

بررسی اثر اصلاحات هندسی هیدروسیکلون بر عملکرد جداسازی ذرات با استفاده از شبیه سازی CFD-DPM

نیلوفر یوسفی زوج^۱، صادق نیک بخت ناصر آباد^۲، حیدر هاشمی^۳

niloufar.yousefizoj@stu.yu.ac.ir

^۱ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران.

s.nikbakht@yu.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، گروه مهندسی انرژی، دانشکده نفت و گاز گچساران، دانشگاه یاسوج، گچساران، ایران.

heidar.hashemi63@gmail.com

^۳ گروه کشوری مهندسی مکانیک، واحد یاسوج، دانشگاه آزاد اسلامی، یاسوج، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۰

چکیده

در این مقاله، عملکرد یک هیدروسیکلون با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل فاز گسسته برای پیش بینی مسیر و سرنوشت ذرات جامد بررسی شده است. سیال کاری شامل آب مخلوط با پودر فرومغناطیس با چگالی مؤثر ۲۸۵۰ kg/m^3 بوده و ذرات جامد شامل مس با چگالی ۴۰۰۰ kg/m^3 و سنگ با چگالی ۱۸۰۰ kg/m^3 و قطر ۲۵ میلی متر در هیدروسیکلون تزریق شده است. نتایج مدل پایه نشان داد که تمام ذرات مس مطابق پیش بینی از خروجی پایی دفع می شوند، اما بخشی از ذرات سنگ به دلیل چگالی کمتر از سیال تحتانی، در ناحیه جریان گیر افتاده و مقدار قابل توجهی از آنها از خروجی بالایی خارج می گردند که امری نامطلوب در فرآیند جداسازی است. به منظور بهبود عملکرد، اصلاحات هندسی شامل افزایش طول لوله خروجی بالایی، مستطیلی سازی مقطع ورودی در عین ثابت نگه داشتن قطر هیدرولیکی، و افزایش طول بخش مخروطی اعمال شده است. نتایج پس از اصلاح هندسه با تزریق تعداد بیشتر ذرات (۱۳۹۸ مس و به همین میزان سنگ) نشان داد که جداسازی ذرات سنگ به طور محسوسی بهبود یافته است؛ تعداد ذرات خروجی از دهانه بالایی حدود ۳ درصد کاهش یافت و سهم ذرات سنگی که از خروجی پایی دفع شدند حدود ۴۰-۵۰ درصد نسبت به حالت پایه افزایش پیدا کرد. این نتایج نشان می دهد که افزایش طول خروجی بالایی و بهینه سازی هندسه ورودی و مخروطی می تواند موجب تقویت میدان گردابه ای و افزایش نرخ غرق شدگی ذرات کم چگال تر گردد.

واژه های کلیدی: جداسازی، هیدروسیکلون، هندسه، دینامیک سیالات محاسباتی، مدل فاز گسسته، پودر فرومغناطیس.

۱. مقدمه

جداسازی ذرات جامد پخش شده از یک فاز سیال، یکی از عملیات های واحد اساسی در بسیاری از شاخه های مهندسی جداسازی مکانیکی به شمار می رود و نقش کلیدی در صنایع معدنی، متالورژی، فرآوری مواد، نفت و صنایع شیمیایی ایفا می کند. این فرآیند معمولاً با هدف تغلیظ، طبقه بندی یا حذف ذرات ناخواسته از سیال انجام می شود و انتخاب تجهیز مناسب تأثیر مستقیمی بر بازده فرآیند و هزینه های عملیاتی دارد. برای انجام این نوع جداسازی، تجهیزاتی نظیر فیلترها، سانتریفوژها و هیدروسیکلون ها مورد استفاده قرار می گیرند که هر یک دارای مزایا و محدودیت های خاص خود هستند. یکی از راهکارهای مؤثر برای کاهش این محدودیت ها، افزایش نیروی گریز از مرکز از طریق اصلاح طراحی هندسی هیدروسیکلون است. تغییر ابعاد اجزایی نظیر دهانه ورودی، لوله خروجی بالایی، زاویه مخروط و قطر دهانه خروجی پایینی می تواند نقش قابل توجهی در بهبود میدان جریان و افزایش راندمان جداسازی ایفا کند. در این راستا، شبیه سازی عددی به عنوان ابزاری مناسب برای ارزیابی تأثیر این اصلاحات مورد استفاده قرار می گیرد.

موتسامای [۱] در پژوهشی با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر پارامترهای هندسی و شرایط جریان هیدروسیکلون را بر عملکرد جداسازی ذرات بررسی کرد. نتایج نشان داد که پارامترهایی مانند قطر دهانه خروجی پایینی، قطر لوله جمع کننده گردابه و چگالی سیال نقش تعیین کننده ای در افزایش راندمان و بهبود کارایی جداسازی ذرات دارند و می توان از آن ها برای بهینه سازی هندسه و طراحی هیدروسیکلون استفاده کرد. دلگادیو و راجامانی [۲] با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، تأثیر هندسه ورودی و ابعاد کلی هیدروسیکلون را بر رفتار جریان و راندمان جداسازی ذرات بررسی کردند. آن ها هندسه های مختلف ورودی را مقایسه کرده و نشان دادند که ورودی مستطیلی باعث شکل گیری جریان چرخشی پایدارتر و در نتیجه افزایش راندمان جداسازی نسبت به ورودی دایره ای می شود. ناراسیما و همکاران [۳] با به کارگیری روش

شبیه سازی گردابه های بزرگ، ساختار جریان آشسته و مشخصات هسته هوای مرکزی در هیدروسیکلون را بررسی کردند. نتایج نشان داد که این روش قادر است قطر، شکل و نوسانات هسته هوا را با دقت بالاتری نسبت به مدل های آشفتگی متداول پیش بینی کند. وانگ و یو [۴] اثر تغییر ابعاد بدنه هیدروسیکلون بر اندرکنش جریان سیال و ذرات جامد را با روش عددی بررسی کردند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش نسبت طول به قطر بخش استوانه ای موجب افزایش زمان ماند ذرات و در نتیجه بهبود جداسازی ذرات ریز می شود. مارتینز و همکاران [۵] طول لوله خروجی بالایی را به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی هندسی مطالعه کردند. نتایج شبیه سازی نشان داد که افزایش طول این لوله تا مقدار بهینه باعث کاهش عبور مستقیم ذرات به خروجی بالایی و افزایش دقت جداسازی می شود، در حالی که افزایش بیش از حد آن اثر معکوس دارد. ماهات و همکاران [۶] با استفاده از شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، اثر قطر بخش استوانه ای هیدروسیکلون بر جداسازی ذرات ریز را بررسی کردند و نشان دادند که افزایش قطر بخش استوانه ای راندمان جداسازی ذرات ۵ میکرونی را از ۳۴/۴٪ به ۴۴/۳٪ افزایش می دهد. تیامساکول و همکاران [۷] پارامترهای هندسی هیدروسیکلون را برای جداسازی میکروپلاستیک ها از آب تحلیل کردند و دریافتند که طراحی بهینه موجب افزایش بازیابی ذرات و بهبود راندمان جداسازی می شود. وانگ و همکاران [۸] اثر زاویه تماس ذرات هیدروفوبیک بر جداسازی ذرات ریز را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که افزایش زاویه تماس، راندمان جداسازی را از ۶۹/۶٪ به ۷۶/۷۱٪ ارتقا می دهد. جیانگ و همکاران [۹] اثر قطر بخش ثانویه استوانه ای بر ساختار جریان و راندمان جداسازی هیدروسیکلون را بررسی کردند و مشاهده نمودند که تغییر قطر بخش ثانویه می تواند ساختار جریان و راندمان جداسازی را بهبود دهد. تیامساکول و همکاران [۱۰] اثر اندازه هیدروسیکلون بر جداسازی میکروپلاستیک ها را با شبیه سازی CFD مطالعه کردند و دریافتند که کاهش ابعاد هیدروسیکلون باعث افزایش بازیابی ذرات PS و PET می شود. پوکله و همکاران [۱۱] تأثیر ناهمواری دیواره داخلی

