



نشریه روش های تحلیلی و عددی



در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: <http://anm.yazd.ac.ir/>

(مقاله پژوهشی)

بهبود عملکرد جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله سازی شرکت معدنی و صنعتی گل گهر

چکیده

این تحقیق با استفاده از ترکیب روش های شبیه سازی مانند CFD و DEM، اندازه گیری های آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی، به توصیف دقیق، تحلیل عملکرد و عیب یابی جداکننده هوایی به عنوان یکی از تجهیزات اصلی مدار خردایش خشک کارخانه گندله سازی گل گهر پرداخته است. تأثیر عوامل مختلف عملیاتی بر کارایی جداکننده و میزان حساسیت آن به هر عامل در آزمایش هایی بررسی شد. در یک آزمایش، دو استراتژی مختلف کنترلی برای تعیین تأثیر سرعت چرخش قفس بر کیفیت محصول مقایسه شدند. نتایج نشان دادند در حالتی که دور قفس ثابت بود، عدد بلین (میزان ریزی) محصول جداکننده نسبت به حالتی که دور قفس متغیر بود، از 1154 ± 240 به 1195 ± 72 سانتی مترمربع بر گرم رسید. به عبارت دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت که نشان دهنده محصول ریز تر با نوسان کمتر بود. با تصویربرداری و مشاهده مستقیم مشخص شد که تجمع ذرات ریز با ابعاد متوسط ۷ میکرون در محفظه حلزونی اتفاق افتاده است. از جمله علل آن می توان به عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی از ته ریز سیکلون، چینش نامناسب صفحات دمپر و کاهش سرعت جریان هوا، افت کارایی غبارگیر کیسه ای و توزیع غیریکنواخت هوا در محفظه حلزونی اشاره کرد. برای کاهش اثر این مشکلات، اقداماتی نظیر تنظیم وزنه روی دریچه تخلیه ته ریز سیکلون، تغییر چینش صفحات دمپر جهت توزیع یکنواخت و افزایش سرعت هوا، افزایش مکش غبارگیر کیسه ای با مسدود کردن ورودی های اضافی هوا و تغییر بازشدگی صفحات راهنمای دور قفس جهت توزیع یکنواخت هوا انجام شدند. پس از پایش ۱۰ ماهه بعد از اعمال این تغییرات، میزان نشست مواد در محفظه حلزونی اندازه گیری و مشخص شد که از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد کاهش یافته است. در بررسی دیگری با استفاده از شبیه سازی DEM، نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع کننده به عنوان عامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش مطالعه شد. در طرح اصلی، توزیع خوراک غیریکنواخت بود و بار به صورت یک طرفه روی قفس توزیع می شد. جهت رفع این مشکل، طرح جدیدی پیشنهاد شد و تحلیل نتایج شبیه سازی نشان داد که توزیع خوراک به صورت یکنواخت تر درآمده و انحراف معیار نسبی توزیع ذرات در اطراف صفحه با ۹۵ درصد اطمینان از ۳۰ درصد به ۵ درصد بهبود و کاهش یافت.

کلمات کلیدی

جداکننده هوایی دینامیکی، دینامیک سیالات محاسباتی، روش اجزای گسسته، عیب‌یابی، خصوصیت‌سنجی، گل‌گهر.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

۱- مقدمه

بالا، می‌تواند مصرف انرژی را در بخش آسیاکنی تا یک‌سوم کاهش دهد که پتانسیل این فناوری برای صرفه‌جویی چشمگیر در انرژی و گسترش استفاده از آن را در صنایع فرآوری معدنی و سیمان نشان می‌دهد.

برای درک بهتر اصول نظری جداکننده‌های هوایی، شاپیرو و گالپرین [۲] یک بررسی جامع در خصوص اصول طبقه‌بندی هوایی انجام دادند. تأکید تحقیقات آن‌ها بر اهمیت پارامترهایی مانند حد جدایش، نحوه توزیع جریان هوا و بررسی نواحی جدایش بود که برای دستیابی به کارایی بهینه جدایش ضروری هستند. این بررسی، پایه نظری خوبی برای تحقیقات تجربی و محاسباتی بعدی فراهم کرد.

با گذر از تئوری به تحلیل تجربی، گوا و همکاران [۶] به بررسی تأثیر سرعت قفس گردان بر گرادیان سرعت در قسمت‌های مختلف جداکننده هوایی توربو پرداختند. با استفاده از سرعت‌سنج لیزری داپلر، آن‌ها نشان دادند که در صورت دستیابی به توزیع یکنواخت سرعت محوری و شعاعی، عملکرد جدایش به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌یابد. به‌طور مشابه، فنگ و همکاران [۷] تأثیر پارامترهای عملیاتی بر شدت و میدان جریان گردابی در نواحی مختلف جداکننده را مورد مطالعه قرار دادند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که دقت در تعیین شرایط عملیاتی مانند سرعت جریان هوا و سرعت روتور، می‌تواند کیفیت جدایش را افزایش دهد که بر اهمیت کنترل دقیق شرایط عملیاتی تأکید دارد.

جداکننده‌های هوایی با پدیده‌ای به نام اثر قلاب-ماهی (برخلاف الگوهای جدایش متداول سیکلون‌ها) مواجه هستند که منحنی جدایش معمول S شکل پذیرفته‌شده برای ارزیابی کارایی طبقه‌بندی را به چالش می‌کشند. این پدیده از طریق بازبازی غیرخطی ذرات ریز مشخص می‌شود. بدین صورت که از شروع نمودار در ابعاد بسیار ریز، ابتدا تا یک اندازه بحرانی بازبازی افزایش، سپس کاهش یافته و دوباره افزایش می‌یابد [۸]. این بی‌نظمی که در جداکننده‌های هوایی مشاهده شده است، از دنباله‌روی ناخواسته ذرات ریز به بخش درشت ناشی شده و کیفیت جدایش را کاهش می‌دهد. محققان زیادی در مورد منشأ آن بحث کرده‌اند. برخی این پدیده را به خطاهای اندازه‌گیری یا تجمع ذرات ریز نسبت داده‌اند [۹، ۱۰] و برخی دیگر توضیحات مکانیکی شامل نیروهای آیرودینامیکی، نیروی گریز از مرکز و محدودیت‌های عدد رینولدز بر ذرات درشت‌تر را مطرح کرده‌اند [۱۱].

خصوصیت‌سنجی تجهیزات صنعتی موجود در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، از ارکان اصلی پیشرفت در این حوزه است. چرا که زمینه‌ای برای درک بهتر جزئیات و نحوه عملکرد سیستم و عیب‌یابی در جهت بهبود فرایند را فراهم می‌کند. امروزه استفاده از جداکننده‌های هوایی دینامیکی در مدارهای آسیاکنی خشک در حال گسترش است، زیرا امکان جدایش ذرات ریز با کارایی بالا که برای دستیابی به کیفیت بالای محصول و کارایی عملیات نقش حیاتی دارند را فراهم می‌کنند [۱].

جداکننده‌های هوایی دینامیکی در سه نسل اصلی تکامل یافته‌اند که هر کدام بیانگر پیشرفت‌هایی در طراحی و افزایش کارایی هستند. جداکننده‌های نسل اول که به عنوان جداکننده‌های معمولی یا توربو نیز شناخته می‌شوند، دارای یک فن داخلی و مکانیزم ساده برای گردش جریان هوا هستند، اما از نظر کارایی و کنترل، با محدودیت مواجه هستند. جداکننده‌های نسل دوم با افزودن فن خارجی و سیکلون‌های یکپارچه، کارایی جدایش را نسبت به نسل قبلی افزایش دادند، اما در شرایط عملیاتی متغیر در حفظ کیفیت مطلوب محصول موفق عمل نکردند [۲]. جداکننده‌های نسل سوم که آخرین نسل از جداکننده‌های هوایی بوده و به جداکننده‌های با کارایی بالا (High Efficiency) معروف هستند، با طراحی پیشرفته روتور (قفس گردان) و بهبود گردش جریان هوا با استفاده از فن خارجی و دمپرهای کنترلی، کنترل بیشتری روی کیفیت محصول و پارامترهای عملیاتی فراهم کرده‌اند [۳]. این پیشرفت‌ها به‌طور قابل‌توجهی مصرف انرژی را کاهش، ظرفیت تولید را افزایش و جدایش ذرات ریز را بهبود بخشیدند. به این ترتیب، جداکننده‌های هوایی دینامیکی به تدریج در حال تبدیل شدن به انتخاب اول کارخانه‌های فرآوری مدرن هستند [۴]. تحقیقات در زمینه جداکننده‌های هوایی، به‌طور عمده، با هدف افزایش کارایی جدایش و رفع چالش‌های عملیاتی در صنعت فرآوری مواد معدنی انجام شده‌اند. یکی از اولین دستاوردها در این حوزه توسط هرمن [۵] به دست آمد که کاربرد جداکننده‌های با کارایی بالا در مدار آسیاکنی یک کارخانه سیمان را بررسی کرد. این مطالعه نشان داد که جایگزینی جداکننده‌های سنتی با جداکننده‌های با کارایی

جداکننده طوری طراحی شده است که تقریباً در هر شرایط عملیاتی، در حال کار باقی می‌ماند؛ ولی محصول خروجی مشخصات متفاوتی خواهد داشت. این ویژگی تطبیق‌پذیری آن، تضمین می‌کند که تولید در هر شرایطی ادامه یابد، اما مشخصات محصول از جمله میزان ریزی محصول (عدد بلین) در این شرایط متفاوت خواهد بود. با این حال، دستیابی به عملکرد بهینه و کیفیت و ابعاد مورد قبول محصول، نیاز به کنترل دقیق و رویکرد عملیاتی جامعی دارد.

این پیچیدگی بر اهمیت خصوصیت‌سنجی و عیب‌یابی جداکننده هوایی تأکید دارد. بدون درک روشنی از نحوه تعامل شرایط عملیاتی، کیفیت محصول می‌تواند دچار نوسان شود و کارایی جدایش کاهش یابد. با عیب‌یابی و خصوصیت‌سنجی و بهینه‌سازی فرایندی جداکننده هوایی دینامیکی، پژوهش حاضر سعی در ارائه راهکارهای عملیاتی جهت بهبود استراتژی‌های کنترلی، افزایش کارایی و بهبود کیفیت محصول دارد.

