دوره ۱۶، شماره ۴۶، بهار ۱۴۰۵، صفحه ۱-۱۶

نشریه روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن

تارنمای نشریه: http://anm.yazd.ac.ir/

مقاله پژوهشی

بهبود عملکرد جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر

محمد انصاری[1]، پیمان خادمی[1]، امیرعلی پورخسروانی[1]، علی‌رضا قاسمی[1]، وحید کاربخش[1]، صمد بنیسی زاده[1]*

۱- بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت: ۲۱ بهمن ۱۴۰۳، بازنگری: ۰۲ فروردین ۱۴۰۴، پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۴۰۴)

چکیده

این تحقیق با استفاده از ترکیب روش‌های شبیه‌سازی مانند CFD و DEM، اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و مشاهدات میدانی، به توصیف دقیق، تحلیل عملکرد و عیب‌یابی جداکننده هوایی به‌عنوان یکی از تجهیزات اصلی مدار خردایش خشک کارخانه گندله‌سازی گل‌گهر پرداخته است. تأثیر عوامل مختلف عملیاتی بر کارایی جداکننده و میزان حساسیت آن به هر عامل در آزمایش‌هایی 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 ۲۴۰±۱۱۵۴ به ۷۲ ±۱۱۹۵ سانتی‌مترمربع بر گرم رسید. به‌عبارت‌دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت که نشان‌دهنده محصول ریزتر 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. ازجمله علل آن می‌توان به عدم کارکرد صحیح دریچه تخلیه و ورود هوای اضافی از ته‌ریز سیکلون، چینش نامناسب صفحات دمپر و کاهش سرعت جریان هوا، افت کارایی غبارگیر کیسه‌ای و توزیع غیریکنواخت هوا در محفظه حلزونی اشاره کرد. برای کاهش اثر این مشکلات، اقداماتی نظیر تنظیم وزنه روی دریچه تخلیه ته‌ریز سیکلون، تغییر چینش صفحات دمپر جهت توزیع یکنواخت و افزایش سرعت هوا، افزایش مکش غبارگیر کیسه‌ای با مسدود کردن ورودی‌های 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 اندازه‌گیری و مشخص شد که از ۳۰ درصدِ سطح مقطع به ۱۰ درصد کاهش‌یافته است. در بررسی دیگری با استفاده از شبیه‌سازی DEM، نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده به‌عنوان عامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش مطالعه شد. در طرح اصلی، توزیع خوراک غیریکنواخت بود و بار به‌صورت یک‌طرفه روی قفس توزیع می‌شد. جهت رفع این مشکل، طرح جدیدی پیشنهاد شد و تحلیل نتایج شبیه‌سازی نشان داد که توزیع خوراک به‌صورت یکنواخت‌تر 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

*عهده‌دار مکاتبات: banisi@uk.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2025.22774.1666

۱- مقدمه

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، به طور 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 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 موردمطالعه 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.

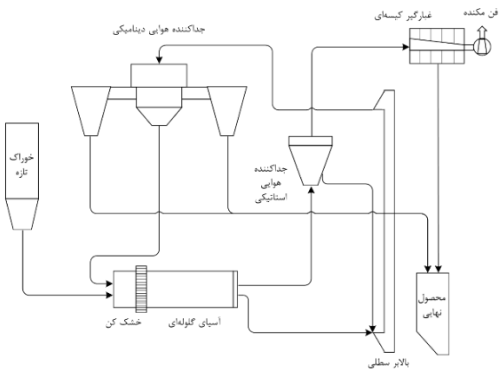
جداکننده‌های هوایی با پدیده‌ای به‌نام اثر قلاب-ماهی (برخلاف الگوهای جدایش متداول سیکلون‌ها) مواجه هستند که منحنی جدایش معمول S شکل پذیرفته‌شده برای ارزیابی کارایی طبقه‌بندی را به چالش می‌کشند. این پدیده از طریق بازیابی غیرخطی ذرات ریز مشخص می‌شود. بدین‌صورت که از شروع نمودار در ابعاد بسیار ریز، ابتدا تا یک اندازه بحرانی بازیابی افزایش، سپس کاهش‌یافته و دوباره افزایش می‌یابد [۸]. این بی‌نظمی که در جداکننده‌های هوایی مشاهده‌شده 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 تجمیع 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 و مدل‌سازی دقیق اثر قلاب-ماهی برای بهینه‌سازی فرایند طبقه‌بندی ذرات ریز، هنوز به‌طور 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 مورداستفاده قرار می‌گیرد. این جداکننده که برای طبقه‌بندی دقیق ذرات ریزودرشت طراحی شده است، در صورت کارکرد مطلوب، پایداری، کیفیت محصول و کارایی عملیات را تضمین می‌کند. بااین‌حال، طراحی پیچیده و همبستگی عوامل عملیاتی آن، چالش‌های زیادی برای بهینه‌سازی فرایندی و کنترل آن ایجاد می‌کند.