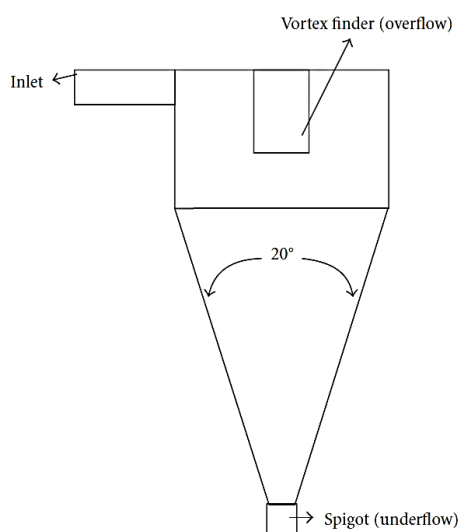
هیدروسیکلون را بر جریان و جداسازی ذرات بررسی کردند و نشان دادند که افزایش ناهموازی دیواره، بازیابی ذرات در خروجی پایینی را بهبود می‌بخشد. دای و همکاران [۱۲] حرکت و جداسازی میکروپلاستیک‌ها در هیدروسیکلون کوچک دو مخروطی را تحلیل کردند و دریافتند که افزایش سرعت ورودی موجب افزایش راندمان جداسازی ذرات کم‌چگال تا حدود ۹۸/۵۱٪ می‌شود. رزمی و همکاران [۱۳] شبیه‌سازی CFD از عملکرد هیدروسیکلون صنعتی را با روش چندفازی ذره در سلول انجام دادند و نشان دادند که پارامترهای طراحی و عملیاتی مانند زاویه مخروط و فشار ورودی تأثیر قابل توجهی بر توزیع ذرات و کارایی جداسازی دارند؛ نتایج آن‌ها به درک بهتر تعامل بین جریان پاره‌ای و سیال کمک کرده است. کانگ و همکاران [۱۴] در مقاله‌ای مدل‌های آشفتگی و روش‌های شبیه‌سازی را برای هیدروسیکلون ۷۵ میلی‌متری مقایسه کردند و دریافتند که استفاده از مدل‌های LES و RSM می‌تواند در پیش‌بینی ساختار جریان و رفتار ذرات دقت و پایداری بیشتری نسبت به مدل‌های ساده‌تر داشته باشد، که نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مدل مناسب برای شبیه‌سازی دقیق‌تر است. ژانگ و همکاران [۱۵] با استفاده از CFD جریان در هیدروسیکلون چندمنظوره و عملکرد جداسازی آن را بررسی کردند و گزارش دادند که میدان سرعت و فشار، توزیع ذرات و خروج آن‌ها از بخش‌های مختلف دستگاه رابطه مستقیمی با پارامترهای هندسی دارد که می‌تواند برای طراحی بهینه مورد استفاده قرار گیرد. ونکوئتش و همکاران [۱۶] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، اثر اصلاح پارامترهای هندسی هیدروسیکلون را بر عملکرد جداسازی بررسی کردند و نشان دادند که بهینه‌سازی هندسه با تقویت گردابه پایدار و کاهش اختلاط جریان، راندمان جداسازی را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. شیانگ‌شی شو و همکاران [۱۷] یک نوع جدید هیدروسیکلون دومرحله‌ای ستون-مخروط را با CFD شبیه‌سازی کردند و دریافتند که این ساختار جدید با افزایش فشار ساکن دیواره (حدود ۱۱٪)، افزایش سرعت مماسی و بهبود انتقال ذرات، راندمان جداسازی و کاهش اندازه برش را بهبود می‌دهد. لی و همکاران [۱۸] در مقاله‌ای بهینه‌سازی

عملکرد هیدروسیکلون با ورودی‌های پیچیده منحنی پرداختند، که تحلیل میدانی جریان و ذرات نشان داد پیکربندی ورودی می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر الگوی جریان داخلی و جداسازی داشته باشد. هو و همکاران [۱۹] با بررسی پیکربندی‌های هندسی مختلف هیدروسیکلون، نشان دادند که اصلاح ساختار دستگاه تأثیر مستقیمی بر میدان جریان، پایداری گردابه و مسیر حرکت ذرات دارد و می‌تواند دقت و راندمان جداسازی را به‌طور محسوسی بهبود دهد. دسادا سیلوا و همکاران [۲۰] در یک مطالعه مروری جامع، اثر متغیرهای عملیاتی و هندسی هیدروسیکلون را بر راندمان جداسازی و مصرف انرژی بررسی کردند و نشان دادند که بهینه‌سازی هم‌زمان این پارامترها با بهره‌گیری از شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند راندمان جداسازی را تا حدود ۷٪ افزایش داده و مصرف انرژی را کاهش دهد. پانندی و همکاران [۲۱] با انجام بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای هندسی سیکلون به کمک شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و الگوریتم‌های ژنتیک، نشان دادند که اصلاح هم‌زمان هندسه ورودی، بدنه و خروجی می‌تواند به‌طور مؤثر راندمان جداسازی را افزایش داده و افت فشار را کنترل کند. سردار و همکاران [۲۲] اثر سرعت ورودی و اندازه ذرات بر عملکرد جداسازی هیدروسیکلون را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت ورودی راندمان جداسازی ذرات درشت را بهبود می‌بخشد، اما باعث افزایش عبور ذرات ریز می‌شود. وانگ و همکاران [۲۳] با بهینه‌سازی چندهدفه هندسه هیدروسیکلون به کمک روش سطح پاسخ و شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی، جداسازی ذرات ریز را مورد مطالعه قرار دادند. طراحی بهینه منجر به افزایش ۸٪ راندمان جداسازی ذرات ریز و کاهش ۱۲٪ افت فشار شد. لی و همکاران [۲۴] اثر قطر و شکل لوله خروجی بالایی بر عملکرد هیدروسیکلون را با شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی بررسی کردند. کاهش قطر و استفاده از شکل مخروطی لوله خروجی باعث کاهش عبور ذرات و بهبود راندمان جداسازی شد. ژانگ و همکاران [۲۵] جداسازی ذرات در هیدروسیکلون با طراحی جدید ورودی مارپیچی را بررسی کردند. طراحی ورودی مارپیچی باعث توزیع

کلیدی ترین پارامترهای تاثیر گذار در مسئله، نشان داد که اصلاح هندسه و بهینه سازی پارامترها می تواند راندمان جداسازی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

۲. توصیف هندسه هیدروسیکلون شبیه سازی شده

هیدروسیکلون مورد بررسی در این پژوهش بر اساس یک مدل پایه با هندسه مشخص طراحی شده، که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این هیدروسیکلون شامل یک لوله ورودی است که به صورت مماسی به بخش استوانه ای متصل شده و جریان ورودی را به صورت مارپیچی وارد دستگاه می کند. استفاده از ورودی مماسی با هدف کاهش آشفتگی ناشی از برخورد جریان ورودی با جریان درون استوانه و افزایش بازده عملکردی هیدروسیکلون صورت گرفته است. بخش استوانه ای هیدروسیکلون نقش مهمی در شکل گیری میدان گردابه ای اولیه ایفا می کند، در حالی که بخش مخروطی با ایجاد افزایش تدریجی نیروی گریز از مرکز، فرآیند جداسازی ذرات را تقویت می نماید. هدف اصلی این هیدروسیکلون، جداسازی ذرات مس از ذرات سنگ با استفاده از اختلاف چگالی و اثر نیروهای گریز از مرکز است. در شرایط ایده آل، ذرات سنگین تر مس باید از طریق خروجی پایین^۱ خارج شوند.



شکل ۱. شماتیک هندسه هیدروسیکلون

در حالی که ذرات سبک تر سنگ به همراه فاز سیال از خروجی بالا^۲ دفع گردند. نتایج عملی و شبیه سازی های اولیه

یکنواخت تر جریان و کاهش تلاطم شد و راندمان جداسازی تا ۱۵٪ افزایش یافت. ژائو و همکاران [۲۶] از شبکه های عصبی عمیق برای بهینه سازی طراحی هیدروسیکلون بر اساس داده های دینامیک سیالات محاسباتی استفاده کردند. مدل هوش مصنوعی قادر بود طرح هایی با راندمان بالای جداسازی را با کاهش ۹۰٪ زمان محاسباتی پیش بینی کند.

برای کنترل این رفتار نامطلوب، در برخی مطالعات پیشین تلاش شده است با تغییر چگالی سیال کاری، مسیر حرکت ذرات کنترل شود. هرچند این روش تا حدی موجب کاهش خروج ذرات مس از دهانه بالا شده است، اما به طور هم زمان باعث افزایش خروج ذرات سنگ از خروجی پایین شده و در نتیجه، جداسازی مطلوب حاصل نگردیده است. این مسئله نشان می دهد که صرف تغییر خواص سیال، بدون در نظر گرفتن هندسه دستگاه و ساختار جریان، نمی تواند راهکاری مؤثر برای بهبود عملکرد هیدروسیکلون باشد. از این رو، مسئله اصلی این پژوهش، شناسایی و تحلیل پارامترهای هندسی و شرایط جریان مؤثر بر عملکرد جداسازی در هیدروسیکلون می باشد. بررسی دقیق میدان جریان، مسیر حرکت ذرات و نقاط بحرانی جداسازی برای دستیابی به هندسه ای بهینه که بتواند بای پس ذرات ناخواسته از هر دو خروجی را به حداقل برساند، ضروری است. انجام چنین مطالعه ای به صورت تجربی مستلزم صرف هزینه و زمان قابل توجهی است، به ویژه در حالتی که نیاز به بررسی هم زمان چندین پارامتر هندسی و عملیاتی وجود دارد. در این پژوهش، به منظور بهبود عملکرد جداسازی هیدروسیکلون، شبیه سازی عددی جریان سیال و حرکت ذرات با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی و مدل فاز گسسته انجام شده است. هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر اصلاحات هندسی بر میدان جریان و رفتار ذرات با چگالی های متفاوت و در نهایت کاهش عبور ناخواسته ذرات از هر دو خروجی بالایی و پایینی هیدروسیکلون می باشد. نتایج این تحقیق می تواند راهکارهایی عملی برای بهینه سازی طراحی هیدروسیکلون ها و افزایش راندمان جداسازی در کاربردهای صنعتی ارائه دهد. در واقع این پژوهش با در نظر گرفتن

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |V_f - V_p|}{\mu} \quad (3)$$

که در آن ρ_f چگالی سیال است. مقدار عدد رینولدز ذره نقش تعیین کننده‌ای در شدت نیروی مقاوم سیال و در نتیجه رفتار جداسازی ذرات ایفا می‌کند. بر اساس روابط فوق، افزایش سرعت مماسی جریان یا افزایش اختلاف چگالی بین ذره و سیال موجب افزایش نیروی گریز از مرکز و بهبود جداسازی ذرات سنگین می‌شود، در حالی که ذرات ریز یا ذرات با چگالی نزدیک به چگالی سیال، تحت تأثیر نیروی مقاوم، تمایل بیشتری به خروج از دهانه بالایی دارند. از این رو، اصلاح هندسه هیدروسیکلون با هدف کنترل توزیع سرعت مماسی و ایجاد تعادل مناسب بین نیروهای حاکم، نقش کلیدی در افزایش راندمان جداسازی ایفا می‌کند.