۱-۱ مدار آسیاکنی کارخانه گندله‌سازی گل‌گهر

در این پژوهش، جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، به‌عنوان مطالعه موردی برای عیب‌یابی و خصوصیت‌سنجی انتخاب شد. در این کارخانه، از مدار آسیاکنی خشک استفاده شده است. این مدار شامل سیستم مشعل و خشک‌کنی، آسیای گلوله‌ای، جداکننده هوایی دینامیکی، جداکننده هوایی استاتیکی و غبارگیر کیسه‌ای است. خوراک پس از ورود به بخش خشک‌کنی آسیا، توسط هوای داغ تولیدشده از سیستم مشعل، خشک‌شده و سپس وارد محفظه آسیاکنی می‌شود. مواد پس از خردایش، به‌وسیله یک مکندۀ قوی که در انتهای مدار است، به بیرون از آسیا هدایت می‌شوند. بخشی از مواد که درشت‌تر هستند، به پایین سقوط کرده و توسط بالابر سطلی به جداکننده هوایی دینامیکی منتقل می‌شوند. مواد ریزتر وارد جداکننده هوایی استاتیکی می‌شوند. ته‌ریز این جداکننده، با خوراک جداکننده هوایی دینامیکی مخلوط و سرریز آن نیز به غبارگیر کیسه‌ای وارد می‌شود. در این تجهیز، مواد ریز از جریان هوا جدا شده و به دلیل عدد بلین مطلوب، مستقیماً به محصول نهایی مدار فرستاده می‌شود. در جداکننده هوایی دینامیکی، طبقه‌بندی مواد صورت گرفته و مواد ریز با عدد بلین مطلوب توسط چهار سیکلون هوایی که جزئی از آن هستند، از جریان هوا جدا شده و به‌عنوان

خصوصیت‌سنجی و مدل‌سازی دقیق اثر قلاب-ماهی برای بهینه‌سازی فرایند طبقه‌بندی ذرات ریز، هنوز بطور کامل شناخته و انجام نشده است.

پیشرفت ابزارهای محاسباتی، دید وسیعی درباره دینامیک جداکننده‌ها فراهم کرده است. برای مثال، هوانگ [۱۲] از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای بهینه‌سازی طراحی صفحات راهنمای دور قفس در جداکننده‌های هوایی نوع توربو استفاده کرد و به پایداری و توزیع یکنواخت‌تر جریان هوا دست یافت. ادواردیش و همکاران [۱۳] و اسماعیل‌پور و همکاران [۱۴] این رویکرد را با ترکیب CFD با روش‌های تجربی برای تشریح پدیده اثر قلاب-ماهی و دنباله‌روی ذرات ریز توسعه و نشان دادند که CFD پتانسیل تشخیصی و بهینه‌سازی قابل‌توجهی برای جداکننده‌های هوایی دارد.

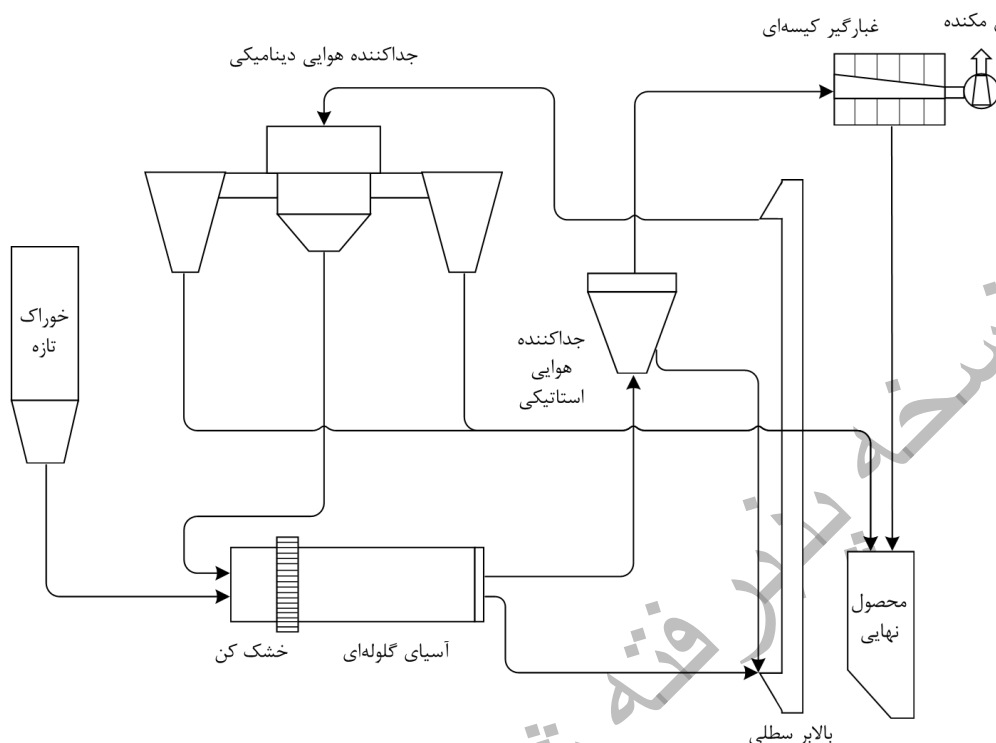
ایجاد تعادل بین بهینه‌سازی مصرف انرژی و عملکرد، همواره یک چالش در طراحی جداکننده‌های هوایی بوده است. گویزانی و همکاران [۴] تأثیر سرعت چرخش قفس گردان بر دقت جدایش و مصرف انرژی را بررسی کردند و دریافتند که سرعت‌های بالاتر، دقت را افزایش می‌دهد، اما افت فشار و مصرف انرژی را بیشتر می‌کند که نیاز به بهینه‌سازی دقیق دارد. آلتون و بنزر [۳] مدل‌های ریاضی را برای برقراری توازن بین شرایط مختلف عملیاتی و طراحی پیشنهاد کردند.

جداکننده هوایی دینامیکی، یک مدل نسل سوم است که به‌عنوان بخش مهمی از مدار آسیای خشک کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این جداکننده که برای طبقه‌بندی دقیق ذرات ریز و درشت طراحی شده است، در صورت کارکرد مطلوب، پایداری، کیفیت محصول و کارایی عملیات را تضمین می‌کند. با این حال، طراحی پیچیده و همبستگی عوامل عملیاتی آن، چالش‌های زیادی برای بهینه‌سازی فرایندی و کنترل آن ایجاد می‌کند.

ویژگی منحصر به فرد جداکننده هوایی دینامیکی، خودتنظیم بودن آن است. این سیستم با چند متغیر قابل‌دستکاری مانند تنظیمات دمپر، زوایای صفحات راهنمای دور قفس و سرعت قفس کار می‌کند، اما تغییرات ناشی از تنظیمات این متغیرها به‌شدت به یکدیگر وابسته‌اند. تنظیم یک پارامتر بر سایر موارد تأثیر می‌گذارد و کنترل را پیچیده و بسیار حساس می‌کند. باوجود این چالش‌ها،

مواد درشت است، برای خردایش بیشتر به همراه خوراک تازه مجدداً به آسیا برگردانده می‌شود (شکل ۱).

محصول نهایی برای عملیات بعدی به سیلوهای ذخیره منتقل می‌شوند. ته‌ریز جداکننده هوایی دینامیکی که شامل

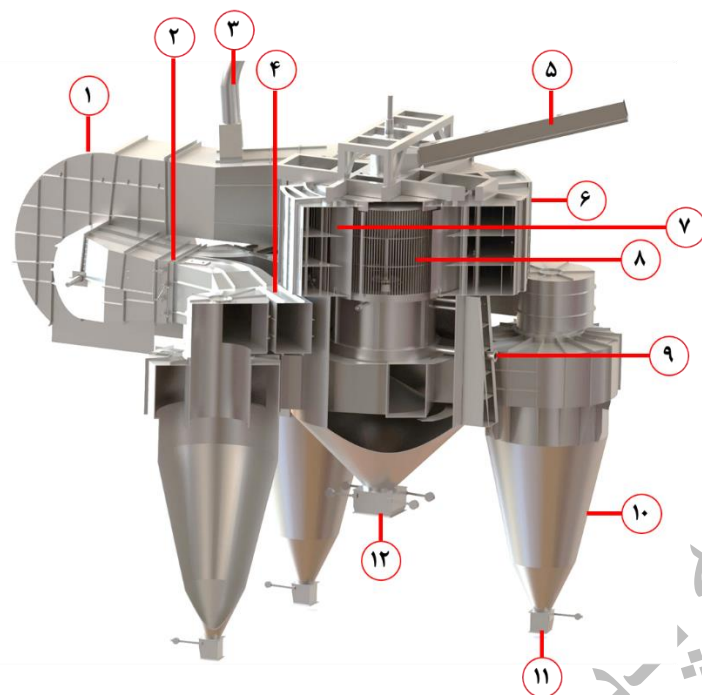


شکل ۱- مدار آسیاکنی کارخانه گندله‌سازی گل‌گهر

از مواد را تشکیل می‌دهند. سرعت چرخش قفس، حد جدایش قفس را تعیین می‌کند، به‌طوری که افزایش سرعت باعث کاهش احتمال ورود ذرات به قفس و در نتیجه کاهش حد جدایش و ابعاد محصول نهایی می‌شود. در اطراف قفس، جریان هوایی وجود دارد که از طریق یک فن با دور ثابت به این ناحیه دمیده می‌شود. این جریان هوا از میان یک سری صفحات منحنی‌شکل (صفحات راهنما) به اطراف قفس هدایت می‌شود (شکل ۲).

۲-۱ نحوه کار جداکننده هوایی دینامیکی

بخش اصلی جداکننده هوایی دینامیکی گل‌گهر یک روتور (قفس گردان) است. خوراک از یک کانال وارد جداکننده شده و روی صفحه توزیع‌کننده روی قفس ریخته می‌شود. با چرخش قفس، ذرات خوراک در اثر نیروی گریز از مرکز به سمت اطراف قفس پخش شده و یک پرده نازک



- | | | | |
|-------------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| ۱- فن | ۲- دمپر | ۳- لوله غبارگیر | ۴- کانال سرریز سیکلون |
| ۵- ورودی خوراک | ۶- محفظه حلزونی | ۷- صفحات راهنما | ۸- قفس گردان |
| ۹- لوله هوای تازه | ۱۰- سیکلون | ۱۱- دریچه تخلیه سیکلون | ۱۲- خروجی محصول درشت |

شکل ۲- نمایشی از جزئیات مدل سه بعدی جداکننده هوایی دینامیکی گل‌گهر

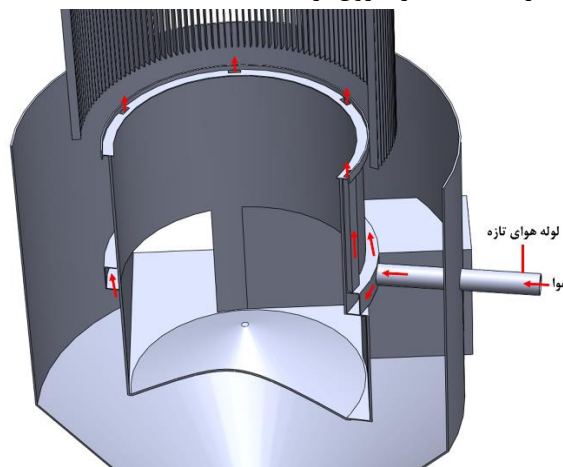
ریز است. ته ریز این سیکلون‌ها، محصول ریز نهایی است. از آنجاکه در این جداکننده یک سیکل بسته از هوا در جریان است، هوای بازیابی شده از سرریز سیکلون‌ها، توسط فن مکش شده و مجدداً به هرون سیستم دمیده می‌شود. در ته‌ریز هر سیکلون، دریچه پاندولی جهت تخلیه ذرات ریز و هواوند کردن این ناحیه وجود دارند. این دریچه‌ها با استفاده از وزنه‌های قابل تنظیم، زمانی باز می‌شوند که مواد کافی روی آن‌ها جمع شده باشد. پس از تخلیه و در اثر نیروی وزنه، دریچه‌ها بلافاصله بسته می‌شوند تا عمل تخلیه و هواوندی به صورت پیوسته انجام شود و از ورود هوای اضافی به ته‌ریز سیکلون از این ناحیه جلوگیری شود.

