کنترل غبار منتشره با تلفیق تهویه صنعتی و مه پاش به‌عنوان راهکار مؤثر و اقتصادی در یک شرکت معدنی

مرتضی بابائی[۱]، عبدالرحمن بهرامی[۲]، فرشید قربانی شهنا[۳]

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۰/۱۵ تاریخ ویرایش: ۹۵/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۸/۱۷

چکیده

زمینه و هدف: یکی از معضلات اصلی بهداشتی و زیست‌محیطی صنایع معدنی انتشار غبار در حین فعالیت‌های شکستن، سرند کردن و انتقال مواد می‌باشد. این مطالعه باهدف طراحی، اجرا و ارزیابی سامانه تهویه موضعی و تلفیق آن با سامانه مه پاش جهت کاهش انتشار ذرات هوابرد به همراه تحلیل اقتصادی در واحد سنگ‌شکن یک شرکت معدنی اجرا شد.

روش بررسی: پس از اطمینان از عدم تأثیر رطوبت بر خواص مواد، سامانه مه پاش آب به‌منظور فرونشانی بخشی از غبار در منبع تولید، طراحی و نصب شد. سایر ذرات منتشره نیز با به‌کارگیری سامانه تهویه مکنده موضعی با اقتباس از استانداردها و راهنماهای موجود کنترل گردید. به‌منظور پالایش ذرات جمع‌آوری‌شده توسط سامانه تهویه سه دستگاه سیکلون بازده بالا (مدل استایرمند) طراحی و مورداستفاده قرار گرفت. درنهایت عملکرد سامانه مه پاش و تهویه صنعتی به‌صورت مجزا و تلفیقی در کنترل ذرات منتشره در هوای محیط کار، مواجهه فردی و انتشار زیست‌محیطی مورد ارزیابی قرار گرفت.

یافته‌ها: بازده سامانه مه پاش، تهویه صنعتی و تلفیقی در کاهش غلظت غبار محیطی به ترتیب ۴۹، ۷۶ و ۹۵ درصد بود. همچنین بازده سامانه مرطوب‌سازی، تهویه صنعتی و تلفیقی در کاهش میزان مواجهه با ذرات قابل استنشاق ۵۴، ۷۳ و ۸۸ درصد حاصل شد.

نتیجه‌گیری: با توجه به ارزیابی‌های به‌عمل‌آمده با اجرای تلفیقی این دو سامانه، میزان مواجهه شغلی کارگران، غلظت غبار کل در محیط و انتشار زیست‌محیطی ذرات به کمتر از حدود مجاز کاهش یافت. مطابق تحلیل‌های اقتصادی، بالغبر ۸۰ درصد هزینه‌های اجرایی پروژه به این روش نسبت به روش خشک کاهش یافت، لذا می‌توان در شرایط مشابه این سامانه را به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی پیشنهاد داد.

کلیدواژه‌ها: صنایع معدنی، مه پاش، سیکلون، تهویه صنعتی، غبار.

مقدمه

با افزایش صنعتی شدن جوامع و همچنین فعالیت‌های انسان، میزان انتشار آلاینده‌های هوابرد به محیط اطراف افزایش پیداکرده است [۱]. اگرچه فعالیت‌های طبیعی (آتش‌فشان، آتش‌سوزی و ...) آلاینده‌های مختلفی را در محیط آزاد می‌کنند، اما علت عمده آلودگی هوا فعالیت‌های انسانی می‌باشد [۲]. غبار جز ذاتی اکثر عملیات معدنی می‌باشد که با خطرات بهداشتی و انفجار همراه است. غبار شامل ذرات ریز جامدی است که توسط هوا معلق می‌ماند این ذرات توسط فرایندهای مختلفی مانند ضربه، شکستن، خرد کردن و انتقال مواد تشکیل می‌شود [۳]. در مورد تأثیر ذرات بر سلامت و بروز بیماری‌ها، بررسی‌های زیادی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به بررسی اپیدمیولوژیکی در نیویورک آمریکا اشاره کرد که نشان می‌دهد میزان مرگ‌ومیر به سبب تمام علل کشنده مثل بیماری‌های تنفسی و سرطان معده با افزایش غلظت ذرات در هوا، افزایش‌یافته است [۴].