این تحلیل مسیر یک ذره فاز گسسته را با انتگرال‌گیری از تعادل نیرو بر ذره، که در یک چارچوب مرجع لاگرانژی نوشته شده است، پیش‌بینی می‌کند. در روش لاگرانژی، مشخصات هر ذره سیال در طول ردیابی مورد توجه است و معادلات برای هر ذره به‌طور جداگانه تنظیم می‌شوند.

$$u(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{\partial X(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t} \quad (4)$$

$$v(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{\partial Y(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t} \quad (5)$$

$$w(x_0, y_0, z_0, t) = \frac{\partial Z(x_0, y_0, z_0, t)}{\partial t} \quad (6)$$

این موازنه نیرو، اینرسی ذره را با نیروهای وارد بر ذره برابر می‌کند و می‌تواند (برای جهت x در مختصات دکارتی) به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (7)$$

در این رابطه عبارت اول در سمت راست نیروی درگ بر روی ذره در واحد جرم ذره، جمله دوم اثر گرانش بر ذره و F_x سایر نیروهایی می‌باشد که ممکن است بر ذره وارد شود.

نشان می‌دهد که بخشی از ذرات مس بر خلاف انتظار از خروجی بالایی خارج می‌شوند که این پدیده منجر به کاهش کارایی فرآیند جداسازی و افت کیفیت محصول نهایی می‌گردد.

در این راستا، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی به‌عنوان ابزاری کارآمد و اقتصادی، امکان بررسی اثر تغییرات هندسی و شرایط جریان را فراهم می‌سازد. شبیه‌سازی عددی این فرآیند نه تنها امکان تحلیل دقیق ساختار جریان و رفتار ذرات را فراهم می‌کند، بلکه بستری مناسب برای انجام مطالعات پارامتری و بهینه‌سازی طراحی هیدروسیکلون بدون نیاز به آزمایش‌های پرهزینه فراهم می‌آورد. مکانیزم اصلی جداسازی در هیدروسیکلون مبتنی بر ایجاد جریان چرخشی و اعمال نیروی گریز از مرکز بر ذرات معلق در سیال است. ذره‌ای با جرم m که با سرعت مماسی V_θ در فاصله شعاعی r از محور دوران حرکت می‌کند، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز مطابق رابطه ۱ قرار می‌گیرد:

$$F_C = \frac{m V_\theta^2}{r} \quad (1)$$

این نیرو سبب رانده شدن ذرات با جرم و چگالی بالاتر به سمت دیواره داخلی هیدروسیکلون می‌شود. در مقابل، ذرات در حین حرکت در سیال تحت تأثیر نیروی مقاوم سیال قرار دارند که برای جریان آرام اطراف ذرات کروی به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$F_d = 3\pi\mu d_p(V_f - V_p) \quad (2)$$

که در آن μ ویسکوزیته دینامیکی سیال، d_p قطر ذره، V_f سرعت سیال و V_p سرعت ذره است. این نیرو تمایل دارد ذرات را در راستای خطوط جریان سیال نگه دارد و از حرکت شعاعی آن‌ها جلوگیری کند.

مسیر نهایی حرکت ذره و محل خروج آن از هیدروسیکلون، حاصل تعادل بین نیروی گریز از مرکز و نیروی مقاوم سیال است. برای توصیف رژیم حرکتی ذرات و میزان بهره‌مکنش آن‌ها با سیال، عدد رینولدز ذره به‌صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود:

۳. اصول طراحی بر اساس هندسه مبنا

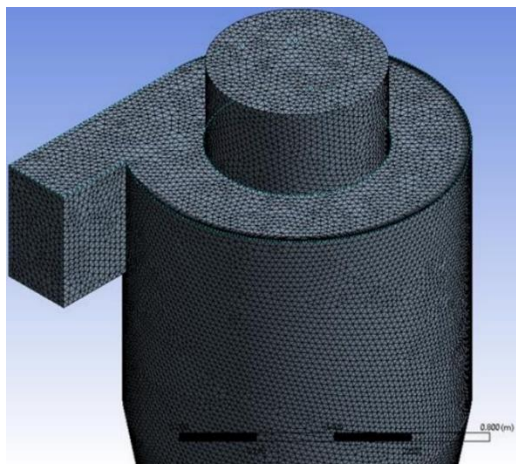
هیدروسیکلون‌ها به عنوان تجهیزات رایج در فرآیندهای جداسازی صنعتی، عملکرد خود را بر پایه جریان چرخشی و نیروهای گریز از مرکز بنا می‌کنند. جداسازی ذرات عمدتاً بر اساس اختلاف چگالی و اندازه انجام می‌شود و هندسه دستگاه و ویژگی‌های جریان سیال نقش مهمی در کارایی آن دارند. عدم جداسازی کامل ذرات با ارزش از سنگ‌های کم‌ارزش منجر به اتلاف منابع و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود؛ بنابراین بهبود دقت جداسازی در مراحل اولیه فرآیند اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقاله مرجع، برای تحلیل رفتار جریان و مسیر حرکت ذرات، از شبیه‌سازی عددی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی همراه با مدل فاز گسسته استفاده شده است. سیال کاری شامل آب مخلوط با پودر فرومغناطیس با چگالی مؤثر 2850 kg/m^3 کیلوگرم بر متر مکعب بود تا جداسازی ذرات با چگالی متفاوت دقیق‌تر بررسی شود. ذرات جامد در دو گروه تعریف شدند: ذرات مس با چگالی 4000 kg/m^3 و ذرات سنگ با چگالی 1800 kg/m^3 ، هر دو با قطر 25 mm میلی‌متر. در مدل پایه، 1114 ذره از هر نوع به داخل هیدروسیکلون تزریق شد و مسیر حرکت، نواحی تمرکز و محل خروج آن‌ها تحلیل گردید. نتایج نشان داد ذرات مس به دلیل چگالی بالاتر، تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز بیشتر قرار گرفته و به طور کامل از خروجی پایینی خارج شدند. در مقابل، بخشی از ذرات سنگ در جریان مرکزی گرفتار شده و از خروجی بالایی خارج شدند؛ به طوری که از 1114 ذره سنگ، 137 ذره دفع شدند که نشان‌دهنده کاهش کارایی برای ذرات کم‌چگالی است. تحلیل بیشتر نشان داد این رفتار با هندسه هیدروسیکلون و شرایط جریان مرتبط است. پارامترهایی مانند قطر خروجی‌ها و چگالی سیال، شدت میدان چرخشی، توزیع سرعت و احتمال فرار یا غرق شدن ذرات را تعیین می‌کنند. نتیجه نهایی مقاله این است که اصلاح هندسه و بهینه‌سازی پارامترها می‌تواند راندمان جداسازی را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

۴. اصلاحات هندسی و بهبود عملکرد هیدروسیکلون

هیدروسیکلون‌ها از تجهیزات کلیدی در جداسازی ذرات جامد بر اساس چگالی و اندازه هستند و در صنایع معدنی و شیمیایی کاربرد وسیعی دارند. با این حال، در هندسه پایه، بخشی از ذرات کم‌چگال از خروجی بالایی فرار کرده و راندمان فرآیند کاهش می‌یابد. اصلاح هندسی دستگاه، راهکار کم‌هزینه و مؤثری برای بهبود عملکرد محسوب می‌شود. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار انسیس، ابتدا عملکرد هیدروسیکلون پایه با سیال سنگین چگالی 2850 kg/m^3 و دو نوع ذره شامل مس 4000 kg/m^3 و سنگ 1800 kg/m^3 بررسی شد. نتایج نشان داد که تمامی ذرات مس از خروجی پایینی خارج می‌شوند، اما حدود 12% ذرات سنگ از خروجی بالایی فرار کردند و سایر ذرات در جریان مرکزی محصور شدند. برای بهبود عملکرد، چهار اصلاح هندسی اعمال شد:

۱. مستطیلی‌سازی ورودی با حفظ قطر هیدرولیکی $255/0$ متر، برای افزایش مؤلفه مماسی سرعت و کاهش مناطق جریان مرده.
 ۲. افزایش قطر بخش استوانه‌ای از $8/0$ به $9/0$ متر، برای گسترش ناحیه چرخش قوی و تقویت جداسازی ذرات سبک.
 ۳. افزایش طول بخش مخروطی از $5/0$ به $65/0$ متر، برای افزایش زمان ماند ذرات و کاهش فرار ذرات به محور مرکزی.
 ۴. افزایش طول خروجی بالایی، برای کاهش مکش گردابه‌ای و افزایش پایداری جریان مرکزی.
- در هندسه اصلاح شده، تمامی ذرات مس همچنان از خروجی پایین خارج شدند و درصد ذرات سنگ فرار از خروجی بالا به $1/9\%$ کاهش یافت. علاوه بر این، حدود $35\%-40\%$ ذرات سنگ موفق به خروج از دهانه پایین شدند، در حالی که در هندسه پایه این مقدار نزدیک صفر بود. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب این اصلاحات هندسی بدون تغییر شرایط مرزی جریان موجب افزایش پایداری گردابه، کاهش ناحیه کم‌فشار مرکزی، افزایش شدت چرخش در نزدیکی دیواره و ارتقای

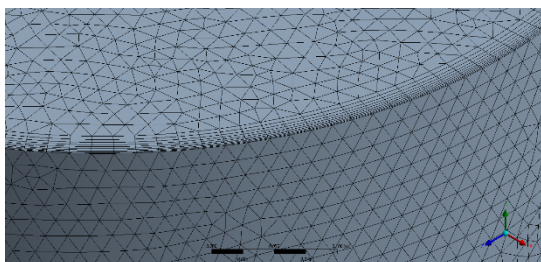
با پردازنده قوی استفاده شده مدت زمان هر حل ۱ ساعت می باشد.