بعد از فن و قبل از محفظه حلزونی، یک لوله خروجی از سیستم وجود دارد که به یک غبارگیر کیسه‌ای متصل است. غبارگیر کیسه‌ای، گردوغبار را از نقاط مختلفی در کارخانه از جمله بالابرهای سطلی (یکی در حال کار و دیگری آماده به کار)، جداکننده هوایی و کانال‌های هواروی محصول، خارج می‌کند. سرعت فن مکنده غبارگیر کیسه‌ای ثابت است و برای خارج کردن گردوغبار از نقاط محدود طراحی شده

قفس گردان توسط یک محفظه حلزونی شکل احاطه شده و جریان هوا را در جداکننده هدایت می‌کند. طراحی حلزونی شکل این محفظه به گونه‌ای است که اتلاف سرعت هوا که از برخورد با دیواره‌ها و خمیدگی‌ها ناشی می‌شود را با کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت هوا جبران می‌کند. ارتفاع محفظه حلزونی به وسیله دو صفحه سراسری به سه طبقه مساوی تقسیم می‌شود و میزان هوای ورودی به هر طبقه، توسط دمپرهایی که در ابتدای هر طبقه قرار دارد، تنظیم می‌شود تا جریان هوا را مستقیم کرده و توزیع یکنواختی را در ارتفاع محفظه ایجاد کند. بدین ترتیب، از ایجاد جریان آشفته و گردابی در طبقات حلزونی جلوگیری می‌شود.

بخشی از مواد که به درون قفس راه پیدا می‌کنند، به عنوان محصول ریز برای بازیابی هوا به چهار سیکلون که زیر قفس هستند، منتقل می‌شوند. موادی که به داخل قفس راه پیدا نکرده و از اطراف آن به پایین ریخته‌اند، به عنوان محصول درشت، برای خردایش مجدد به آسیای ابتدای مدار بازگردانده می‌شوند. وظیفه سیکلون‌ها، بازیابی هوا از ذرات

سیستم به داخل آن مکش شود. به همین منظور و جهت جبران این حجم هوای ازدست‌رفته، یک لوله (لوله هوای تازه) که به محیط بیرون از تجهیز راه دارد، در زیر قفس قرار گرفته است تا هوا را به داخل مکش کند. این جریان هوا به عدم نشست ذرات ریز و ساینده در زیر قفس و جلوگیری از سایش این قسمت در اثر چرخش کمک می‌کند. همچنین، خنک‌کاری یاتاقان قفس را نیز انجام می‌دهد که از فرسایش آن جلوگیری کرده و عمر مفید جداکننده را افزایش می‌دهد (شکل ۳).



شکل ۳- نمایشی از لوله هوای تازه زیر قفس گردان و مسیر جریان هوا

سازنده و در محیط نرم‌افزار طراحی صنعتی SolidWorksTM ترسیم و اطمینان حاصل شد که هر جزء با دقت بالا نشان داده شود (شکل ۲). این مدل سه‌بعدی نه‌تنها نمایشی بصری و ساختاری از جداکننده ارائه می‌دهد، بلکه به شناسایی مناطق با پتانسیل بهینه‌سازی و بهبود عملکرد نیز کمک می‌کند.

۲-۲ شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته (راگ؛ DEM)

یکی از عوامل کلیدی که بر کارایی جداکننده هوایی تأثیر می‌گذارد، توزیع یکنواخت مواد روی صفحه توزیع‌کننده خوراک و تشکیل پرده نازک و یکنواخت مواد در اطراف قفس برای جدایش مؤثر است. توزیع یکنواخت مواد از تجمع یک‌طرفه در صفحه توزیع‌کننده جلوگیری می‌کند. چنین تجمعی می‌تواند جریان هوا را مسدود کرده و یا جداسازی ذرات ریز را مختل کند. برعکس، نواحی خالی از مواد، مسیرهای با مقاومت کم ایجاد می‌کنند که باعث می‌شود

است. لوله غبارگیر روی جداکننده هوایی، ذرات غبار را که از طریق سرریز سیکلون‌ها به اشتباه به درون سیستم برگشته‌اند، به سمت غبارگیر کیسه‌ای هدایت می‌کند. تنظیم دقیق دمپر موجود در ابتدای این لوله، از ایجاد مکش بیش از حد که می‌تواند تعادل فشار درون جداکننده را مختل کرده و کارایی آن را کاهش دهد، جلوگیری می‌کند.

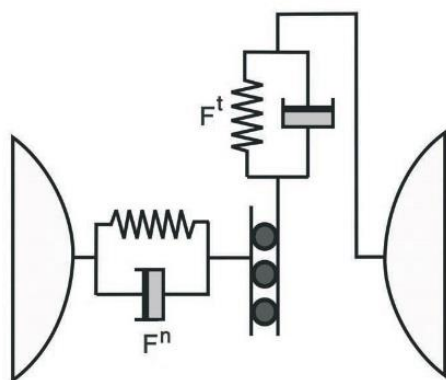
این لوله به همراه ذرات ریز، بخشی از هوای موجود در سیستم را به بیرون مکش می‌کند؛ بنابراین به دلیل اینکه در این تجهیز، یک سیکل بسته از حجم ثابت هوا جریان دارد، نیاز است تا این حجم هوای ازدست‌رفته مجدداً از بیرون از

مهم‌ترین مشخصه کاری این جداکننده، سرعت هوای در گردش است که به‌وسیله تغییر میزان بازشدگی و نحوه چینش دمپر قبل از فن، کنترل می‌شود. در این تجهیز که پیچیدگی زیادی دارد، تعداد عوامل قابل‌دستکاری جهت کنترل عملکرد آن نیز بسیار کم و شامل موقعیت دمپرها، چینش صفحات راهنما و سرعت چرخش قفس است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱ ترسیم مدل هندسی جداکننده هوایی

جداکننده هوایی دینامیکی یک سیستم پیچیده با جزئیات زیاد است که بازدید مستقیم از برخی اجزای آن ممکن نیست و این موضوع، شناخت و تحلیل دقیق ساختار داخلی آن را با چالش‌هایی مواجه می‌کند. برای تسهیل درک جامع از عملکرد آن و امکان شبیه‌سازی‌های دقیق CFD و DEM، یک مدل هندسی سه‌بعدی از این تجهیز با جزئیات کامل و دقیق، با استفاده از نقشه‌های فنی ارائه شده توسط



شکل ۴- مدل نیروی برخورد فنر-میراگر
[۱۵]

با داشتن مقدار جرم گلوله‌ها و محاسبه‌ی مؤلفه‌های نیرو با استفاده از روابط ۶ و ۷، مقادیر شتاب در جهت عمودی و مماسی و به دنبال آن سرعت و موقعیت جدید ذرات محاسبه می‌شود. به طور خلاصه، الگوریتم نحوه‌ی انجام محاسبات در شبیه‌سازی با راگ در شکل ۵ آمده است.

برای تعیین مقدار نیروی کل وارده به ذرات، تعیین دقیق توابع سختی (K) و میرایی (C) از اهمیت زیادی برخوردار است. این توابع که در قالب مدل‌های نیروی برخورد ارایه می‌شوند، یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که بر دقت نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذراند و اعتبار شبیه‌سازی را تحت شعاع قرار می‌دهند. از این رو، تاکنون مدل‌های نیروی برخورد زیادی، با هدف نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی با واقعیت ارایه شده است [۱۶]. از بین مدل‌های نیروی برخورد ارایه شده، دو مدل نیروی برخورد خطی و هرتز-میندلین بیشترین کاربرد را دارند و در بسیاری از نرم‌افزارهای راگ‌بنیان از این دو مدل استفاده می‌شود [۱۷].

جریان هوا با عبور از آن قسمت‌ها، به طور کامل از مواد عبور نکند و کارایی جدایش کاهش یابد.

شبیه‌سازی به روش اجزای گسسته (راگ؛ DEM) برای تحلیل نحوه توزیع مواد بر روی صفحه توزیع‌کننده بالای قفس گردان با استفاده از نرم‌افزار ایرانی بر پایه DEM به نام KMPC-DEM انجام شد.

در راگ، موقعیت ذرات (X) زمانی که به صورت آزادانه در محیط حرکت کنند، بر اساس سرعت آن‌ها (V) و شتاب گرانش (g)، در هر لحظه محاسبه می‌گردد (روابط ۱ و ۲).

$$X = V\Delta t \quad (۱)$$

$$V = g\Delta t \quad (۲)$$

اما در صورتی که ذرات با یکدیگر برخورد داشته باشند، علاوه بر شتاب گرانش، شتابی دیگر که ناشی از نیروی برخورد است (رابطه ۳)، به آنان وارد شده و سرعت جدید این ذرات، با این شتاب محاسبه می‌گردد (رابطه ۴). این نیرو خود شامل دو مؤلفه‌ی عمودی (F^n) و مماسی (F^t) است (رابطه ۵). در این حالت ابتدا، میزان همپوشانی (Δx) هر یک از ذرات محاسبه می‌گردد. همپوشانی، میزان نفوذی است که دو ذره در اثر برخورد، پیدا می‌کنند. متناسب با میزان همپوشانی و با استفاده از مدل نیروی برخورد، نیروی اعمالی به هر یک از ذرات محاسبه می‌شود.

$$a = \frac{F}{m} + g \quad (۳)$$

$$V = a\Delta t \quad (۴)$$

$$F = F^n + F^t \quad (۵)$$

در این روابط a شتاب ذره، F نیروی برخورد و m جرم ذره است.

