on Solid Separation Using CFD Simulation". Energy Procedia, 138: 1116-1121.
- [4] Belardi, G., Bozano, P., Mencinger, J., Piller, M., and Schena, G. (2014). "Numerical simulation of water-air flow pattern in a tri-flo cylindrical separator". Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 1-9.