شکل ۲. هندسه سه بعدی هیدروسیکلون و شبکه بندی محاسباتی

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
☐ Element Size	1.8e-002 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	0.6
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
☐ Min	2.4256e-004
☐ Max	0.99454
☐ Average	0.19489
☐ Standard Deviation	0.12742
Inflation	
Advanced	
Statistics	
☐ Nodes	244958
☐ Elements	808268

شکل ۳. جزئیات شبکه بندی محاسباتی هیدروسیکلون



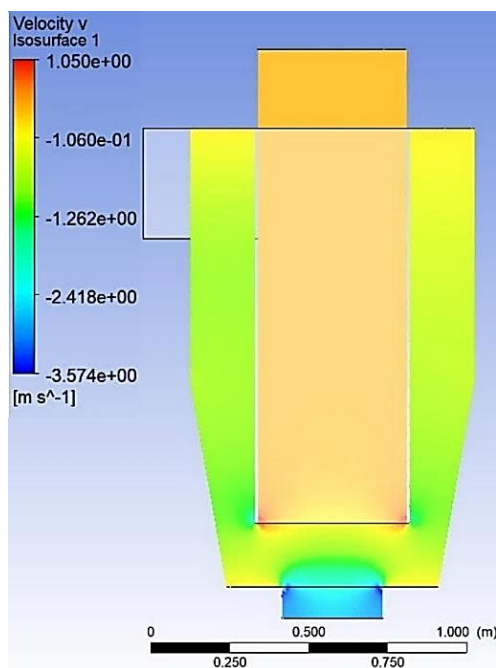
شکل ۴. لایه مرزی هندسه هیدروسیکلون

نرخ غرق شدگی ذرات کم چگال شد. این یافته ها اهمیت طراحی هندسی بهینه در بهبود عملکرد هیدروسیکلون ها را تأیید می کنند.

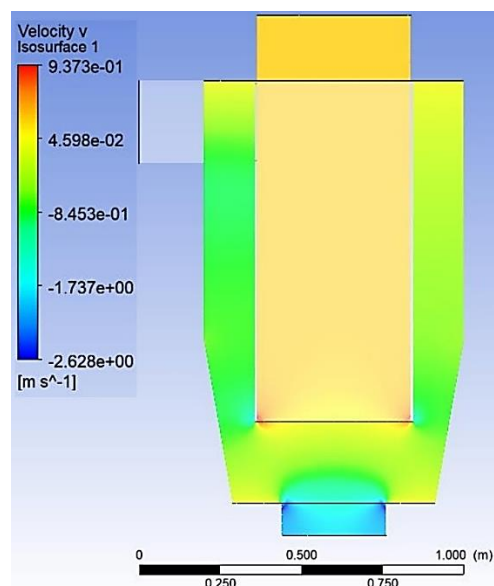
۵. شبکه بندی

برای بررسی اثر اصلاحات هندسی بر عملکرد هیدروسیکلون، میدان جریان و مسیر حرکت ذرات در هندسه پایه و اصلاح شده تحلیل شدند. کانتورهای توزیع سرعت، فشار و مسیر ذرات ارائه و مقایسه گردید. شبکه بندی شبیه سازی به گونه ای انجام شد که نواحی حساس شامل ورودی، ناحیه گردابه، بخش مخروطی و خروجی ها با تراکم بالاتری پوشش داده شوند تا دقت پیش بینی میدان جریان افزایش یابد (شکل ۲). نتایج تصویری نشان داده است که اصلاحات هندسی موجب افزایش یکنواختی جریان، تقویت گردابه اولیه و کاهش مناطق کم فشار مرکزی شده است. این مهم منجر به هدایت مؤثرتر ذرات به سمت خروجی پایین و بهبود راندمان جداسازی می شود. شبکه بندی هیدروسیکلون در نرم افزار انسیس مش^۳ و با هدف تحلیل در انسیس فلوئنت^۴ انجام شده است (شکل ۳). نرم افزار مورد استفاده مجموعه Ansys-2021-R2 می باشد. در مرحله شبکه بندی از المان های خطی با اندازه مشخصه 18×10^{-3} m استفاده شد تا ضمن حفظ دقت حل، هزینه محاسباتی در سطح قابل قبول باقی بماند. کیفیت شبکه با معیار کج شدگی^۵ ارزیابی شده است. حداقل، حداکثر و میانگین مقادیر به ترتیب برابر 0.00024 ، 0.99 و 0.19 بود که نشان دهنده کیفیت مناسب و عدم وجود المان های مخرب است. شبکه نهایی شامل ۲۴۴۹۵۸ گره و ۸۰۰۲۶۸ المان بود که امکان پیش بینی دقیق میدان جریان، ساختار گردابه ای و تعامل ذره سیال را فراهم می سازد. این مشخصات نشان می دهند شبکه بندی انجام شده از دقت و پایداری کافی برای شبیه سازی های معتبر برخوردار است. شکل ۴ نیز نمایی از شبکه لایه مرزی هیدروسیکلون را نشان می دهد. سیستم پردازنده جهت حل مسئله نسل ۱۴ و گرافیک ۵۰۶۰ بوده است. در واقع تزریق این تعداد ذرات و ردیابی آن ها زمان بر می باشد و نیازمند پردازنده قوی است. مدت زمان هر حل با سیستم معمولی ۶-۷ ساعت می باشد که

متوسط در طول مسیر نیز بالاتر است ($4/67 \text{ m/s}$) در مقابل $3/93 \text{ m/s}$.



شکل ۵. بررسی سرعت محوری سیال در هندسه اصلاح شده



شکل ۶. بررسی سرعت محوری سیال در هندسه پایه

این افزایش سرعت به تقویت مؤلفه مماسی جریان، شدت بیشتر گردابه و هدایت مؤثرتر جریان نزولی نسبت داده می‌شود. نتایج تأیید می‌کنند که اصلاحات هندسی نه تنها جداسازی ذرات کم‌چگال را بهبود داده، بلکه خروج ذرات سنگین مس را بدون کاهش کارایی جداسازی آنها، سریع‌تر و کارآمدتر کرده است. شکل ۸ مسیر حرکت ذرات مس در

۵. نتایج و تحلیل

۵-۱. سرعت محوری در هندسه پایه و اصلاح‌شده

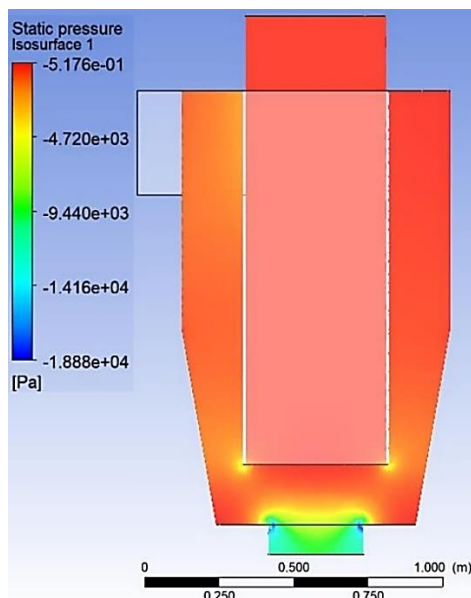
با هدف بررسی اثر اصلاحات هندسی بر میدان جریان کانتورهای سرعت محوری در هندسه پایه و اصلاح‌شده مقایسه شدند (شکل ۵ و ۶). در هندسه پایه، جریان مثبت رو به بالا به سمت خروجی بالا تا $0/94 \text{ m/s}$ و جریان منفی رو به پایین به سمت خروجی پایین تا $2/63 \text{ m/s}$ مشاهده شد. ناحیه جریان مثبت مرکزی وسیع و گردابه مرکزی قوی موجب به دام افتادن ذرات سبک و کاهش کارایی جداسازی می‌گردد. در هندسه اصلاح‌شده، حداکثر سرعت مثبت اندکی به $1/05 \text{ m/s}$ افزایش یافت، اما سرعت منفی به $3/57 \text{ m/s}$ رسیده که بیانگر تقویت جریان نزولی اصلی و افزایش قدرت غرق‌سازی ذرات است. ناحیه جریان مثبت مرکزی باریک‌تر شد و نفوذ گردابه مکنده کاهش یافت. این تغییرات به تضعیف گردابه مرکزی و کاهش مکش رو به بالا و تقویت جریان نزولی به سمت خروجی پایینی منجر شد. نتایج نشان داد که اصلاحات هندسی شامل افزایش طول بخش مخروطی و طول خروجی بالا، باعث کاهش $3/2$ درصدی فرار ذرات سنگ از خروجی بالا و خروج $35-40$ درصد از ذرات سنگ از خروجی پایین شدند (در مقایسه با صفر در هندسه پایه). این تحلیل توضیح فیزیکی روشنی برای بهبود عملکرد هیدروسیکلون و هدایت مؤثرتر ذرات کم‌چگال ارائه می‌دهد.