ویژگی منحصربه‌فرد جداکننده هوایی دینامیکی، خودتنظیم بودن آن است. این سیستم با چند متغیر قابل دست‌کاری 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. باوجوداین چالش‌ها، جداکننده طوری طراحی‌شده 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 ازجمله میزان ریزی محصول (عدد بلین) در این شرایط متفاوت خواهد بود. بااین‌حال، دستیابی به عملکرد بهینه و کیفیت و ابعاد موردقبول 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

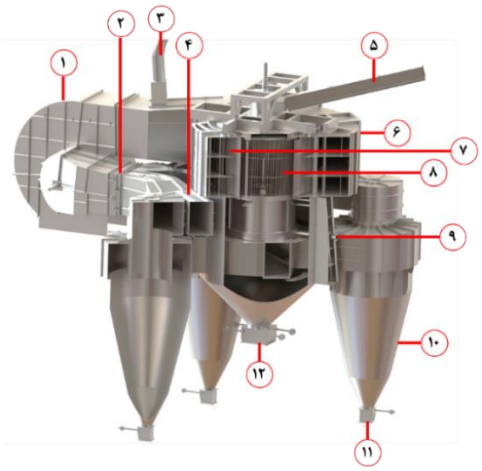
در این پژوهش، جداکننده هوایی دینامیکی کارخانه گندله‌سازی شرکت معدنی و صنعتی گل‌گهر، به‌عنوان مطالعه موردی برای عیب‌یابی و خصوصیت‌سنجی انتخاب شد. در این کارخانه، از مدار آسیاکنی خشک استفاده شده است. این مدار شامل سیستم مشعل و خشک‌کنی، آسیای گلوله‌ای، جداکننده هوایی دینامیکی، جداکننده هوایی استاتیکی و 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 مکنده 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 جداشده 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 جداشده و به‌عنوان محصول نهایی برای عملیات بعدی به سیلوهای ذخیره منتقل می‌شوند. ته‌ریز جداکننده هوایی دینامیکی که شامل مواد درشت است، برای خردایش بیشتر به همراه خوراک تازه مجدداً به آسیا برگردانده می‌شود (شکل ۱).



شکل ۱: مدار آسیاکنی کارخانه گندله‌سازی گل‌گهر.

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 پخش‌شده و یک پرده نازک از مواد را تشکیل می‌دهند. سرعت چرخش قفس، حد جدایش قفس را تعیین می‌کند، به‌طوری‌که افزایش سرعت باعث کاهش احتمال ورود ذرات به قفس و درنتیجه 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)



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 سه‌بعدی جداکننده هوایی دینامیکی گل‌گهر.

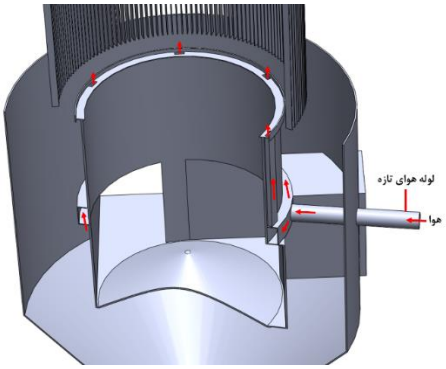
قفس گردان توسط یک محفظه حلزونی‌شکل احاطه شده و جریان هوا را در جداکننده هدایت می‌کند. طراحی حلزونی‌شکل این محفظه به‌گونه‌ای است که اتلاف سرعت هوا که از برخورد با دیواره‌ها و خمیدگی‌ها ناشی می‌شود را با کاهش سطح مقطع و افزایش سرعت هوا جبران می‌کند. ارتفاع محفظه حلزونی به‌وسیله دو صفحه سراسری به سه طبقه 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، به‌عنوان 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، به‌عنوان محصول درشت، برای خردایش مجدد به آسیای ابتدای مدار بازگردانده می‌شوند. وظیفه سیکلون‌ها، بازیابی هوا از ذرات ریز است. ته ریز این سیکلون‌ها، محصول ریز نهایی است. ازآنجاکه در این جداکننده یک سیکل بسته از هوا در جریان است، هوای بازیابی شده از سرریز سیکلون‌ها، توسط فن مکش شده و مجدداً به درون سیستم دمیده می‌شود. در ته‌ریز هر سیکلون، دریچه پاندولی جهت تخلیه ذرات ریز و هوابند کردن این ناحیه وجود دارند. این دریچه‌ها با استفاده از وزنه‌های قابل‌تنظیم، 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 هوابندی به‌صورت 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 ازجمله بالابرهای سطلی (یکی در حال کار و دیگری آماده‌به‌کار)، جداکننده هوایی و کانال‌های هواروی محصول، خارج می‌کند. سرعت فن مکنده غبارگیر کیسه‌ای ثابت است و برای خارج‌کردن گردوغبار از نقاط محدود طراحی شده است. لوله غبارگیر روی جداکننده هوایی، ذرات غبار را که از طریق سرریز سیکلون‌ها به‌اشتباه به درون سیستم

برگشته‌اند، به سمت غبارگیر کیسه‌ای هدایت می‌کند. تنظیم دقیق دمپر موجود در ابتدای این لوله، از ایجاد مکش بیش‌ازحد 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 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 قرارگرفته 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.