در تمام روابط، اندیس‌های n ، t و rel به ترتیب معرف مؤلفه‌های مماسی، عمودی و نسبی هستند.

فرضیاتی برای ساده‌سازی محاسبات در راگ در نظر گرفته می‌شود. از جمله این فرضیات شبیه‌سازی نیروی برخورد بین دو ذره با استفاده از مدل فنر-میراگر است (شکل ۴).

در مدل فنر-میراگر، مؤلفه‌های عمودی (F^n) و مماسی (F^t) نیروهایی که به ذرات وارد می‌شود، با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود. در این روابط، K تابع سختی برخورد و C تابع میرایی برخورد است.

$$F^n = K^n \int \Delta x^n + C^n V_{rel}^n \quad (۶)$$

$$F^t = K^t \int \Delta x^t + C^t V_{rel}^t \quad (۷)$$

۳-۲ شبیه‌سازی سیالاتی به روش CFD

برای بررسی نحوه توزیع سرعت جریان هوا در محفظه حلزونی و دمپره‌های قبل از فن، شبیه‌سازی به روش CFD با استفاده از نرم‌افزار Ansys FluentTM انجام شد. با توجه به ماهیت جریان در جداکننده هوایی، مسیرهای پیچیده و چرخشی و تغییرات گرادیان فشار در بخش‌های مختلف آن، از مدل‌سازی دقیق‌تری برای تحلیل رفتار جریان استفاده شد که در ادامه، خلاصه‌ای از روند آن آمده است. مدل‌سازی جریان با فرضیات جریان آشفته، تراکم‌ناپذیر و پایدار انجام گرفت.

۳-۲-۱ معادلات حاکم

معادله پیوستگی بیان می‌کند که نرخ تغییرات چگالی در یک حجم کنترلی برابر با نرخ ورودی و خروجی جرم از آن حجم است و به صورت رابطه ۸ نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (8)$$

با توجه به فرض تراکم‌ناپذیری، چگالی ثابت فرض شده و معادله به صورت ساده‌تر در می‌آید (رابطه ۹).

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (9)$$

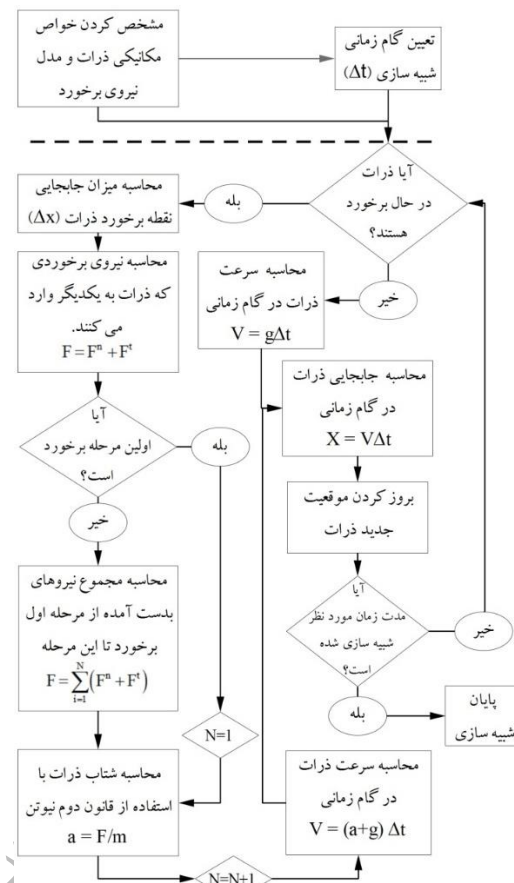
معادلات مومنتوم (معادلات ناویر-استوکس) برای یک سیال تراکم‌ناپذیر در جهت i به شکل رابطه ۱۰ نوشته می‌شوند.

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (10)$$

که در آن، ρ چگالی سیال، $\mathbf{v}$ مولفه‌های سرعت، P فشار، μ ویسکوزیته دینامیکی و F نیروهای حجمی مانند گرانش هستند.

مدل تنش رینولدز (Reynolds Stress Model-RSM) برای شبیه‌سازی آشفتگی انتخاب شد. این مدل به جای استفاده از فرضیات گردابه‌های همسانگرد در مدل‌های $k - \varepsilon$ و $k - \omega$ ، مستقیماً معادلات مربوط به تنش‌های رینولدز را حل می‌کند و دقت بالاتری برای جریان‌های چرخشی دارد. معادله تنش رینولدز به صورت رابطه ۱۰ تعریف می‌شود:

$$\frac{RD_{ij}}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} + \phi_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (11)$$



شکل ۵- الگوریتم انجام محاسبات در

شبیه‌سازی با راگ

جزئیات دقیق روش DEM و مدل‌های ارائه شده در این نرم‌افزار در منابع دیگر آمده است [۱۸، ۱۹]. مدل برخورد مورد استفاده در این شبیه‌سازی از نوع خطی فرض شده است. سایر ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی راگ

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۰٫۲۴	مگاپاسکال
ضریب استرداد	۰٫۱	
ضریب اصطکاک غلتشی	۰٫۱۵	
ضریب اصطکاک ایستایی	۰٫۲	
گام زمانی	۱۰×۱۰ ^{-۷}	ثانیه
نسبت پواسون	۰٫۲۵	
چگالی ذرات	۲۴۰۰	کیلوگرم بر متر مکعب
توزیع ابعادی ذرات	۰٫۵ - ۰٫۱	میلی متر
تعداد کل ذرات	۱۵۴۶۰	

ورودی سرعت هوا به محفظه حلزونی و دمپر قبل از فن به مقدار ۲۱ متر بر ثانیه ($v = 21 \text{ m/s}$) در نظر گرفته شد که منعکس‌کننده سرعت هوا در حداکثر بازشدگی دمپر مطابق نمودارهای سازنده فن است. شرط خروجی نیز فشار محیطی بود ($P = P_{atm}$) که به صورت مشترک در هر دو مورد شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. در خصوص دیواره‌ها نیز شرط عدم لغزش ($v = 0$) در تمام سطوح جامد در نظر گرفته شد.

۲-۴ پایش و اندازه‌گیری، مشاهدات فیزیکی و اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد جداکننده هوایی، ترکیبی از مشاهدات فیزیکی، پایش مداوم تجهیز و نمونه‌برداری به کار گرفته شد. حضور مداوم در کارخانه امکان تصویربرداری منظم و بررسی اجزای حیاتی مانند محفظه حلزونی، صفحات راهنما و قفس گردان و بررسی الگوهای سایش، تجمع مواد و اثرات تغییر شرایط عملیاتی را فراهم کرد.

برای مقایسه عددی میزان سایش، اندازه‌گیری‌هایی با تمرکز بر نواحی با پتانسیل بالای سایش مانند قفس گردان و کانال‌ها انجام شد.

پایش مداوم فشار درون جداکننده هوایی، نقش حیاتی در درک عملکرد این سیستم ایفا می‌کند. به همین منظور از یک فشارسنج دیجیتال کالیبره شده (محدوده: منفی ۳۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌بار؛ دقت: ۰/۰۱ میلی‌بار) برای اندازه‌گیری اختلاف فشار داخل جداکننده نسبت به محیط بیرون استفاده شد. اندازه‌گیری این فشار، یک مرحله کلیدی برای پی بردن به تأثیر تغییر بازشدگی دمپر، تغییر فشار غبارگیر کیه‌ای و تغییرات جریان هوا بر عملکرد جداکننده و کارایی کلی آن محسوب می‌شود.

برای تحلیل توزیع اندازه و مشخصه‌های مواد تجمع‌یافته در محفظه حلزونی جداکننده، نمونه‌هایی از این قسمت جمع‌آوری شد. جهت بررسی ابعاد این ذرات، به دلیل ماهیت بسیار ریز آن‌ها از روش آنالیز لیزری ذرات (LPSA) استفاده شد.

برای تحلیل نحوه تجمع ذرات در محفظه حلزونی، جریان هوا با استفاده از روش CFD شبیه‌سازی شد و حرکت ذرات به عنوان تابعی از الگوی جریان استنتاج گردید. با توجه به این که ذرات در محفظه حلزونی بسیار ریز و سبک هستند

که در آن D_{ij} و P_{ij} و ϕ_{ij} و ε_{ij} به ترتیب بیانگر نفوذ تنش رینولدز، تولید تنش رینولدز ناشی از گرادیان سرعت، اثر فشار-کرنش و نرخ اتلاف انرژی توسط ویسکوزیته هستند.

۲-۳-۲ آزمون استقلال از شبکه

برای بررسی دقت حل عددی، آزمون استقلال از شبکه به روش GCI (Grid Convergence Index) انجام شد. چهار شبکه با تعداد المان‌های مختلف برای محفظه حلزونی (۱، ۲، ۴ و ۸ میلیون) و چهار شبکه برای دمپرهای قبل از فن (۰/۵، ۱، ۲ و ۴ میلیون) مورد بررسی قرار گرفتند. معیار انتخاب شبکه بهینه، پایداری مقدار سرعت و افت فشار در هر شبکه بود.

با افزایش تعداد المان‌های شبکه، تغییرات در مقدار سرعت و افت فشار کاهش یافت. مقدار GCI بین دو شبکه‌ی ۴ و ۸ میلیون المانی برای محفظه حلزونی، مقدار ۰/۹ درصد و بین شبکه‌های ۲ و ۴ میلیون المانی برای دمپر، مقدار ۱/۲ درصد را نشان داد (جدول ۲). این نتایج نشان داد که دقت حل عددی با این شبکه‌ها به حد مطلوب رسیده و افزایش بیشتر تعداد المان‌ها تأثیر قابل توجهی بر نتایج ندارد. نتایج نشان داد که استفاده از شبکه‌ی ۴ میلیونی برای محفظه حلزونی و شبکه‌ی ۲ میلیونی برای دمپر، تعادل مناسبی بین دقت و هزینه محاسباتی ایجاد می‌کند. علاوه بر این، همگرایی حل عددی در تمامی شبکه‌ها بررسی شد. با کاهش باقی‌مانده‌ها (Residuals) به مقادیر کمتر از 10^{-4} ، اطمینان حاصل شد که حل عددی به همگرایی رسیده است.