۵-۲. مسیر حرکت و سرعت ذرات مس در هندسه

پایه و اصلاح‌شده

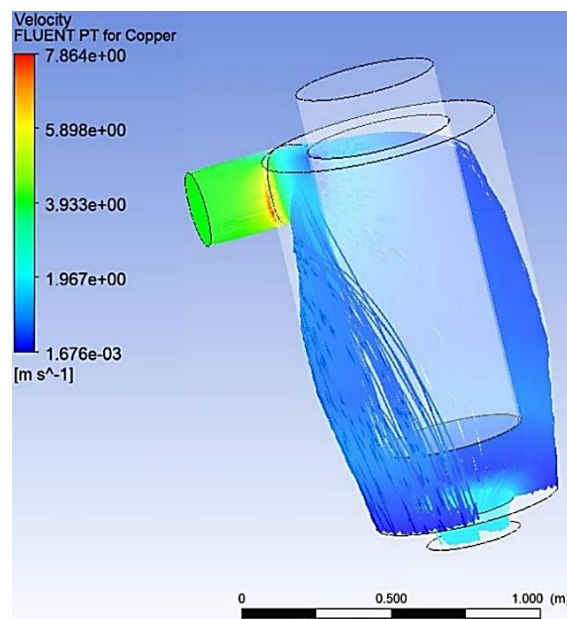
در هر دو هندسه (شکل ۷ و ۸)، ذرات پس از ورود تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به سمت دیواره رانده شده و در امتداد جریان نزولی به طور کامل از خروجی پایینی خارج می‌شوند، که نشان‌دهنده حفظ کارایی جداسازی ذرات سنگین است. شکل ۷ مسیر حرکت ذرات مس و خروج آنها از جریان چرخشی تا دهانه پایینی را نشان می‌دهد. مقایسه سرعت‌ها نشان داد که در هندسه اصلاح‌شده، حداکثر سرعت ذرات مس از $7/86 \text{ m/s}$ به $9/35 \text{ m/s}$ افزایش یافته و سرعت

فشار بالا و پایین را برای تحلیل جریان داخلی و رفتار ذرات در هندسه مشخص می‌کند.

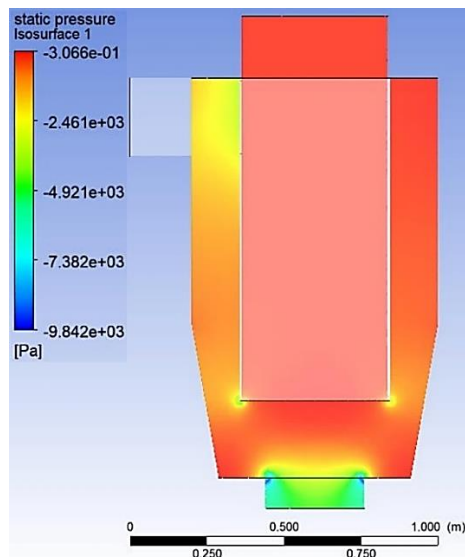


شکل ۹. فشار ساکن در هیدروسیکلون اصلاح شده

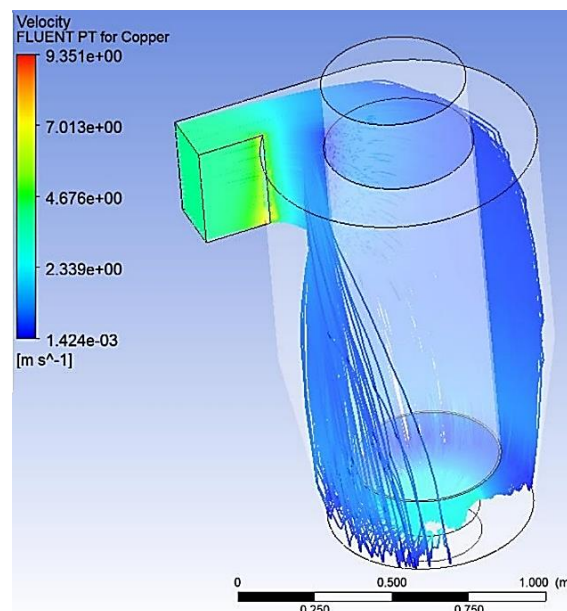
ساختار اصلاح شده را نشان می‌دهد و تأیید می‌کند که تمامی ذرات مس همچنان از خروجی پایینی دفع شده‌اند.



شکل ۷. مسیر حرکت ذرات مس در هندسه پایه



شکل ۱۰. فشار ساکن در هیدروسیکلون پایه

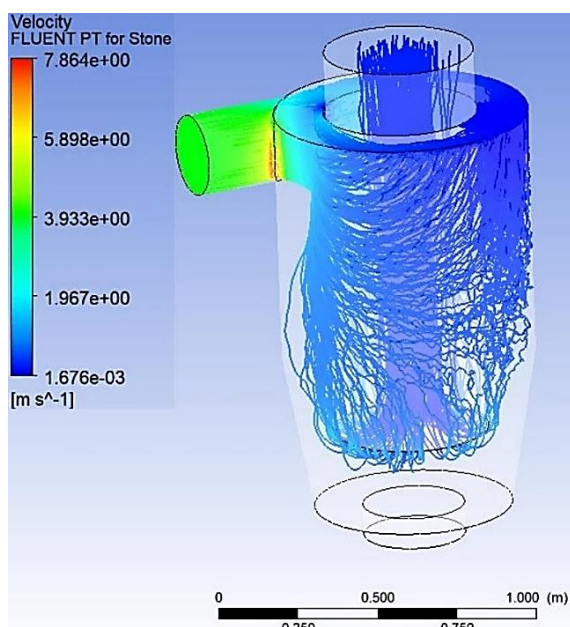


شکل ۸. مسیر حرکت ذرات مس در هندسه اصلاح شده

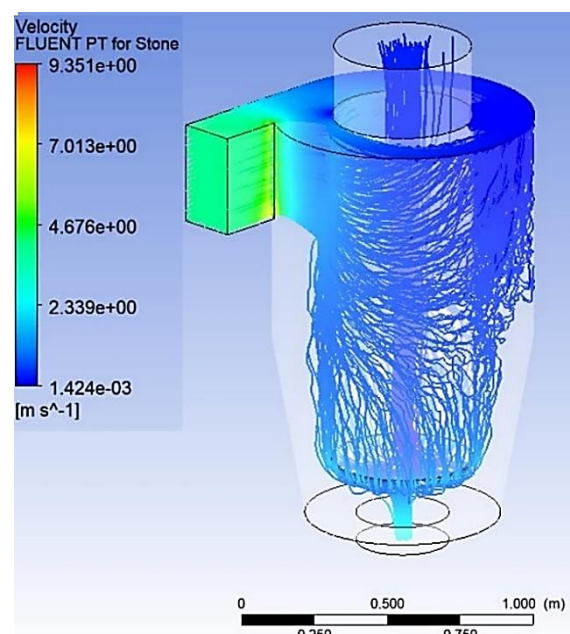
در هندسه پایه، فشار ساکن از $3/0 \text{ Pa} +$ در ورودی تا $9842 \text{ Pa} -$ در مرکز پایینی کاهش یافته و گرادیان منفی حداکثر حدود $9/8 \text{ kPa}$ است، که نشان‌دهنده وجود ناحیه خلأ نسبی مرکزی است. در هندسه اصلاح شده، فشار مرکزی به $18880 \text{ Pa} -$ رسید و گرادیان منفی به $9/8 \text{ kPa}$ افزایش یافت؛ این تغییر شدت گردابه و تمرکز میدان فشار را تقریباً دو برابر نموده است. در هر دو هندسه، فشار بالا در نزدیکی دیواره‌ها و فشار پایین در محور مرکزی مشاهده شده است.

۳-۵. فشار ساکن در هندسه پایه و اصلاح شده

جهت بررسی اثر اصلاحات هندسی بر میدان فشار و مسیر حرکت ذرات، توزیع فشار ساکن در هندسه پایه و اصلاح شده مقایسه گردید. فشار ساکن نقش کلیدی در شکل‌گیری گردابه، شدت نیروی گریز از مرکز و هدایت ذرات دارد. شکل‌های ۹ و ۱۰ توزیع فشار ساکن در هیدروسیکلون اصلاح شده و پایه را نشان می‌دهد و نواحی با



شکل ۱۱. مسیر حرکت ذرات سنگ در هیدروسیکلون پایه



شکل ۱۲. مسیر حرکت ذرات سنگ در هیدروسیکلون اصلاح شده

نتایج نشان می‌دهد که اصلاح هندسی باعث بازآرایی ساختار جریان، محدود شدن مسیرهای فرار ذرات سبک و بهبود عملکرد جداسازی بدون تضعیف میدان گردابه‌ای شده است.

۵-۵. خطوط جریان در هیدروسیکلون

خطوط جریان داخل هیدروسیکلون ساختار سه‌بعدی مارپیچی جریان را نشان می‌دهند؛ جریان اصلی پس از ورود در امتداد دیواره به سمت خروجی پایینی هدایت می‌شود و گردابه مرکزی معکوس در محور دستگاه جریان رو به بالا به

در هندسه اصلاح شده، خطوط هم‌فشار مرکزی نزدیک‌تر و گرادیان فشار محوری شدیدتر است، که موجب هدایت مؤثرتر ذرات سنگین‌تر به دیواره و خروج سریع‌تر آن‌ها از خروجی پایینی می‌شود. برای ذرات سبک سنگ، افزایش طول خروجی بالا و تغییر ورودی باعث کنترل بهتر ناحیه فشار پایین مرکزی و کاهش مکش به سمت خروجی بالا شد، در حالی که جریان نزولی تقویت شده، فرصت بیشتری برای غرق شدن ذرات سبک فراهم می‌کند. در مجموع، اصلاحات هندسی میدان فشار را پویاتر و با گرادیان شدیدتر کرد، نیروی گریز از مرکز را برای همه ذرات تقویت نمود و اثر نامطلوب مکش مرکزی را مدیریت کرد، که عامل اصلی بهبود هم‌زمان جداسازی ذرات سنگین و کاهش فرار ذرات سبک در هندسه اصلاح شده است.