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 قابل دست‌کاری 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 ارائه‌شده توسط سازنده و در محیط نرم‌افزار طراحی صنعتی SolidWorks™ 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؛ ΔEM)

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 جریان هوا با عبور از آن قسمت‌ها، به‌طور 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 به‌صورت آزادانه در محیط حرکت کنند، بر اساس سرعت آن‌ها (V) و شتاب گرانش (g)، در هرلحظه محاسبه می‌گردد (روابط ۱ و ۲).

$$X = V\Delta t \quad (۱)$$

$$V = g\Delta t \quad (۲)$$

اما درصورتی‌که 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.

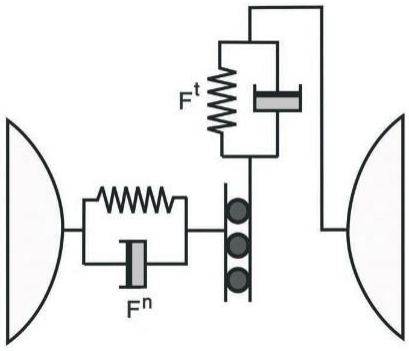
در تمام روابط، اندیس‌های t، n و rel به ترتیب معرف مؤلفه‌های مماسی، عمودی و نسبی هستند.

فرضیاتی برای ساده‌سازی محاسبات در راگ در نظر گرفته می‌شود. ازجمله 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.

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

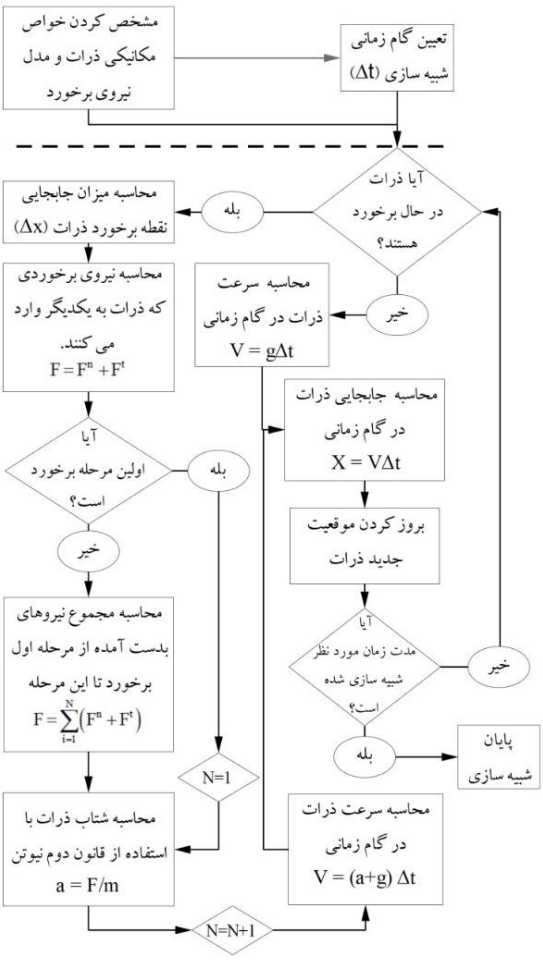
$$\mathrm{F^t} = K^t \int \Delta x^t + C^t V_{rel}^t \quad (۷)$$



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. به‌طور 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 ارائه می‌شوند، یکی از مهم‌ترین بخش‌هایی هستند که بر دقت نتایج شبیه‌سازی تأثیر گذراند و اعتبار شبیه‌سازی را تحت شعاع قرار می‌دهند. ازاین‌رو، تاکنون مدل‌های نیروی برخورد زیادی، باهدف نزدیک کردن نتایج شبیه‌سازی با واقعیت ارائه شده است [۱۶]. از بین مدل‌های نیروی برخورد ارائه‌شده، 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].



شکل ۵: الگوریتم انجام محاسبات در شبیه‌سازی با راگ.

جزئیات دقیق روش DEM و مدل‌های ارائه‌شده در این نرم‌افزار در منابع دیگر آمده است [۱۸, ۱۹].