جدول ۲- مقایسه‌ی پارامترهای کلیدی آزمون استقلال از شبکه در تعداد المان‌های مختلف

تعداد المان (میلیون)	سرعت میانگین (متر بر ثانیه)	افت فشار (کیلوپاسکان)
۱	۱۸/۴	۱۲۰
۲	۲۰/۲	۱۳۵
۴	۲۱/۰	۱۴۰
۸	۲۱/۲	۱۴۲

۲-۳-۳ شرایط مرزی

با توجه به یکنواختی سرعت در سرتاسر جداکننده و با توجه به شرایط عملیاتی معمول، شرایط مرزی شامل یک

۳- نتایج و بحث

۳-۱ استراتژی کنترلی مطلوب سرعت قفس و تأثیر آن بر ابعاد محصول

بخش اصلی جداکننده هوای دینامیکی، روتور یا قفس گردان است که در ورودی جداکننده قرار دارد و جداسازی ذرات ریز و درشت را انجام می‌دهد. در طراحی هر جداکننده، یک حد جدایش در نظر گرفته می‌شود که به عنوان معیاری برای بررسی عملکرد آن است. حد جدایش در این تجهیز توسط سرعت چرخش قفس تعیین می‌شود. افزایش سرعت قفس منجر به تولید محصول ریزتر می‌شود؛ بنابراین، برای دستیابی به یک محدوده مطلوب برای حد جدایش، حفظ سرعت ثابت قفس بسیار مهم است. سرعت قفس به طور مستقیم بر بار در گردش جداکننده نیز تأثیر می‌گذارد.

جهت بررسی تأثیر سرعت چرخش قفس بر ابعاد محصول و حد جدایش، دو استراتژی کنترلی آزمایش شد. در اولین استراتژی، متغیر قابل دستکاری، سرعت قفس و متغیر تحت کنترل، بار در گردش جداکننده بود. تناژ خوراک تازه وارد شده به آسیای گلوله‌ای در یک محدوده ثابت نگه داشته و بار در گردش با تنظیم مداوم سرعت قفس در یک محدوده خاص حفظ شد.

در استراتژی دوم، متغیر قابل دستکاری تناژ خوراک تازه، متغیر تحت کنترل بار در گردش و سرعت قفس نیز ثابت نگه داشته شد. برای جبران تغییرات و حفظ تناژ کل خوراک وارد شده به آسیا (مجموع بار در گردش و خوراک تازه)، تناژ خوراک تازه تنظیم شد.

نمونه برداری در طول زمان و در شرایط عملیاتی پایدار برای اندازه‌گیری عدد بلین که نشان‌دهنده میزان ریزی محصول است، انجام شد. میانگین عدد بلین اندازه‌گیری شده محصول نهایی در حالت سرعت متغیر قفس، 1154 ± 240 سانتی‌متر مربع بر گرم بود که نوسانات قابل توجهی را نشان داد. در مقابل، حالت سرعت ثابت قفس منجر به عدد بلین پایدارتر و محصول ریزتر با میانگین 1195 ± 72 سانتی‌متر مربع بر گرم شد که نشان‌دهنده نوسانات کمتر در اندازه محصول است (شکل ۶). به عبارت دیگر، انحراف معیار نسبی عدد بلین محصول از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت. افزایش مطلق در عدد بلین با سطح اطمینان ۹۳ درصد تنها ۴۱ واحد بود، اما کاهش قابل توجه در انحراف معیار از ۱۲۰

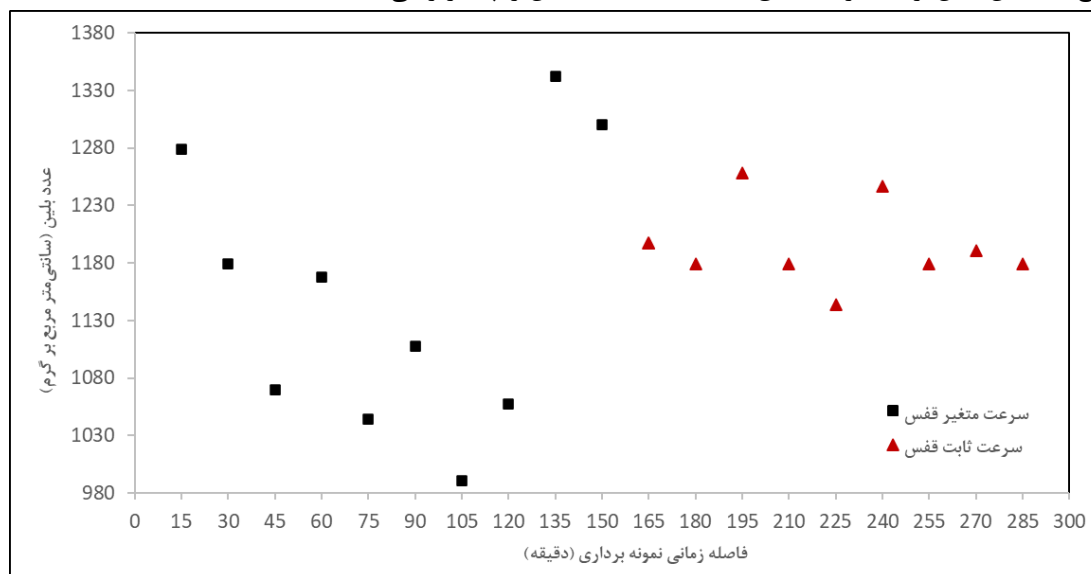
و درصد پاییی از کل جریان را شامل می‌شوند، مسیر حرکت و نحوه تجمع آن‌ها مستقیماً با خطوط جریان هوا مرتبط در نظر گرفته شد و مدل‌سازی تأثیر متقابل بین فازهای گاز و جامد انجام نشد. این رویکرد، علاوه بر کاهش پیچیدگی محاسباتی، امکان ارزیابی غیرمستقیم الگوی توزیع ذرات را از طریق تحلیل جریان هوا فراهم کرد. از آنجا که هدف از انجام شبیه‌سازی، صرفاً مقایسه حالت‌های قبل و بعد از اعمال تغییرات بود، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی CFD از طریق مشاهده و تصویربرداری مستقیم از نحوه تجمع و نشست مواد در محفظه حلزونی و مطابقت دادن آن با پروفیل‌های سرعت جریان سیال در این منطقه انجام شد و از این طریق، از صحت نتایج شبیه‌سازی و در نظر گرفتن فرضیات در روش مذکور، اطمینان حاصل شد.

در شبیه‌سازی توزیع خوراک به روش DEM نیز به دلیل اینکه توزیع ذرات روی صفحه توزیع‌کننده عمدتاً تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش قفس گردان قرار دارد و جریان هوا در این ناحیه تأثیر ناچیزی دارد، از مدل‌سازی تک‌فازی DEM استفاده شد. برای اعتبارسنجی این نتایج، مشاهدات مستقیم از طریق دریچه‌های بازدید انجام گرفت و الگوی توزیع ذرات در طرح اولیه با شبیه‌سازی‌ها مقایسه و مطابقت داده شد.

به دلیل محدودیت‌های فنی و عملیاتی در اندازه‌گیری مستقیم رفتار ذرات و جریان هوا در کارخانه و همچنین استفاده مقایسه‌ای از نتایج، اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی‌های CFD و DEM بر اساس مشاهدات مستقیم، عکس‌برداری و مقایسه آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی انجام شد. این روش، در محیط‌های صنعتی نسبت به روش‌های اندازه‌گیری دقیق‌تر، از نظر محاسباتی مقرون به صرفه‌تر و از نظر عملی قابل اجرا بوده و امکان بررسی صحت مدل‌سازی را بدون نیاز به ابزارهای پیچیده اندازه‌گیری فراهم کرده است. به عبارت دیگر، نتایج به‌کارگیری این روش‌های ترکیبی، امکان ارزیابی دقیق کارایی جداکننده، بررسی نقاط مستعد جهت انجام بهینه‌سازی، تأثیر سایش اجزا و تغییر شرایط عملیاتی بر عملکرد سیستم را فراهم کرد.

در نتیجه مشخص شد که حفظ سرعت ثابت قفس، استراتژی کنترلی مطلوب برای جداکننده است. زیرا نوسانات در اندازه محصول جداکننده را به حداقل رسانده و عملکرد آن را پایدارتر می‌کند.

به ۳۶ واحد باعث ایجاد کیفیت محصولی پایدارتر می‌شود. آزمون F (فیشر) نشان داد که هنگام استفاده از استراتژی سرعت ثابت قفس، کاهش در واریانس عدد بلین اندازه‌گیری شده با سطح اطمینان بیش از ۹۹ درصد اتفاق افتاده است.



شکل ۶- تأثیر سرعت ثابت و متغیر قفس گردان بر نوسانات عدد بلین (میزان ریزی محصول) جداکننده

برای مقایسه عددی نحوه توزیع مواد، لبه صفحه توزیع‌کننده به ۵۱ قطاع تقسیم شد. در طول شبیه‌سازی، تعداد ذرات عبوری از هر قطاع اندازه‌گیری شد. داده‌های به‌دست‌آمده برای رسم نمودار توزیع استفاده شد که هر نقطه نشان‌دهنده تعداد ذرات عبوری از آن است. هرچه یک نقطه از مرکز صفحه دورتر باشد، تعداد مواد عبور کرده از آن بیشتر است. به عنوان مثال، در شکل ۷-الف، تعداد ذرات عبوری از قطاع ۱۴ برابر با ۱۳۴ ذره است، در حالی که این تعداد برای قطاع ۲۴ برابر با ۷۵ ذره است. این تعداد در شکل ۷-ب که به طراحی اصلاح شده تعلق دارد، ۹۵ ذره برای قطاع ۱۴ و ۹۳ ذره برای قطاع ۲۴ است.

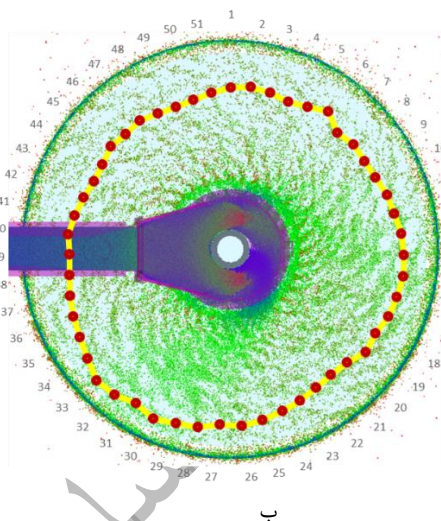
هرچه تفاوت بین تعداد ذرات عبوری از قطاع‌های مختلف کمتر باشد و تعداد ذرات به هم نزدیک‌تر باشد، یا به عبارت دیگر، هرچه انحراف معیار توزیع ذرات عبوری از قطاع‌ها کمتر باشد، نشان‌دهنده نوسان کمتر و توزیع یکنواخت‌تر ذرات بر روی صفحه توزیع‌کننده است. نتایج شبیه‌سازی DEM طرح اصلی خوراک‌دهنده و نمودار توزیع رسم شده، عدم یکنواختی قابل‌توجهی در جریان مواد را نشان داد.