امروزه استفاده از سامانه های تهویه صنعتی در محیط‌های کاری به‌منظور جمع‌آوری آلاینده‌ها و رعایت حدود مجاز ارائه‌شده توسط سازمان‌ها، روزبه‌روز در حال افزایش است. استفاده از تجهیزات خردکن مانند انواع دستگاه‌های سنگ‌شکن در کارخانه‌های فرآوری مواد معدنی، به‌طور بالقوه مقادیر زیادی از غبار تولید می‌کند. اصلاح این مشکل شامل جداسازی منابع انتشار آلاینده، سامانه تهویه موضعی و سامانه مرطوب‌سازی می‌باشد.

۱- کارشناس ارشد، قطب علمی و آموزشی بهداشت حرفه‌ای و مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی، همدان، ایران.

۲- استاد، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای و مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت ، دانشگاه علوم پزشکی، همدان، ایران.

۳- (نویسنده مسئول) دانشیار، قطب علمی آموزشی بهداشت حرفه‌ای و مرکز تحقیقات بهداشت و ایمنی شغلی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی، همدان، ایران.
fghorbani@umsha.ac.ir

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

کاربرد ترکیبی یا انفرادی این سامانه ها برای اطمینان از بازده مؤثر آن‌ها بهینه‌سازی شده است [۵].

سامانه مرطوب‌سازی یکی از قدیمی‌ترین روش‌های کنتر ل ذرات در فرآیندهای فرآوری مواد معدنی است، در اکثر فرآیندهای فرآوری مواد معدنی در سامانه مرطوب‌سازی، از اسپری آب استفاده می‌شود. استفاده از اسپری آب روش ساده‌ای است، بااین‌وجود برای تعیین طراحی مؤثر، عوامل تعیین‌کننده را باید موردبررسی قرارداد. دو روش برای کنترل غبار در فرایند فرآوری مواد معدنی وجود دارد که عبارت‌اند از پیشگیری از ایجاد غبار در منبع با اسپری آب به‌طور مستقیم و روش برخورد قطرات آب اسپری شده با غبار هوابرد و حذف آن از هوا می‌باشد. در بسیاری از فرآیندها امکان کاربرد هم‌زمان این دو روش وجود دارد [۶].

مطالعات زیادی در مورد پالایشگرهای مختلف ازجمله سیکلون، اسکرابر، صافی و رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک را جهت جمع‌آوری ذرات توصیه نموده‌اند. سیکلون ها مدت‌هاست که به‌عنوان یکی از پالایشگرهای کم‌هزینه برای حذف ذرات از هوا استفاده می‌شوند. سهولت تعمیر و نگهداری، سادگی ساخت‌وساز و تنوع سیکلون ها برخی از مزایای این پالایشگر در مقایسه با بسیاری از پالایشگرها همچون فیلترها و اسکرابر ها است. نقطه‌ضعف عمده سیکلون ها در مقیاس صنعتی، بازده نسبتاً کم آن‌ها در جمع‌آوری ذرات زیر ۵ میکرومتر می‌باشد. در سال‌های اخیر قوانین زیست‌محیطی سخت‌گیرانه‌تری را برای بهبود بازده جمع‌آوری ذرات زیر ۵ میکرومتر تدوین‌شده است. علاوه بر این در برخی از صنایع فرایندی گرفتن کسر اضافی غبار از هوا به‌منظور کاهش از دست دادن محصولات باارزش در واحدهای حذف غبار اهمیت دارد [۷].

در ارتباط با تأثیر ابعاد هندسی سیکلون و عوامل مؤثر بر بازده جمع‌آوری ذرات مطالعات مختلفی صورت گرفته که نشان می‌دهد حداکثر بازده سیکلون با کاهش ابعاد ورودی، کاهش می‌یابد، همچنین کاهش قطر مجرای خروجی هوای سیکلون نسبت به قطر سیکلون باعث افزایش بازده جمع‌آوری ذرات و افت فشار می‌شود. دبی گاز ورودی یکی دیگر از عوامل افزایش بازده جمع‌آوری سیکلون است، که نقش مؤثری در تعیین بازده سیکلون دارد. افزایش دبی گاز ورودی منجر به افزایش بازده جمع‌آوری ذرات می‌شود [۱۰-۸].