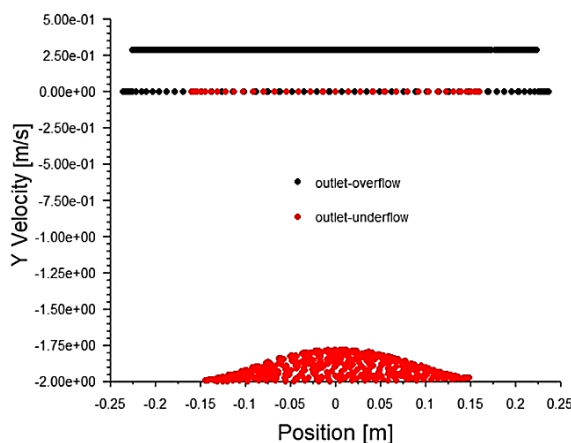
۴-۵. مسیر و سرعت ذرات سنگ در هندسه پایه و اصلاح شده

بازه سرعت ذرات سنگ مشابه ذرات مس است. حداکثر سرعت از $7/86 \text{ m/s}$ در هندسه پایه به $9/35 \text{ m/s}$ در هندسه اصلاح شده افزایش یافت، که نشان‌دهنده تأثیر میدان چرخشی اولیه و شتاب‌دهی ذرات به سمت دیواره است. با وجود مشابهت سرعت‌ها، الگوی مسیر حرکت متفاوت می‌باشد. در هندسه پایه، ۱۳۷ ذره سنگ پس از گرفتار شدن در ناحیه مرکزی، به خروجی بالایی هدایت شدند. در هندسه اصلاح شده، ذرات فراری به ۱۲۸ رسیدند که حدود ۳۵-۴۰٪ آن‌ها از خروجی پایینی خارج شدند. شکل ۱۱ مسیر حرکت ذرات سنگ و رفتار فراری آن‌ها در هیدروسیکلون پایه را نشان می‌دهد. مسیر حرکت ذرات سنگ در هیدروسیکلون اصلاح شده نمایانگر کاهش تعداد ذرات فراری به خروجی بالایی و افزایش غرق‌شدگی آن‌ها به خروجی پایینی است (شکل ۱۲). افزایش سرعت ذرات در هندسه اصلاح شده با تغییرات هندسی همراه شد که شامل افزایش طول مخروط، افزایش طول خروجی بالایی و تقویت جریان نزولی مجاور دیواره می‌باشد. این اصلاحات موجب کاهش نفوذ گردابه مرکزی، کاهش مکش به سمت خروجی بالایی و افزایش احتمال غرق شدن ذرات سبک شده است.

گردابه مرکزی شده و شرایط مناسبی برای غرق شدن ذرات سبک فراهم کرده است.

۵-۶. پروفیل سرعت محوری در خروجی‌های هیدروسیکلون

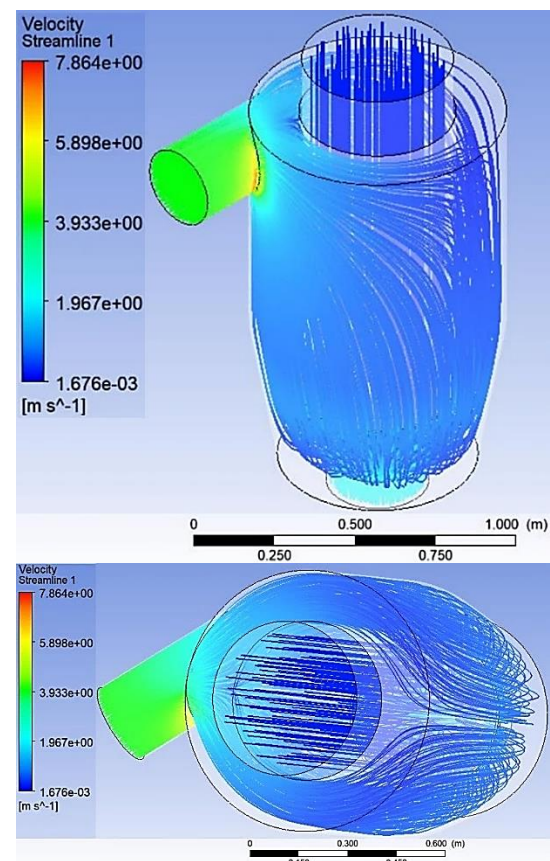
شکل‌های ۱۴ و ۱۵، پروفیل‌های سرعت محوری هندسه پایه و اصلاح شده را نشان می‌دهند. محور افقی فاصله شعاعی و محور عمودی سرعت محوری را نشان می‌دهد؛ مقادیر مثبت جریان رو به بالا و مقادیر منفی جریان رو به پایین هستند. در هندسه پایه، خروجی پایینی جریان کاملاً منفی و متمرکز به دیواره بود، در حالی که خروجی بالایی دارای جریان مثبت مرکزی تا 0.5 m/s و مکش ذرات سبک بود. در هندسه اصلاح شده، جریان خروجی پایینی یکنواخت‌تر و پایدارتر شد و اختلاف سرعت بین مرکز و دیواره کاهش یافت. در خروجی بالایی، دامنه ناحیه با سرعت مثبت کاهش یافته و حداکثر سرعت رو به بالا از 0.5 m/s به 0.25 m/s رسید است. بخش اعظم مقطع خروجی بالایی دارای جریان نزولی شد.



شکل ۱۴. پروفیل سرعت محوری در خروجی‌های هیدروسیکلون پایه

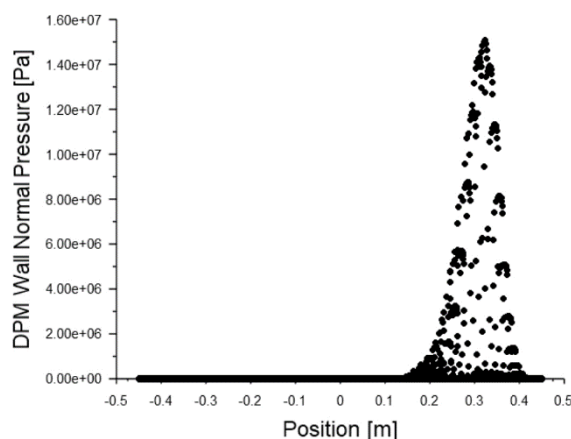
این تغییرات نشان می‌دهد که اصلاحات هندسی، به‌ویژه افزایش طول خروجی بالایی، مکش مرکزی را تضعیف کرده و نفوذ جریان رو به بالا به داخل بدنه محدود شده است. نتیجه این بازآرایی، کاهش فرار ذرات سبک و افزایش خروج ذرات کم‌چگال به سمت جریان نزولی و خروجی پایینی است، که بهبود عملکرد جداسازی هیدروسیکلون را توضیح می‌دهد.

خروجی بالایی ایجاد می‌کند. شکل ۱۳، خطوط جریان و الگوی کلی حرکت سیال، جهت‌گیری گردابه‌ها و مسیر احتمالی ذرات را نشان می‌دهد، که توضیح‌دهنده بهبود عملکرد کلی هیدروسیکلون است. سرعت سیال بین 0 تا 7.864 m/s تغییر کرده و بیشترین سرعت‌ها در ناحیه ورودی و جریان نزولی نزدیک دیواره مشاهده می‌شوند، در حالی که سرعت‌های کمتر در هسته گردابه و ناحیه مرکزی دیده می‌شود.

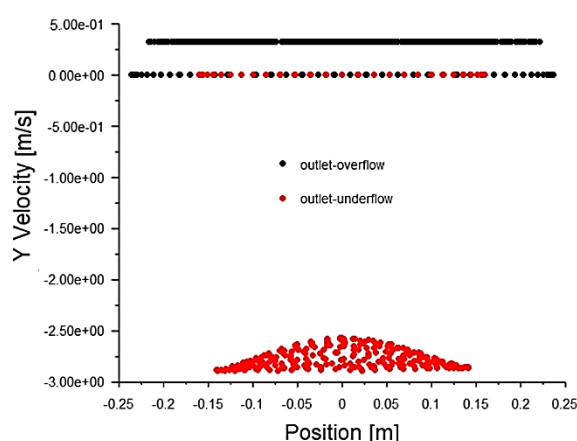


شکل ۱۳. خطوط جریان در هیدروسیکلون اصلاح شده

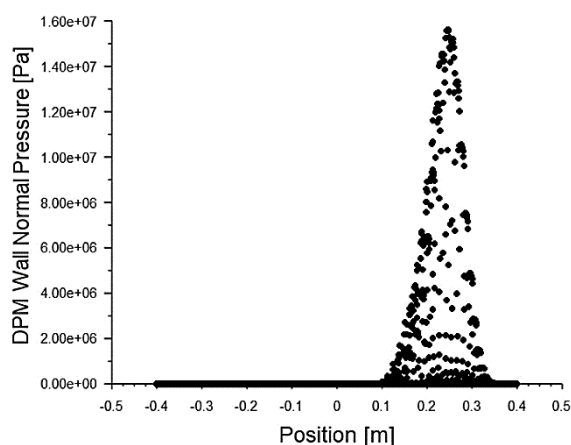
تحلیل خطوط جریان اثر اصلاحات هندسی را روشن می‌کند. افزایش طول خروجی بالایی، تمرکز گردابه معکوس در دهانه بالایی و کاهش نفوذ آن به ناحیه جداسازی اصلی را فراهم می‌کند. افزایش طول بخش مخروطی، مسیر نزولی بلندتر و پایدارتر ایجاد کرده و زمان ماند ذرات را افزایش می‌دهد. ورودی مستطیلی با حفظ سطح مقطع، جریان چرخشی اولیه قوی‌تر و یکنواخت‌تر ایجاد می‌کند. این اصلاحات باعث تقویت جریان نزولی نزدیک دیواره و کنترل