مدل برخورد مورداستفاده در این شبیه‌سازی از نوع خطی فرض شده است. سایر ضرایب و پارامترهای شبیه‌سازی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: پارامترهای مورداستفاده در شبیه‌سازی راگ

پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	۰٫۲۴	مگا پاسکال
ضریب استرداد	۰٫۱	
ضریب اصطکاک غلتشی	۰٫۱۵	
ضریب اصطکاک ایستایی	۰٫۲	
گام زمانی	$۱٫۷\times۱۰^{-۵}$	ثانیه
نسبت پواسون	۰٫۲۵	
چگالی ذرات	۲۴۰۰	کیلوگرم بر مترمکعب
توزیع ابعادی ذرات	۰٫۱ – ۰٫۵	میلی‌متر
تعداد کل ذرات	۱۵۴۶۰	

۳-۲- شبیه‌سازی سیالاتی به روش XΦΔ

برای بررسی نحوه توزیع سرعت جریان هوا در محفظه حلزونی و دمپرهای قبل از فن، شبیه‌سازی به روش CFD با استفاده از نرم‌افزار Ansys Fluent™ 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 به‌صورت رابطه (۸) نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho v) = 0 \qquad (۸)$$

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

$$\nabla.v = 0 \qquad (۹)$$

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

$$\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j\frac{\partial v_i}{\partial x_j}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial^2 v_i}{\partial^2 x_j} + F_i \qquad (۱۰)$$

که در آن، ρ چگالی سیال، v مؤلفه‌های 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 به‌جای 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 به‌صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۲۰]:

$$\frac{RD_{ij}}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} + \varphi_{ij} - \varepsilon_{ij} \qquad (۱۱)$$

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.

۳-۲-۲- 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) موردبررسی 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 دمپرها، 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 قابل‌توجهی بر نتایج ندارد.

نتایج نشان داد که استفاده از شبکه‌ی ۴ میلیونی برای محفظه حلزونی و شبکه‌ی ۲ میلیونی برای دمپرها، 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 $۱۰^{-۴}$، 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 (کیلوپاسکال)
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 ورودی سرعت هوا به محفظه حلزونی و دمپر قبل از فن به مقدار ۲۱ متر بر ثانیه ($v = 21\ m/s$) 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 به‌صورت مشترک در هر دو مورد شبیه‌سازی مورداستفاده 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 دیجیتالی 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 کیسه‌ای 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 به‌عنوان تابعی از الگوی جریان استنتاج گردید. با توجه به این‌که ذرات در محفظه حلزونی بسیار ریز و سبک هستند و درصد پایینی 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. ازآنجاکه 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 گفتن 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، ازنظر محاسباتی مقرون‌به‌صرفه‌تر و ازنظر عملی قابل‌اجرا بوده و امکان بررسی صحت مدل‌سازی را بدون نیاز به ابزارهای پیچیده اندازه‌گیری فراهم کرده است. به‌عبارت‌دیگر، 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.

۳- نتایج و بحث

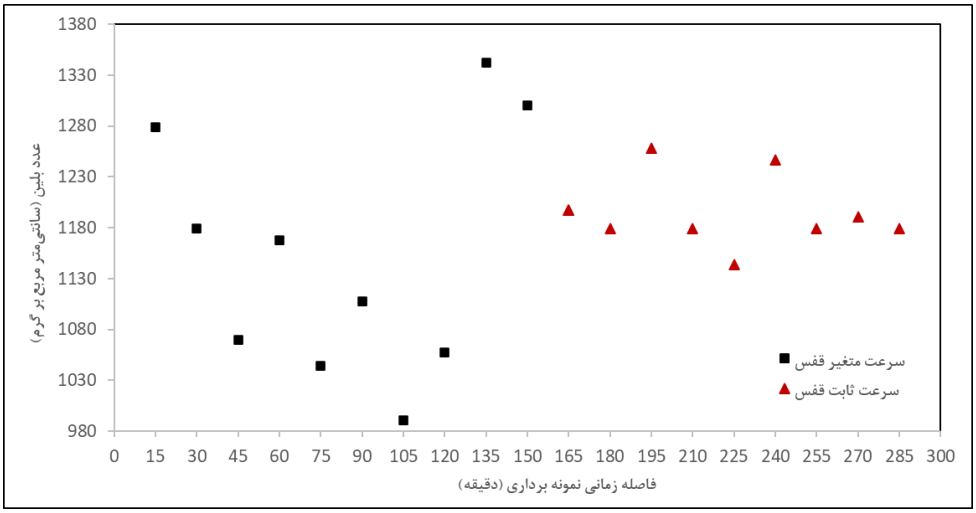
۳-۱- استراتژی کنترلی مطلوب سرعت قفس و تأثیر آن بر ابعاد محصول