نکته مهم در مورد شبیه‌سازی با طرح فعلی این است که نتایج شبیه‌سازی به شدت به ضرایب استفاده شده در روش

۲-۳ اصلاح نحوه خوراک‌دهی به جداکننده جهت توزیع یکنواخت خوراک روی سینی

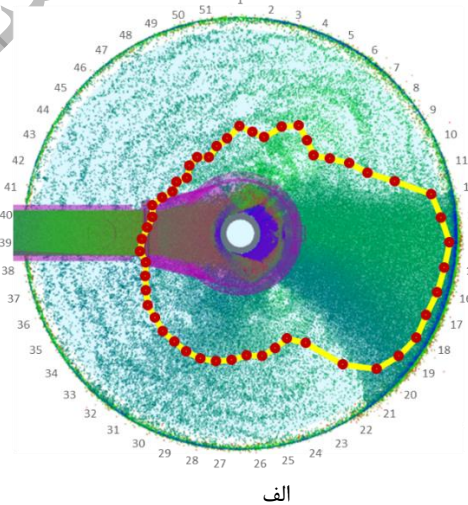
نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده بالای قفس گردان از طریق خوراک‌دهنده، یکی از عوامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش در جداکننده هوایی دینامیکی است. نتایج شبیه‌سازی DEM برای طرح فعلی خوراک‌دهنده نشان داد که توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده به صورت غیریکنواخت است و منجر به تجمع مواد به صورت یک‌طرفه شده و از کل فضای مفید صفحه توزیع استفاده نمی‌شود (شکل ۷-الف). این نوع توزیع باعث می‌شود در اطراف قفس که باید ذرات به صورت یک پرده نازک یکنواخت پخش شوند، در یک قسمت پرده ضخیمی از مواد تشکیل شود و در قسمت مقابل، پرده مواد وجود نداشته و خالی بماند. در این صورت، چون جریان هوا توانایی عبور از قسمت ضخیم را ندارد، ذرات موجود در این قسمت کمتر در معرض نیروی ناشی از جریان هوا قرار گرفته و در معرض جدایش قرار نمی‌گیرند. همچنین، منطقه‌ای با مقاومت پایین در قسمت خالی از مواد ایجاد شده که اجازه عبور بیشتر جریان هوا از آن قسمت را می‌دهد و باعث عدم توزیع هوا در اطراف قفس به عنوان یک عامل جدایش می‌شود.

میلی‌متر نسبت به مرکز سینی به صورت یکنواخت روی سینی جوشکاری می‌شوند. علاوه بر آن تعداد ۳۰ عدد دیسک دیگر با همین مشخصات روی محیط یک دایره به قطر ۱۲۰۰ میلی‌متر جوشکاری می‌شود. نحوه قرارگیری این دو ردیف از دیسک‌ها باید به نوعی باشد که دیسک‌های بیرونی بین دو دیسک از ردیف داخلی قرار بگیرد. به عبارت دیگر، این دو ردیف قرار است یک مانع موقت و کوتاه مدت برای ریزش مواد ایجاد کرده و مواد را تا آنجا که امکان دارد پخش کنند. لذا باید نحوه قرارگیری دیسک‌های ردیف دوم به نحوی باشد که مواد به راحتی نتوانند از بین دو دیسک متوالی ردیف اول راه میانبر پیدا کنند. در عمل، چینش دیسک‌ها در ردیف دوم باید با اختلاف ۶ درجه نسبت به ردیف اول انجام شود. از مزایای این طرح می‌توان به اجرای ساده و کم هزینه، توزیع یکنواخت مواد روی سینی و عدم تاثیرپذیری زیاد از تغییر خواص مواد (اصطکاک و چسبندگی) اشاره کرد. نتایج شبیه‌سازی DEM با استفاده از طراحی اصلاحی نشان داد که نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع به طور قابل توجهی بهبود یافته است (شکل ۷-ب).



اجزای گسسته مانند ضریب استرداد، ضریب اصطکاک ایستایی و غلتشی وابسته است. از آنجا که نوسان در نوع و خواص بار ورودی به این تجهیز اجتناب‌ناپذیر است، لذا نتایجی که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، تنها مربوط به یکی از حالت‌های توزیع مواد در طول عملیات است. در سایر شبیه‌سازی‌ها با تغییر ضرایب مورد استفاده در شبیه‌سازی که باعث تغییر خواص مواد می‌شود، مشاهده شد که الگوی ریزش مواد روی صفحه توزیع‌کننده تغییر می‌کند. اما وجه اشتراک در همه شبیه‌سازی‌ها این بود که در هیچ‌کدام از شرایط، توزیع مواد روی سینی یکنواخت نمی‌شود. بنابراین با توجه به اینکه الگوی ریزش مواد دائماً در حال تغییر است، باید طرح اصلاحی به نوعی باشد که با وجود تغییر خواص مواد، توزیع مواد روی سینی همچنان به صورت کاملاً همگن و یکنواخت باشد.

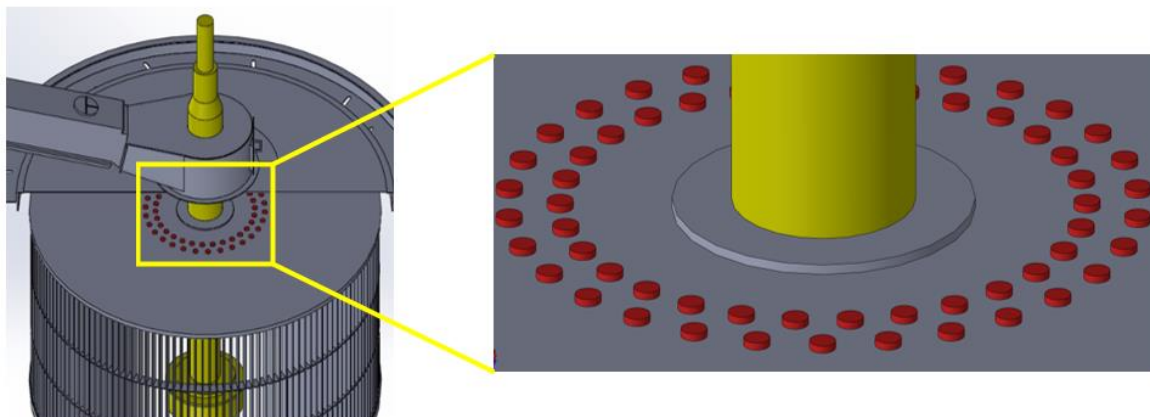
برای رفع مشکل توزیع غیریکنواخت خوراک، یک طرح اصلاحی خوراک‌دهنده پیشنهاد شد که در آن تعداد ۳۰ دیسک (دیسک‌های قرمز رنگ در شکل ۸) به قطر ۵۰ و ضخامت ۱۵ میلی‌متر روی محیط یک دایره به قطر ۱۰۰۰



شکل ۷- نتایج شبیه‌سازی DEM و نمودار توزیع ذرات روی صفحه توزیع‌کننده خوراک در (الف) طراحی فعلی و (ب) طراحی پیشنهادی (خط زرد و نقاط قرمز نشان‌دهنده نمودار توزیع ذرات هستند)

صفحه توزیع‌کننده خوراک از ۳۰ درصد به ۵ درصد کاهش و بهبود یافته است.

مقایسه میانگین و انحراف معیار توزیع ذرات بر روی صفحه توزیع‌کننده نشان داد که یکنواختی توزیع افزایش یافته است، به‌طوری‌که انحراف معیار نسبی توزیع ذرات روی



شکل ۸- نمایشی از طراحی پیشنهادی خوراک‌دهنده جداکننده هوایی (دیسک‌های قرمز رنگ روی صفحه توزیع‌کننده)

سیکلون، بازیابی هوا از طریق سرریز و برگرداندن آن به چرخه جداکننده هوایی است و به طور ایده‌آل، هیچ ذره‌ای نباید در این جریان وجود داشته باشد. زیرا جدایش مواد در جداکننده هوایی، وظیفه قفس گردان است؛ بنابراین، تمام جدایش باید به قفس محدود شود و سیکلون فقط به‌عنوان بازیابی‌کننده هوا عمل کند.

با این حال، حضور ذرات ریز در محفظه حلزونی نشان داد که علاوه بر هوا، ذرات ریز هم در جریان هوای سرریز سیکلون وجود دارند. با توجه به ماهیت ریز این ذرات می‌توان نتیجه گرفت که حضور آنها عمدتاً به دلیل پدیده دنباله‌روی جریان هوا (اثر قلاب ماهی) است. اما از طرفی، حجم قابل توجه این ذرات نشان از این است که علاوه بر پدیده اجتناب‌ناپذیر دنباله‌روی، مشکل دیگری نیز وجود دارد که کارایی سیکلون را کاهش داده و باعث می‌شود که حجم بیشتری از این ذرات از طریق سرریز سیکلون به چرخه جداکننده راه پیدا کنند.

با بررسی‌های انجام شده، مشخص شد که علت کاهش کارایی سیکلون، تخلیه نادرست مواد از طریق ته ریز سیکلون است که اجازه می‌دهد هوای اضافی از ته ریز وارد سیکلون شود. این مسئله باعث ایجاد تلاطم و نقص در جریان گردابی (که برای جدایش هوا از ذرات ریز محصول ضروری است) می‌شود و ذرات ریز بیشتری را به همراه هوا از سرریز سیکلون خارج می‌کند. منشأ آن نیز نقص در عملکرد وزنه‌های متصل به دریچه پاندولی است که تخلیه مواد از ته ریز سیکلون را تنظیم می‌کنند. مشاهده سایش در کانال سرریز سیکلون و پیداکننده گرداب نیز گواهی بر وجود این مشکل بود. برای حل این مسئله، دریچه‌های پاندولی تعمیر و وزنه‌های متصل به آنها به‌صورت دوره‌ای تنظیم شدند.

۳-۳ نشست مواد در محفظه حلزونی دور قفس و عوامل مؤثر بر آن

طی پایش‌های مداوم انجام شده، از طریق تصویربرداری و مشاهده مستقیم مشخص شد که مقدار قابل توجهی از مواد در محفظه حلزونی دور قفس نشست کرده است. برای شناسایی منشأ این ذرات و اطلاع از دانه‌بندی آنها، آنالیز دانه‌بندی با روش لیزری (LPSA) انجام شد. نتایج نشان داد که اندازه متوسط این ذرات حدود ۷ میکرون است که تأیید می‌کند ذرات بسیار ریز وارد چرخه جداکننده شده و در این بخش نشست کرده‌اند. چندین عامل وابسته به هم باعث بروز این مساله بوده‌اند، از جمله:

- کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته ریز
 - چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده
 - کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه
 - توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی
- در ادامه، به بررسی جزئیات هر عامل و راهکارهای ارائه شده جهت رفع مشکل پرداخته می‌شود.