شکل ۱۶. فشار نرمال دیوار ناشی از برخورد ذرات در هیدروسیکلون اصلاح شده



شکل ۱۵. پروفیل سرعت محوری در خروجی های هیدروسیکلون اصلاح شده



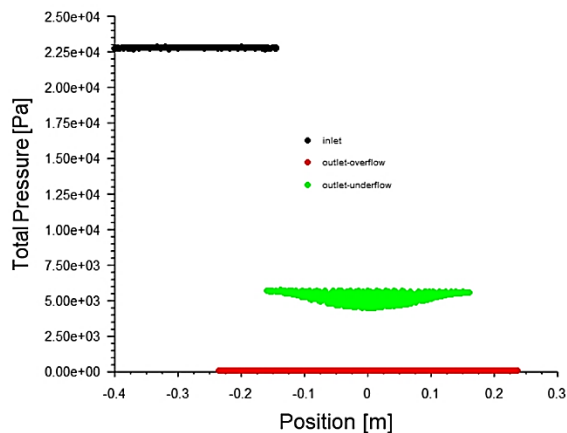
شکل ۱۷. فشار نرمال دیوار ناشی از برخورد ذرات در هیدروسیکلون پایه

۸-۷. فشار نرمال دیوار ناشی از برخورد ذرات^۶

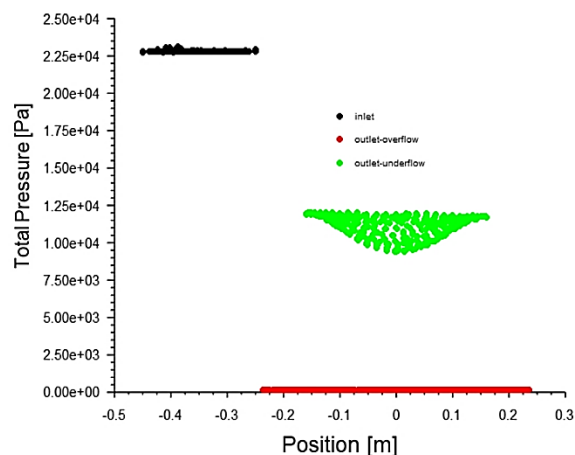
در هندسه پایه، فشار دیواره نامتقارن و ناپیوسته است. مقادیر بیشینه تا $1/4 \times 10^7 \text{ Pa}$ رسید و افت شدید در برخی نواحی مشاهده شد که بیانگر تمرکز برخورد ذرات در نقاط خاص و ناپایداری جریان است، وضعیتی که موجب توزیع غیریکنواخت ذرات و کاهش کارایی جداسازی می شود. در هندسه اصلاح شده (شکل ۱۶)، توزیع فشار متقارن تر، یکنواخت تر و هموارتر شد؛ مقادیر بیشینه مشابه باقی ماند، اما تغییرات فشار در طول دیواره تدریجی و قابل پیش بینی بود. این رفتار ناشی از بهبود میدان چرخشی اولیه (ورودی مستطیلی و افزایش قطر استوانه) و پایداری بیشتر جریان است و نشان دهنده انتقال مؤثرتر ذرات به دیواره و کاهش مناطق جریان ضعیف یا جدایش یافته است. نتایج نشان می دهد که اصلاحات هندسی نه تنها میدان جریان سیال بلکه الگوی حرکت و برخورد فاز جامد را بهینه کرده است. یکنواختی فشار نرمال، شرایط بهتری برای هدایت ذرات به جریان نزولی و خروجی پایینی فراهم کرده و در نهایت موجب کاهش فرار ذرات سبک و بهبود عملکرد کلی جداسازی نسبت به هندسه پایه هیدروسیکلون (شکل ۱۷) می شود.

۵-۸. توزیع فشار کل روی دیواره در هندسه پایه و اصلاح شده

در هندسه پایه، فشار کل بین ۰ تا ۱۲۰ kPa تغییر نموده و الگوی نوسانی و ناهموار دارد (شکل ۱۸). وجود قله ها و افت های متعدد نشان دهنده ناپایداری جریان، گردابه های ثانویه و جدایش جریان است که احتمال انحراف ذرات از مسیر نزولی و فرار آن ها را افزایش می دهد. در هندسه اصلاح شده، منحنی فشار هموارتر و یکنواخت تر و نوسانات شدید به حداقل رسیده است (شکل ۱۹). این بهبود ناشی از اصلاحات هندسی شامل ورودی مستطیلی، افزایش طول بخش مخروطی و طول لوله خروجی بالایی است و بیانگر تثبیت جریان دیواره ای و کاهش آشفتگی های موضعی است. پایداری فشار کل موجب ایجاد مسیر نزولی منسجم ذرات و



شکل ۲۰. توزیع فشار کل در مقاطع ورودی و خروجی های هیدروسیکلون در هندسه پایه

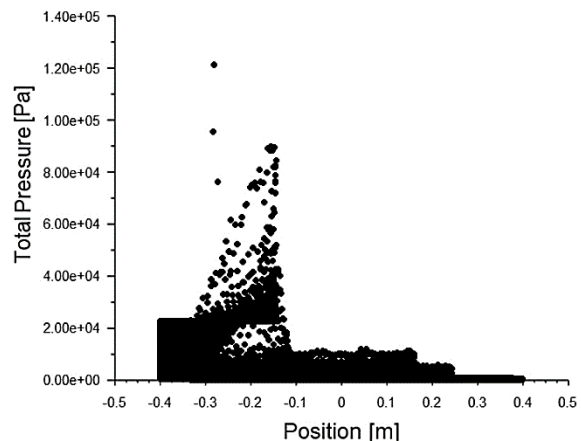


شکل ۲۱. توزیع فشار کل در مقاطع ورودی و خروجی های هیدروسیکلون برای هندسه اصلاح شده

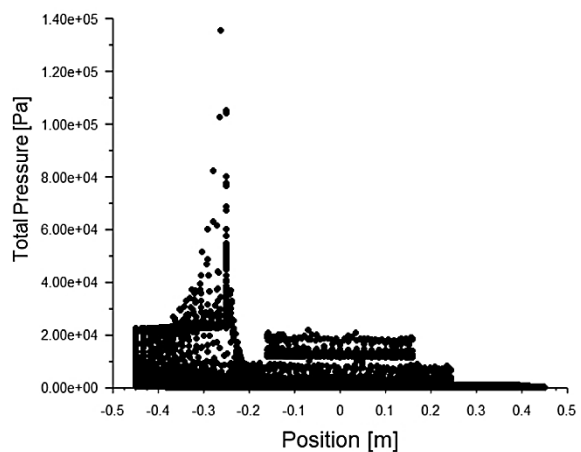
در خروجی بالایی، فشار مرکزی به طور قابل توجهی افزایش یافت و ناحیه کم فشار شدید حذف شد، که باعث کاهش مکش مرکزی و محدود شدن فرار ذرات سبک شد. این تغییرات ناشی از اصلاحات هندسی، به ویژه افزایش طول لوله خروجی بالایی، بهبود میدان فشار، کاهش اتلاف انرژی و افزایش راندمان هیدرولیکی را نشان می دهد و توضیح دهنده کاهش فرار ذرات سبک و بهبود عملکرد جداسازی در هندسه اصلاح شده است.

مقایسه نتایج دو هندسه نشان می دهد که در هر دو هندسه، تمامی ذرات مس از خروجی پایینی خارج شدند و اصلاحات هندسی تأثیر منفی بر جداسازی ذرات سنگین نداشت. در مدل پایه، حدود ۱۲/۳٪ از ذرات سنگ از خروجی بالایی فرار کردند. در مدل اصلاح شده، این مقدار به حدود ۹/۱٪ کاهش یافت. در نتیجه بهبود هندسه باعث کاهش ۳/۲

کاهش انتقال آن ها به گردابه مرکزی شد، که به کاهش فرار ذرات سبک و بهبود کارایی کلی جداسازی منجر گردید.



شکل ۱۸. توزیع فشار کل روی دیواره در هندسه پایه



شکل ۱۹. توزیع فشار کل روی دیواره در هندسه اصلاح شده

۵-۹. توزیع فشار کل در مقاطع ورودی و خروجی های هیدروسیکلون

در هندسه پایه، فشار در ورودی بالا و یکنواخت بود، در خروجی پایین کاهش یافته و نامتقارن است؛ فشار مرکزی کمتر و نزدیک دیواره افزایش داشت که نشان دهنده اتلاف انرژی و تشکیل گردابه ها است (شکل ۲۰). در خروجی بالا، فشار مرکزی به نزدیک صفر رسید و مکش قوی هسته گردابه موجب فرار ذرات سبک شد. در هندسه اصلاح شده، فشار ورودی کمی کاهش یافت (شکل ۲۱)، اما خروجی پایینی یکنواخت تر و متقارن شد و انرژی جریان بهتر هدایت شد.

درصدی فرار ذرات سنگ از خروجی بالا گردید. همزمان سهم ذرات سنگی که از خروجی پایینی خارج شدند به حدود ۴۰٪ افزایش یافت.