بخش اصلی جداکننده هوای دینامیکی، روتور یا قفس گردان است که در ورودی جداکننده قرار دارد و جداسازی ذرات ریزودرشت را انجام می‌دهد. در طراحی هر جداکننده، یک حد جدایش در نظر گرفته می‌شود که به‌عنوان 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 به‌طور 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 واردشده به آسیای گلوله‌ای در یک محدوده ثابت نگه‌داشته و بار در گردش با تنظیم مداوم سرعت قفس در یک محدوده خاص حفظ شد. در استراتژی دوم، متغیر قابل‌دستکاری تناژ خوراک تازه، متغیر تحت کنترل بار در گردش و سرعت قفس نیز ثابت نگه‌داشته شد. برای جبران تغییرات و حفظ تناژ کل خوراک واردشده به آسیا (مجموع بار در گردش و خوراک تازه)، تناژ خوراک تازه تنظیم شد.

نمونه‌برداری در طول زمان و در شرایط عملیاتی پایدار برای اندازه‌گیری عدد بلین که نشان‌دهنده میزان ریزی محصول است، انجام شد. میانگین عدد بلین اندازه‌گیری‌شده محصول نهایی در حالت سرعت متغیر قفس، ۲۴۰±۱۱۵۴ سانتی‌متر مربع بر گرم بود که نوسانات قابل‌توجهی را نشان داد. در مقابل، حالت سرعت ثابت قفس منجر به عدد بلین پایدارتر و محصول ریزتر با میانگین ۷۲±۱۱۹۵ سانتی‌متر مربع بر گرم شد که نشان‌دهنده نوسانات کمتر در اندازه محصول است (شکل ۶). به‌عبارت‌دیگر، 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 قابل‌توجه در انحراف معیار از ۱۲۰ 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.

درنتیجه 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.



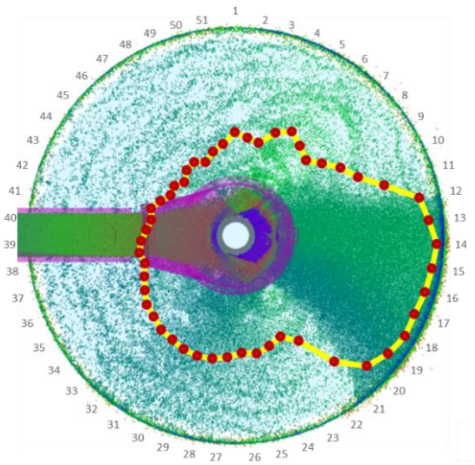
شکل ۶: تأثیر سرعت ثابت و متغیر قفس گردان بر نوسانات عدد بلین (میزان ریزی محصول) جداکننده.

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

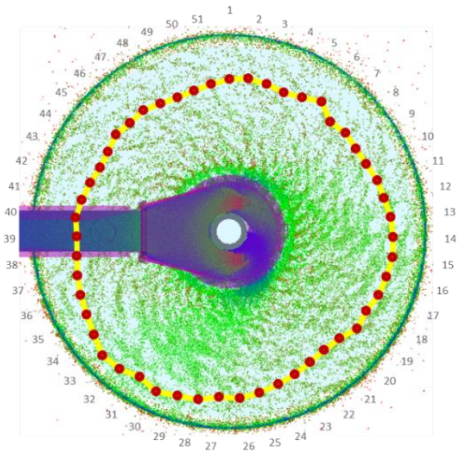
نحوه توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده بالای قفس گردان از طریق خوراک‌دهنده، یکی از عوامل کلیدی در تعیین کارایی جدایش در جداکننده هوایی دینامیکی است. نتایج شبیه‌سازی DEM برای طرح فعلی خوراک‌دهنده نشان داد که توزیع خوراک روی صفحه توزیع‌کننده به‌صورت غیریکنواخت است و منجر به تجمع مواد به‌صورت یک‌طرفه شده و از کل فضای مفید صفحه توزیع استفاده نمی‌شود (شکل ۷-الف). این نوع توزیع باعث می‌شود در اطراف قفس که باید ذرات به‌صورت 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. بنابراین 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 به‌عنوان یک عامل جدایش می‌شود.

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. به‌عنوان‌مثال، در شکل ۷-الف، تعداد ذرات عبوری از قطاع ۱۴ برابر با ۱۳۴ ذره است، درحالی‌که این تعداد برای قطاع ۲۴ برابر با ۷۵ ذره است. این تعداد در شکل ۷-ب که به طراحی اصلاح‌شده 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 به‌عبارت‌دیگر، 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 به‌شدت به ضرایب استفاده‌شده در روش اجزای گسسته مانند ضریب استرداد، ضریب اصطکاک ایستایی و غلتشی وابسته است. ازآنجاکه 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 مورداستفاده 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 به‌نوعی باشد که باوجود تغییر خواص مواد، توزیع مواد روی سینی همچنان به‌صورت کاملاً همگن و یکنواخت باشد.