۳-۳-۱ کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته ریز

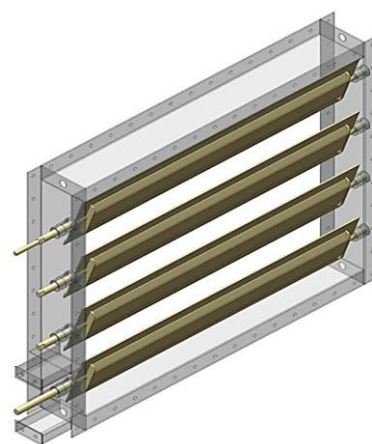
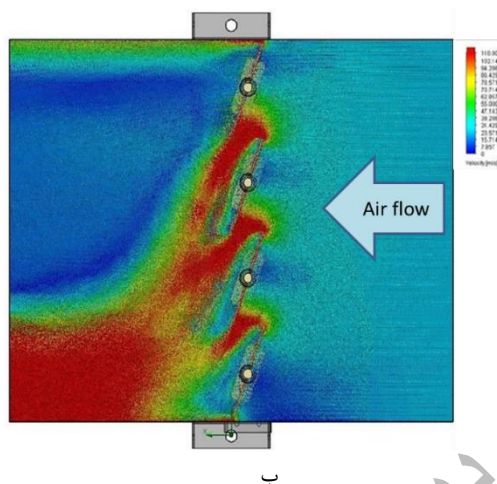
در شرایط عملیاتی ایده‌آل، نشست ذرات ریز در محفظه حلزونی نباید اتفاق بیفتد. تنها جایی که ذرات می‌توانند از آنجا به چرخه برگردند، سرریز سیکلون است. وظیفه

۲-۳-۳ چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده

عامل دیگری که باعث کاهش کارایی سیکلون و جدایش نامطلوب ذرات بود، کاهش سرعت هوای ورودی به سیکلون بود که به چینش نامناسب صفحات دمپر قبل از فن برمی‌گردد. این دمپر تنها پارامتر مستقل قابل تنظیم برای تغییر سرعت هوای در حال گردش در جداکننده هوایی است. در طراحی اصلی، تمام صفحات دمپر در یک جهت حرکت می‌کردند که توزیع نامناسب و غیریکنواخت جریان هوا را به دنبال داشت. نتایج شبیه‌سازی CFD همراه با

بررسی کنتورهای سرعت هوا نشان داد که اختلاف قابل توجهی در سرعت جریان هوا در بخش‌های بالایی و پایینی با بخش‌های میانی کانال بعد از دمپر وجود دارد و باعث سایش در بخش‌هایی از کانال بعد از دمپر می‌شود (شکل ۹). همچنین این نحوه توزیع نامطلوب هوا، منجر به کاهش کلی سرعت جریان هوا در جداکننده و کاهش کارایی جدایش در سیکلون می‌شود.

بازرسی‌های میدانی نیز مطابق انتظار نشان داد که سایش کانال‌های بعد از دمپر در دیواره‌های بالایی و پایینی که در نتایج شبیه‌سازی نیز سرعت بالای جریان هوا در آن مناطق مشاهده شده بود، اتفاق افتاده است.

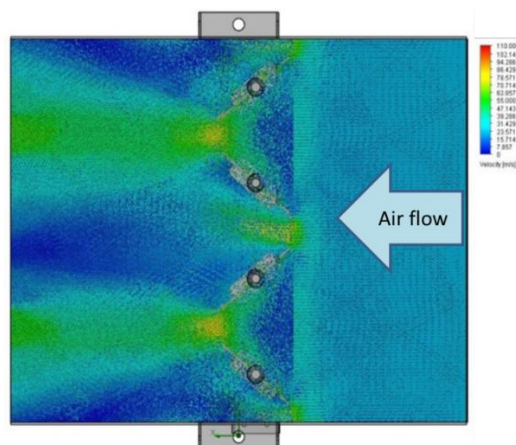


شکل ۹- الف) نمایشی از چینش اولیه صفحات دمپر؛ ب) نتیجه شبیه‌سازی CFD کنتورهای سرعت

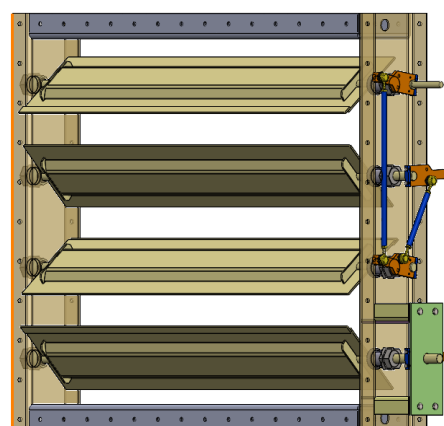
با سرعت بالا که در طراحی اولیه موجب سایش شدید کانال شده بود، مشاهده نشد.

چینش اصلاح شده در جداکننده هوایی پیاده‌سازی شد و پس از حدود ۱۰ ماه از کارکرد، در طول یک توقف برنامه‌ریزی شده، بررسی کانال بعد از دمپر انجام شد و نشان داد که میزان سایش به‌طور بارز کاهش یافته است.

برای اطمینان از توزیع یکنواخت‌تر جریان هوا و جلوگیری از سایش کانال بعد از دمپر، چینش صفحات دمپر اصلاح شد. نتایج شبیه‌سازی CFD برای چینش اصلاح شده صفحات دمپر، بهبود قابل توجهی را در یکنواختی توزیع سرعت هوا در کانال پس از دمپر نشان داد و هیچ منطقه‌ای



ب



الف

شکل ۱۰- الف) نمایشی از چینش اصلاح شده صفحات دمپر ؛ ب) نتیجه شبیه‌سازی CFD کنتورهای سرعت

کیسه‌ای، اختلاف فشار داخل جداکننده هوایی به میزان حدود ۸ میلی‌بار کاهش یافت.

برای بررسی تأثیر اختلاف فشار درون غبارگیر کیسه‌ای بر ابعاد ذرات مکش شده، نمونه‌برداری به طور هم‌زمان با کاهش اختلاف فشار درون این تجهیز از طریق وارد کردن هوای اضافی انجام شد. عدد بلین محصول غبارگیر کیسه‌ای اندازه‌گیری و مشاهده شد که با تغییر اختلاف فشار از منفی ۸/۴ به منفی ۶/۸ میلی‌بار، عدد بلین ذرات مکش شده از ۳۴۹۲ به ۳۸۰۰ افزایش یافت. این نتیجه نشان داد که اختلاف فشار بیشتر و منفی‌تر در غبارگیر کیسه‌ای، توانایی آن را برای مکش ذرات درشت‌تر افزایش می‌دهد.

یکی از عواملی که باعث کاهش اختلاف فشار داخل غبارگیر کیسه‌ای و کاهش کارایی و مکش آن شده بود، ورود ناخواسته هوای اضافی به سیستم بود. این جریان هوای ناخواسته از تجهیزات آماده‌به‌کار مانند بالابر سطلی ناشی می‌شد. فن مکنده غبارگیر کیسه‌ای با سرعت ثابت کار می‌کند و برای مکش غبار از نقاط محدودی طراحی شده است و اگر هوای اضافی از یکی از این نقاط وارد تجهیز شود، کارایی آن کاهش یافته و مکش ذرات را مختل می‌کند. با ورود هوای اضافی بیش از ظرفیت فن، حجم هوای مفید زیاد شده و فشار درون سیستم از فشار محیط بیشتر و اصطلاحاً مثبت می‌شود. از نشانه‌های مثبت شدن فشار که در کارخانه نیز مشاهده شد، بیرون زدن هوا و گردوغبار از نقاط غبارگیری است.

جهت رفع مشکل شناسایی شده، دمپر خودکار روی تجهیزات آماده‌به‌کار مانند بالابر سطلی نصب شد تا در مواقع

۳-۳-۳ کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه

لوله غبارگیر جداکننده هوایی که بعد از فن قرار گرفته و به غبارگیر کیسه‌ای متصل است، به عنوان تنها خروجی هوا از این تجهیز عمل می‌کند. یک دمپر دستی در ورودی آن قرار دارد تا میزان خروج جریان هوا را تنظیم کند. غبارگیر کیسه‌ای وظیفه استخراج گردوغبار و ذرات خیلی ریز در مدار خردایش را از چندین نقطه کارخانه از جمله بالابرهای سطلی (یک بالابر در حال کار و یک بالابر آماده‌به‌کار)، جداکننده هوایی و کانال‌های هوارو محصول نهایی کارخانه بر عهده دارد.

هدف لوله غبارگیر، مکش و خارج کردن ذرات بسیار ریزی است که به دلیل پدیده دنباله‌روی از طریق سرریز سیکلون به جداکننده هوایی راه یافته‌اند. به همین دلیل، کارایی نامطلوب این لوله و غبارگیر کیسه‌ای، باعث عدم مکش ذرات ریز به بیرون از جداکننده و عبور از این لوله و نشست در محفظه حلزونی می‌شود.

جهت بررسی تأثیر میزان مکش لوله غبارگیر بر اختلاف فشار داخل جداکننده هوایی، یک فشارسنج بعد از لوله غبارگیر نصب شد. این فشارسنج اختلاف فشار داخل جداکننده نسبت به فشار محیط (اتمسفر) را اندازه‌گیری می‌کند. با تغییر میزان بازشدگی دمپر روی لوله غبارگیر از ۸۰ درصد به ۴۰ درصد، اختلاف فشار داخل جداکننده از منفی ۱۵ به منفی ۵ میلی‌بار تغییر کرد. در آزمایشی دیگر، با ثابت نگه داشتن بازشدگی دمپر روی غبارگیر به میزان ۶۰ درصد، با کاهش ۴ میلی‌بار اختلاف فشار داخل غبارگیر

با بررسی‌های میدانی مشخص شد که لوله ورودی هوای تازه به دلیل پر شدن با مواد راه یافته به آن مسدود شده است. برای ارزیابی تأثیر این مسئله بر سایش قفس، اندازه‌گیری‌هایی در طول یک توقف برنامه‌ریزی شده انجام شد که سایش نامنظم در زیر قفس (از ۱۹ میلی‌متر تا ۲۷ میلی‌متر) مشاهده شد.