جدول ۱. مقایسه درصد فرار ذرات از خروجی بالایی هندسه

نوع ذرات	حالت مرجع	حالت اصلاح شده	درصد بهبود
مس	۰	۰	---
سنگ	۱۲/۳	۹/۱	۳/۲

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب اصلاحات هندسی شامل افزایش طول خروجی بالایی، افزایش طول بخش مخروطی، مستطیلی‌سازی ورودی با حفظ قطر هیدرولیکی و افزایش قطر بخش استوانه‌ای، به‌طور هم‌زمان موجب بهبود قابل توجه عملکرد هیدروسیکلون شده است. این اصلاحات منجر به پایداری بیشتر میدان گردابه‌ای، کاهش اندازه ناحیه کم‌فشار مرکزی، افزایش شدت چرخش در مجاورت دیواره و در نهایت افزایش نرخ غرق‌شدگی ذرات کم‌چگال گردیده‌اند. نکته حائز اهمیت آن است که این بهبود عملکرد بدون اعمال هیچ‌گونه تغییری در شرایط مرزی جریان و صرفاً از طریق اصلاح هندسه حاصل شده است که نشان‌دهنده نقش کلیدی طراحی هندسی در ارتقای کارایی هیدروسیکلون‌ها می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر اصلاحات هندسی هیدروسیکلون بر جریان سیال و جداسازی ذرات سنگین و سبک با استفاده از شبیه‌سازی‌های CFD و مدل فاز گسسته بررسی شد. تحلیل‌ها شامل کانتورهای سرعت و فشار، خطوط جریان، مسیر و سرعت ذرات، فشار دیواره و فشار کل در مقاطع مختلف بود. نتایج نشان داد که در هندسه اصلاح‌شده، ناحیه جریان مثبت مرکزی محدودتر و گردابه مرکزی کاهش یافته، در حالی که جریان نزولی نزدیک دیواره‌ها قوی‌تر و پایدارتر شد، که باعث افزایش شتاب و انتقال مؤثر ذرات به خروجی پایینی گردید. پروفیل‌های سرعت محوری تأیید کردند که دامنه جریان رو به بالا در مرکز خروجی بالایی کاهش یافته و خروجی پایینی یکنواخت‌تر شد، که کاهش فرار ذرات سبک

و هدایت آن‌ها به مسیر مطلوب را توضیح می‌دهد. تحلیل مسیر و سرعت ذرات نشان داد که ذرات سنگین مسیر نزولی خود را حفظ کرده و تماماً از خروجی پایینی خارج شدند؛ ذرات سبک نیز با وجود افزایش سرعت مماسی اولیه، تعداد فراری‌ها کاهش یافته و ۳۵-۴۰٪ از ذرات فراری به خروجی پایینی هدایت شدند. تحلیل فشار ساکن و فشار کل نشان داد که ناحیه کم‌فشار مرکزی محدود و فشار دیواره یکنواخت‌تر شده است، که انتقال مؤثر ذرات و کاهش نوسانات جریان را تضمین می‌کند. اصلاحات هندسی شامل افزایش طول مخروط و خروجی بالایی، تغییر ورودی به شکل مستطیلی و افزایش قطر بخش استوانه‌ای بود. این تغییرات موجب جریان چرخشی یکنواخت‌تر، گردابه کنترل‌شده‌تر، پایداری جریان جریان نزولی و کاهش مکش مرکزی شدند، به طوری که کارایی جداسازی ذرات سبک افزایش و ذرات سنگین حفظ شد. به طور کمی، تعداد ذرات سبک فراری از ۱۳۷ به ۱۲۸ کاهش یافته و حدود ۳۵-۴۰٪ از آن‌ها به خروجی پایینی منتقل شدند. همچنین، سرعت ذرات برای هر دو نوع افزایش یافت. در مجموع، اصلاح هندسی هیدروسیکلون منجر به میدان جریان پایدارتر، فشار یکنواخت‌تر، هدایت مؤثر ذرات سبک و سنگین و افزایش راندمان هیدرولیکی شد و نشان داد که بهینه‌سازی هندسه می‌تواند عملکرد جداسازی را به طور قابل توجهی ارتقا دهد.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران، ویراستاران، اعضای هیات تحریریه و سردبیر نشریه هیدروفیزیک به جهت کمک در بهبود کیفیت مقاله، کمال تشکر و امتنان را داشته باشند.

مراجع

- [1] Motsamai OS. Investigation of the influence of hydrocyclone geometric and flow parameters on its performance using CFD. *Advances in Mechanical Engineering*. 2010; 2:593689.
- [2] Delgadillo JA, Rajamani RK. Exploration of hydrocyclone designs using computational fluid dynamics. *International Journal of Mineral Processing*. 2007 Oct 19;84(1-4):252-61.

- [14] Kang SG, Kim KC, Ryom SC, Ri JH. Turbulence models and simulation method in the CFD simulation of 75-mm hydrocyclone. *Scientific Mining Journal*. 2022 Sep 30;61(3):127-34.
- [15] Zhang Y, Liu P, Jiang L, Yang X, Yang J. Numerical simulation of flow field characteristics and separation performance test of multi-product hydrocyclone. *Minerals*. 2019 May 16;9(5):300.
- [16] Venkatesh S, Sivapirakasam SP, Sakthivel M, Krishnaraj R, Leta TJ. Investigation on hydrocyclone for increasing the performance by modification of geometrical parameters through cfd approach. *Desalination and Water Treatment*. 2021 Dec 1;244:157-66.
- [17] Xu X, Liu P, Zhang Y, Hu W, Zhang Q. Numerical Simulation of the Separation Performance of a New Type of Two-Stage Column-Cone Hydrocyclone Based on CFD. *In Intelligent Equipment and Special Robots 2024* (pp. 605-610). IOS Press.
- [18] Li F, Zou C, Li P, Huang G, Liu G, Zhang C. Performance Optimisation of Hydrocyclones with Complex Curved Feed Chambers: A CFD-Experimental Study. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025 Oct 1.
- [19] Hou D, Zhao Q, Cui B, Wei D, Song Z, Feng Y. Geometrical configuration of hydrocyclone for improving the separation performance. *Advanced Powder Technology*. 2022 Feb 1;33(2):103419.
- [20] de Sa da Silva DP, Morimoto MG, de Oliveira Silva D, Barrozo MA, Vieira LG. Effect of operational and geometric variables in hydrocyclones to improve separation efficiency and reduce energy consumption: A review and new insights. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2024 Oct 28:1-32.
- [21] Pandey S, Wasilewski M, Mukhopadhyay A, Prakash O, Ahmad A, Brar LS. Multi-Objective Optimization of Cyclone Separators Based on Geometrical Parameters for Performance Enhancement. *Applied Sciences*. 2024 Feb 29;14(5):2034.
- [22] Sardar R, Oh J, Kim M, Lee JE, Kim S, Kim KC. The effect of inlet velocity, gas temperature and particle size on the performance of double cyclone separator. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*. 2023 Sep 1;191:109469.
- [23] Wang L, Bai B, Chen P. A study on the characteristics and geometric optimization of a cyclone filter. *Separation and Purification Technology*. 2024 Oct 1;345:127313.
- [24] Li F, Liu P, Yang X, Zhang Y, Li X, Jiang L, Wang H, Fu W. Numerical analysis on the
- [3] Narasimha M, Brennan M, Holtham PN. Large eddy simulation of hydrocyclone—prediction of air-core diameter and shape. *International Journal of Mineral Processing*. 2006 Aug 1;80(1):1-4.
- [4] Wang B, Yu AB. Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions. *Minerals Engineering*. 2006 Aug 1;19(10):1022-33.
- [5] Martínez LF, Lavín AG, Mahamud MM, Bueno JL. Vortex finder optimum length in hydrocyclone separation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2008 Feb 1;47(2):192-9.
- [6] Mahat MM, Husain H, Mohamad NS. Separation efficiency analysis of multiphase flow inside hydrocyclone using CFD. *Journal of applied engineering design and simulation*. 2023 May 12;3(1):51-65.
- [7] Thiemsakul D, Piemjaiswang R, Sema T, Feng Y, Piumsomboon P, Chalermssinsuwan B. Effect of hydrocyclone design in microplastics-water separation by using computational fluid dynamics simulations. *Results in Engineering*. 2024 Jun 1; 22:102034.
- [8] Wang R, Zhang Z, Yan X, Zhang H, Wang L. Hydrocyclone separation enhancement of fine particles based on interface control. *Minerals Engineering*. 2024 Apr 1; 209:108628.
- [9] Hou D, Liu P, Zhao Q, Jiang L, Cui B, Wei D. Numerical study on the separation performance of Hydrocyclones with different secondary cylindrical section diameters. *Processes*. 2023 Aug 25;11(9):2542.
- [10] Thiemsakul D, Kuang S, Sukmas W, Bumrunghthaichachan E, Korkerd K, Piemjaiswang R, Piumsomboon P, Chalermssinsuwan B. Effect of Hydrocyclone Size on Microplastics Separation: A Computational Fluid Dynamics Investigation. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2025 Nov 2.
- [11] Pukkella AK, Vega-Garcia D, Hadler K, Cilliers J. The influence of surface-wall roughness on hydrocyclone performance. *Separation and Purification Technology*. 2025 Jul 8;360:131109.
- [12] Dai Y, Yang X, Du J, Yu W, Wang D, Yuan F. Migration and Removal of Microplastics in a Dual-Cone Mini-Hydrocyclone. *Symmetry*. 2025 Sep 17;17(9):1559.
- [13] Razmi H, Goharrizi AS, Mohebbi A. CFD simulation of an industrial hydrocyclone based on multiphase particle in cell (MPPIC) method. *Separation and Purification Technology*. 2019 Jan 31;209:851-62.

effect of the length of arc-shaped vortex finder on the hydrocyclone's flow field and separation performance. Minerals Engineering. 2021 Oct 1;172:107172.

- [25] Zhang Y, Liu P, Ge J, Yang X, Yang M, Jiang L. Simulation analysis on the separation performance of spiral inlet hydrocyclone. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2021 Jul 3;41(7):474-90.
- [26] Zheng Y, Wang JG, Wang HL, Sun MC, Liu XY. Parametric design of curved hydrocyclone and its optimization based on artificial neural networks prediction. Separation and Purification Technology. 2025 Jan 19;353:128445

پی‌نوشت‌ها

- 1 Spigot or Underflow
- 2 Vortex Finder or Overflow
- 3 ANSYS Meshing
- 4 ANSYS Fluent
- 5 Skewness
- 6 DPM Wall Normal Pressure