برای رفع مشکل توزیع غیریکنواخت خوراک، یک طرح اصلاحی خوراک‌دهنده پیشنهاد شد که در آن تعداد ۳۰ دیسک (دیسک‌های قرمزرنگ در شکل ۸) به قطر ۵۰ و ضخامت ۱۵ میلی‌متر روی محیط یک دایره به قطر ۱۰۰۰ میلی‌متر نسبت به مرکز سینی به‌صورت 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 به‌نوعی باشد که دیسک‌های بیرونی بین دو دیسک از ردیف داخلی قرار بگیرد. به‌عبارت‌دیگر، این دو ردیف قرار است یک مانع موقت و کوتاه‌مدت 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 به‌راحتی 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 کم‌هزینه، توزیع یکنواخت مواد روی سینی و عدم تأثیرپذیری 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 به‌طور قابل‌توجهی بهبودیافته است (شکل ۷-ب).



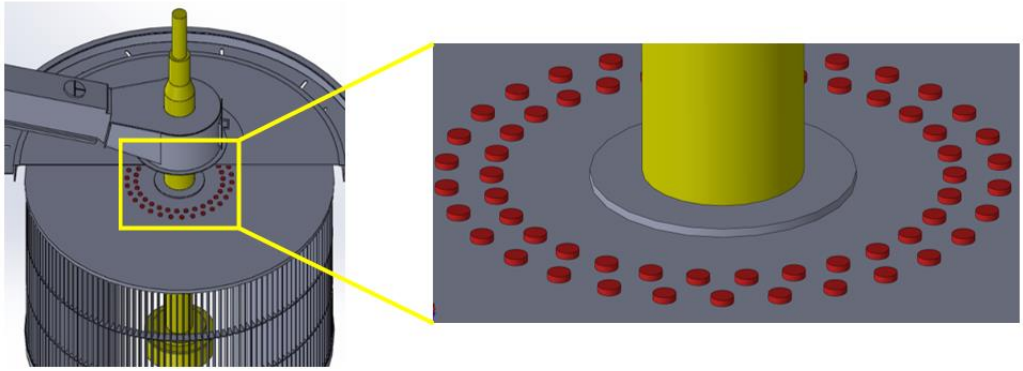
(الف)



(ب)

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).

مقایسه میانگین و انحراف معیار توزیع ذرات بر روی صفحه توزیع‌کننده نشان داد که یکنواختی توزیع افزایش‌یافته است، به‌طوری‌که انحراف معیار نسبی توزیع ذرات روی صفحه توزیع‌کننده خوراک از ۳۰ درصد به ۵ درصد کاهش و بهبودیافته است.



شکل ۸: نمایشی از طراحی پیشنهادی خوراک‌دهنده جداکننده هوایی (دیسک‌های قرمزرنگ روی صفحه توزیع‌کننده).

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

طی پایش‌های مداوم انجام‌شده، از طریق تصویربرداری و مشاهده مستقیم مشخص شد که مقدار قابل‌توجهی 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 مسئله بوده‌اند، ازجمله:

- 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
- توزیع غیریکنواخت جریان هوا در محفظه حلزونی

در ادامه، به بررسی جزئیات هر عامل و راهکارهای ارائه‌شده جهت رفع مشکل پرداخته می‌شود.

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

در شرایط عملیاتی ایده‌آل، نشست ذرات ریز در محفظه حلزونی نباید اتفاق بیفتد. تنها جایی که ذرات می‌توانند ازآنجا به چرخه برگردند، سرریز سیکلون است. وظیفه سیکلون، بازیابی هوا از طریق سرریز و برگرداندن آن به

چرخه جداکننده هوایی است و به‌طور 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.

بااین‌حال، حضور ذرات ریز در محفظه حلزونی نشان داد که علاوه بر هوا، ذرات ریز هم در جریان هوای سرریز سیکلون وجود دارند. باتوجه‌به 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 قابل‌توجه 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.

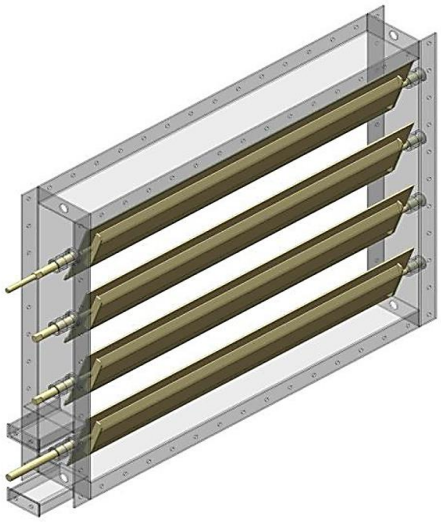
با بررسی‌های انجام‌شده، مشخص شد که علت کاهش کارایی سیکلون، تخلیه نادرست مواد از طریق ته ریز سیکلون است که اجازه می‌دهد هوای اضافی از ته ریز وارد سیکلون شود. این مسئله باعث ایجاد تلاطم و نقص در جریان گردابی (که برای جدایش هوا از ذرات ریز محصول ضروری است) می‌شود و ذرات ریز بیشتری را به همراه هوا از سرریز 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.