۴-۳-۳ توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی

توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی و اطراف قفس گردان نیز از دیگر عواملی است که می‌تواند در نشست و تجمع مواد در این منطقه تأثیر داشته باشد. این توزیع غیریکنواخت عمدتاً به نحوه قرارگیری و زوایای صفحات راهنمای اطراف قفس مربوط می‌شود. نتایج شبیه‌سازی CFD برای طرح اصلی چینش صفحات راهنما که همگی در حالت کاملاً باز در ۱۰۰ درصد بازشدگی بودند، نشان داد که سرعت جریان هوا در بخش‌های اولیه تا ۲۵ متر بر ثانیه افزایش پیدا کرده، در حالی که سرعت در انتهای حلزونی به کمتر از ۱۲ متر بر ثانیه کاهش یافت. این تفاوت سرعت باعث نشست حجم زیادی از ذرات در انتهای بخش حلزونی و انسداد آن شده است (شکل ۱۱). تصویربرداری و آنالیز تصویری نیز این مورد را اثبات کرد و نشان داد که حدود ۳۰ درصد از سطح مقطع حلزونی توسط مواد نشست کرده، مسدود شده است.



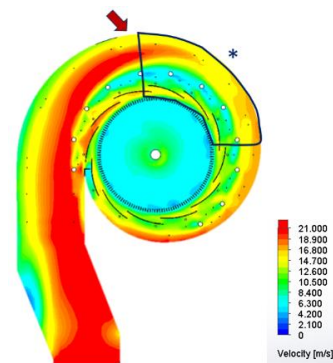
ب

آماده‌به‌کار، مکش و ورود هوای اضافی از این نقاط اتفاق نیفتد.

از دیگر نشانه‌های عملکرد نامطلوب غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر، وجود نقص در کارکرد لوله هوای تازه به‌عنوان تنها ورودی هوا به جداکننده هوایی است. این لوله به یک حلقه متصل است که به سمت بالا امتداد دارد و دارای ۸ شاخه است که هوا را از طریق آن‌ها به زیر قفس گردان هدایت می‌کند (شکل ۳). تأمین هوای تازه، نه تنها هوای ازدست‌رفته در سیستم را جبران می‌کند، بلکه در جلوگیری از نشست مواد ساینده در فاصله زیر قفس نیز تأثیر دارد و از سایش این قسمت جلوگیری کرده و خنک‌کاری یا تاقان‌های قفس را نیز انجام می‌دهد.

مکانیزم کارکرد لوله ورودی هوای تازه، بر اساس اختلاف فشار داخل جداکننده و فشار محیط است. یعنی هنگامی که فشار داخل جداکننده به دلیل مکش هوا از لوله غبارگیر از فشار محیط کمتر شود (فشار منفی شود)، هوای تازه به طور طبیعی از طریق این ورودی به داخل تجهیز مکش می‌شود. به طور ایده‌آل، لوله هوای تازه و لوله غبارگیر به‌صورت هماهنگ عمل می‌کنند، به‌گونه‌ای که هوای خارج شده از طریق لوله غبارگیر باید با هوای مکش شده از طریق لوله هوای تازه جبران شود.

با این حال، هنگامی که سیستم غبارگیر به‌درستی عمل نمی‌کند، هوای تازه به‌درستی مکش نمی‌شود و باعث تجمع ذرات ریز ساینده و سایش شدید در زیر قفس گردان می‌شود.



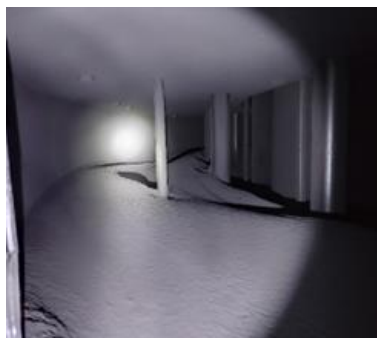
الف

شکل ۱۱- (الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اولیه زوایای صفحات راهنما؛ (ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده شده با * در شکل الف)

سمت انتهای آن بیشتر و در انتها نیز در حداکثر بازشدگی قرار گرفت. این تغییر منجر به توزیع یکنواخت سرعت جریان هوا در این محفظه شد (شکل ۱۲-الف). پس از گذشت حدود

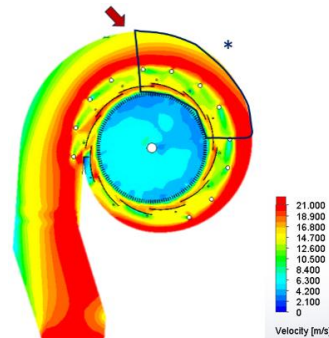
تنظیمات میزان بازشدگی صفحات راهنما در محفظه حلزونی برای بهبود توزیع جریان هوا در این ناحیه اصلاح شد. بدین صورت که بازشدگی در ابتدای حلزونی کمتر و به

نشست مواد در مقایسه با حالت قبل، از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد آن کاهش یافت (شکل ۱۲-ب).



ب

۱۰ ماه از اعمال این تغییرات در جداکننده هوایی، مجدداً از طریق تصویربرداری و آنالیز تصویری مشخص شد که میزان



الف

شکل ۱۲-الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اصلاح شده زاویه صفحات راهنما؛ ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده شده با * در شکل الف)

راهنما، میزان نشست مواد در محفظه حلزونی از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد آن کاهش یافت.

علاوه بر این، نتایج شبیه‌سازی DEM برای بررسی نحوه توزیع خوراک روی خوراک‌دهنده نشان داد که در طراحی فعلی خوراک‌دهنده، توزیع به صورت غیریکنواخت اتفاق می‌افتد؛ بنابراین یک طراحی اصلاح شده پیشنهاد شد که به طور قابل توجهی، توزیع یکنواخت خوراک را بهبود بخشد. به گونه‌ای که انحراف معیار نسبی توزیع ذرات خوراک روی سینی از ۳۰ درصد به ۵ درصد بهبود و کاهش یافت.

سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت سنگ آهن گل‌گهر، پرسنل و کارکنان کارخانه گندله‌سازی و واحد تحقیقات و فناوری به دلیل حمایت و اجرای نتایج این پژوهش و همچنین اجازه انتشار مقاله تشکر می‌کنند.

مراجع

- [1] Y. Zhang, A. Kavetsky, T. Napier-Munn, D. Rapson, Effects of separator efficiency on clinker grinding circuits: a computer simulation study, ZKG International: Ausgabe B, 41 (1988) 501-505.
- [2] M. Shapiro, V. Galperin, Air classification of solid particles: a review, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 44 (2005) 279-285.
- [3] O. Altun, H. Benzer, Selection and mathematical modelling of high efficiency air classifiers, Powder Technology, 264 (2014) 1-8.
- [4] R. Guizani, H. Mhiri, P. Bournot, CFD study of the effect of rotation speed on dynamic air separator flow characteristics and pressure drop, 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC), 2014, pp. 1-6.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، خصوصیت‌سنجی جامع از جداکننده هوایی دینامیکی، شامل مشاهدات تجربی، شبیه‌سازی و استراتژی‌های بهینه‌سازی، ارائه شد. بررسی پارامترهای عملیاتی نشان داد که برای حفظ کیفیت پایدار و مطلوب محصول جداکننده هوایی و جلوگیری از نوسان، استفاده از استراتژی کنترلی سرعت ثابت برای میزان چرخش قفس به جای استفاده از سرعت متغیر الزامی است. زیرا باعث افزایش پایداری در مشخصات محصول نهایی و کاهش نوسان در عدد بلین از 1154 ± 240 به 1195 ± 72 سانتی‌متر مربع بر گرم شد. به عبارت دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت.

مشاهدات میدانی، نشست بیش از حد مواد در محفظه حلزونی را نشان داد که میانگین اندازه این ذرات حدود ۷ میکرون بود. این مساله به کاهش کارایی سیکلون، عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی به سیکلون از ته‌ریز، چینش نامناسب صفحات دمپر، کاهش سرعت و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در جداکننده، کاهش کارایی غبارگیر کیسه‌ای و لوله غبارگیر و عدم کارکرد صحیح لوله هوای تازه و توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی مربوط می‌شود.

با انجام مجموعه‌ای از اقدامات اصلاحی در این زمینه از جمله بهبود نحوه آرایش دمپرها، بهبود کارایی سیستم غبارگیر کیسه‌ای، افزایش کارایی سیکلون و تنظیم دریچه و نحوه تخلیه ته‌ریز، تنظیم مجدد میزان بازشدگی صفحات

phenomenon in a circulating air classifier, Powder Technology, 218 (2012) 57-63.

[14] M. Esmaeilpour, A. Mohebbi, V. Ghalandari, CFD simulation and optimization of an industrial cement gas-solid air classifier, Particuology, 89 (2024) 172-184.

[15] P. Cleary, Discrete element modelling of industrial granular flow applications, TASK. Quarterly - Scientific Bulletin, 2 (1998).

[16] H.P. Zhu, A.B. Yu, A theoretical analysis of the force models in discrete element method, Powder Technology, 161 (2006) 122-129.

[17] A. EDEM, EDEM 2022 User's Guide, 2022.

[18] A.R. Ghasemi, A.R. Hasankhoei, G.A. Parsapour, E. Razi, S. Banisi, A combined physical and DEM modelling approach to improve performance of rotary dryers by modifying flights design, Drying Technology, 39 (2021) 548-565.

[19] A.R. Hasankhoei, M. Maleki-Moghaddam, A. Haji-Zadeh, M.E. Barzgar, S. Banisi, On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design, Minerals Engineering, 141 (2019) 105835.

[20] S.B. Pope, Turbulent flows, Measurement Science and Technology, 12 (2001) 2020-2021.

[5] C. Herrmann, Increased Cement Grinding Efficiency by Using High-Efficiency Separators, IEEE Transactions on Industry Applications, IA-22 (1986) 330-337.

[6] L. Guo, J. Liu, S. Liu, J. Wang, Velocity measurements and flow field characteristic analyses in a turbo air classifier, Powder Technology, 178 (2007) 10-16.

[7] Y. Feng, J. Liu, S. Liu, Effects of operating parameters on flow field in a turbo air classifier, Minerals Engineering, 21 (2008) 598-604.

[8] B. Beke, The Process of Fine Grinding, M. Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers 1981.

[9] K. Nageswararao, A critical analysis of the fish hook effect in hydrocyclone classifiers, Chemical Engineering Journal, 80 (2000) 251-256.

[10] B.C. Flintoff, L.R. Plitt, A.A. Turak, Cyclone modelling: A review of present technology, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 1987.

[11] A.K. Majumder, P. Yerriswamy, J.P. Barnwal, The "fish-hook" phenomenon in centrifugal separation of fine particles, Minerals Engineering, 16 (2003) 1005-1007.

[12] Q.L.J.Y.Y. Huang, Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation, Powder Technology, 226 (2012) 10-15.

[13] C. Eswaraiah, S.I. Angadi, B.K. Mishra, Mechanism of particle separation and analysis of fish-hook