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

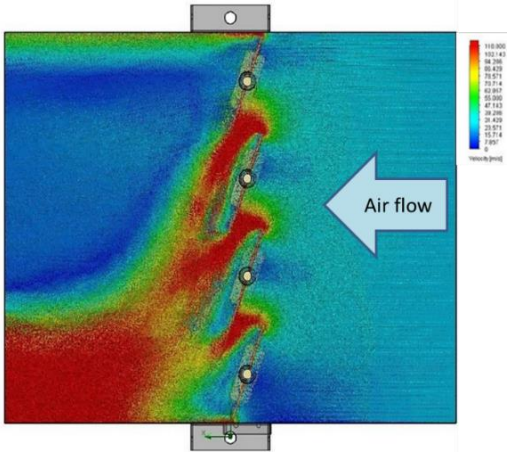
عامل دیگری که باعث کاهش کارایی سیکلون و جدایش نامطلوب ذرات بود، کاهش سرعت هوای ورودی به سیکلون بود که به چینش نامناسب صفحات دمپر قبل از فن برمی‌گردد. این دمپر تنها پارامتر مستقل قابل‌تنظیم برای تغییر سرعت هوای در حال گردش در جداکننده هوایی است.

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 قابل‌توجهی 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 مشاهده‌شده بود، اتفاق افتاده است.



(الف)



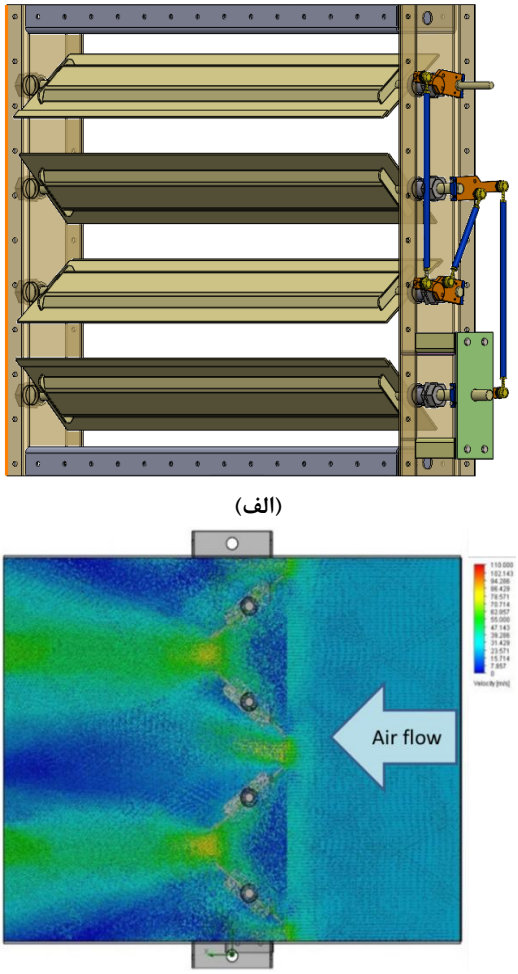
(ب)

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

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 اصلاح‌شده صفحات دمپر، بهبود قابل‌توجهی را در یکنواختی توزیع سرعت هوا در کانال پس از دمپر نشان داد و هیچ منطقه‌ای

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

چینش اصلاح‌شده 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 کاهش‌یافته است.



(الف)

(ب)

شکل ۱۰: الف) نمایشی از چینش اصلاح‌شده صفحات دمپر؛ ب) نتیجه شبیه‌سازی CFD کنتورهای سرعت.

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، به‌عنوان 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 خرداش را از چندین نقطه کارخانه ازجمله 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 خارج‌کردن ذرات بسیار ریزی است که به دلیل پدیده دنباله‌روی از طریق سرریز سیکلون به جداکننده هوایی راه‌یافته‌اند. 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 نگه‌داشتن بازشدگی دمپر روی غبارگیر به میزان ۶۰ درصد، با کاهش ۴ میلی‌بار اختلاف فشار داخل غبارگیر 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 به‌طور هم‌زمان با کاهش اختلاف فشار درون این تجهیز از طریق واردکردن 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 کاهش‌یافته 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

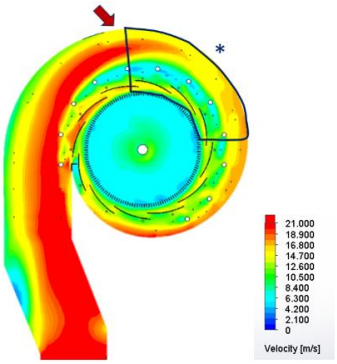
مثبت می‌شود. از نشانه‌های مثبت شدن فشار که در کارخانه نیز مشاهده شد، بیرون‌زدن هوا و گردوغبار از نقاط غبارگیری است. جهت رفع مشکل شناسایی‌شده، دمپر خودکار روی تجهیزات آماده‌به‌کار مانند بالابر سطلی نصب شد تا در مواقع آماده‌به‌کار، مکش و ورود هوای اضافی از این نقاط اتفاق نیفتد.

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، نه‌تنها 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 یاتاقان‌های قفس را نیز انجام می‌دهد.

مکانیزم کارکرد لوله ورودی هوای تازه، بر اساس اختلاف فشار داخل جداکننده و فشار محیط است؛ یعنی هنگامی‌که فشار داخل جداکننده به دلیل مکش هوا از لوله غبارگیر از فشار محیط کمتر شود (فشار منفی شود)، هوای تازه به‌طور طبیعی از طریق این ورودی به داخل تجهیز مکش می‌شود. به‌طور ایده‌آل، لوله هوای تازه و لوله غبارگیر به‌صورت هماهنگ عمل می‌کنند، به‌گونه‌ای که هوای خارج‌شده از طریق لوله غبارگیر باید با هوای مکش شده از طریق لوله هوای تازه جبران شود. بااین‌حال، هنگامی‌که سیستم غبارگیر به‌درستی عمل نمی‌کند، هوای تازه به‌درستی مکش نمی‌شود و باعث تجمع ذرات ریز ساینده و سایش شدید در زیر قفس گردان می‌شود. با بررسی‌های میدانی مشخص شد که لوله ورودی هوای تازه به دلیل پر شدن با مواد راه‌یافته به آن مسدود شده است. برای ارزیابی تأثیر این مسئله بر سایش قفس، اندازه‌گیری‌هایی در طول یک توقف برنامه‌ریزی‌شده 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، درحالی‌که 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.



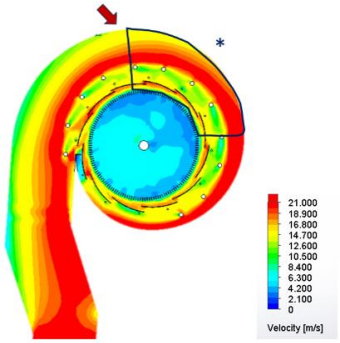
(الف)

(ب)

شکل ۱۱: الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اولیه زاویه صفحات راهنما؛ ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده‌شده با * در شکل الف).

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

۱۰ ماه از اعمال این تغییرات در جداکننده هوایی، مجدداً از طریق تصویربرداری و آنالیز تصویری مشخص شد که میزان نشست مواد در مقایسه با حالت قبل، از ۳۰ درصد سطح مقطع به ۱۰ درصد آن کاهش یافت (شکل ۱۲-ب).



(الف)

(ب)

شکل ۱۲: الف) نتایج شبیه‌سازی CFD توزیع سرعت هوا در محفظه حلزونی با چینش اصلاح‌شده زاویه صفحات راهنما؛ ب) نشست مواد در محفظه حلزونی (مکان نشان داده‌شده با * در شکل الف).

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 به‌جای استفاده از سرعت متغیر الزامی است؛ زیرا باعث افزایش پایداری در مشخصات محصول نهایی و کاهش نوسان در عدد بلین از ۲۴۰±۱۱۵۴ به ۷۲±۱۱۹۵ سانتی‌متر مربع بر گرم شد. به‌عبارت‌دیگر، انحراف معیار نسبی آن از ۱۱ درصد به ۳ درصد کاهش یافت.

مشاهدات میدانی، نشست بیش‌ازحد مواد در محفظه حلزونی را نشان داد که میانگین اندازه این ذرات حدود ۷ میکرون بود. این مسئله 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 ازجمله بهبود نحوه آرایش دمپرها، بهبود کارایی سیستم غبارگیر کیسه‌ای، افزایش کارایی سیکلون و تنظیم دریچه و نحوه تخلیه ته‌ریز، تنظیم مجدد میزان بازشدگی صفحات 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 به‌صورت غیریکنواخت اتفاق می‌افتد؛ بنابراین یک طراحی اصلاح‌شده پیشنهاد شد که به‌طور قابل‌توجهی، توزیع یکنواخت خوراک را بهبود بخشید. به‌گونه‌ای که انحراف معیار نسبی توزیع ذرات خوراک روی سینی از ۳۰ درصدِ به ۵ درصد بهبود و کاهش یافت.

سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت سنگ‌آهن گل‌گهر، پرسنل و کارکنان کارخانه گندله‌سازی و واحد تحقیقات و فناوری به‌دلیل 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.

[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 Publishers1981.

[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 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.