در ارتباط با سامانه مرطوب‌سازی در مطالعه‌ای برای بهبود عملکرد جمع‌آوری ذرات از اسپری آب در امتداد سمت چپ و راست ماشین استخراج معدن استفاده کردند، بررسی‌ها نشان داد که اسپری آب نه‌تنها غبار اطراف بوم ماشین استخراج را حذف می‌کند، بلکه غبار را به سمت اسکرابر هدایت می‌کند [۱۱].

کاربرد سیکلون های موازی در کنترل ذرات صنایع مختلف همچون سیمان و سیلیس موردبررسی قرارگرفته است در برخی از موارد بازده این سیکلون ها برای ذرات کوچک‌تر از ۱۰ میکرومتر هم قابل‌قبول بوده است. در ضمن کاربرد سامانه های تهویه موضعی و پالایشگرهای تلفیقی در صنایع معدنی نیز موردبررسی قرارگرفته‌اند. مطابق نتایج مطالعه انجام‌شده کاربرد پالایشگرهای تلفیقی در جمع‌آوری ذرات گزینه خوبی برای کنترل آلودگی در صنایعی با محدودیت‌های اقتصادی و تکنولوژی قدیمی هستند [۱۴-۱۲].

با توجه به تراکم بالای غبار منتشره در فرآیندهای معدنی و لزوم کاربرد سامانه هایی با بازده بالا و پرهزینه جهت دستیابی به استانداردهای بهداشتی و زیست‌محیطی، این مطالعه باهدف طراحی سامانه تهویه صنعتی و کاربرد توأم با سیستم مرطوب‌سازی و غبارگیرهای ساده جهت جایگزینی و کاهش هزینه تمام‌شده این سامانه می‌باشد.

روش بررسی

این مطالعه در یک شرکت معدنی سرب و روی با بیش از ۱۶۰ نفر شاغل، صورت گرفت. زیرمجموعه معدن و کارخانه این شرکت شامل دو واحد سنگ‌شکن، واحد فلوتاسیون سرب و روی، آزمایشگاه، انبار و تعمیرگاه ماشین‌آلات می‌باشد. فرایند موردمطالعه، خط دو سنگ‌شکن این شرکت معدنی بود. مواد اولیه مورداستفاده در فرآیند از معدن موجود در بالادست

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

کارخانه تهیه می‌گردد و پس از انتقال به واحد سنگ‌شکن با استفاده از سنگ‌شکن فکی به‌عنوان سنگ‌شکن اولیه قطر قطعات استخراج‌شده را تا حدود ۱۵۰ mm کاهش می‌دهند و سپس مواد معدنی خردشده با استفاده از نوار نقاله به سرند لرزشی منتقل می‌شود، قطعات درشت‌تر به‌منظور خردایش بیشتر و رسیدن به درجه آزادی موردنظر به سنگ‌شکن مخروطی به‌عنوان سنگ‌شکن ثانویه انتقال داده می‌شود و نهایتاً به بونکر ذخیره‌سازی منتقل می‌گردد تا در فرایند تولید کنسانتره سرب و روی قرار گیرد.

در فرایند موردمطالعه منابع اصلی انتشار ذرات شامل سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی، نوار نقاله‌ها و سرند لرزشی بود. موقعیت منابع مولد غبار و حد دسترسی به تجهیزات و موانع طراحی موردبررسی قرار گرفت. جهت شناسایی نوع و غلظت آلاینده محیطی و میزان مواجه شغلی، قبل از اقدام به کنترل آلاینده، از هوای محیط کارگاه و منطقه تنفسی کارکنان نمونه‌برداری صورت گرفت. اندازه‌گیری توزیع اندازه ذرات منتشره نیز به‌منظور تعیین اندازه قطرات سامانه مه پاش و تعیین پالایشگر مناسب و اقتصادی انجام شد.

به‌منظور طراحی مناسب سامانه مه پاش جهت پیشگیری از غبار در منابع تولید غبار و همچنین به دام اندازی ذرات هوابرد عوامل تعیین‌کننده شامل اندازه ذرات، اندازه قطرات آب اسپری شده، الگوی اسپری آب و زاویه آن، مدنظر قرار گرفت. میزان فشار و دبی آب مورداستفاده طوری انتخاب شد که با کمترین آب مصرفی بیشترین کارایی حاصل‌شده و با پیشگیری از حالت لجنی شدن مواد با ایجاد مه ای از قطرات آب‌پاششی، غبار منتشره فرونشانده شود. فرایند تولید قطرات آب در این سامانه به کمک یک کمپرسور مولد هوای فشرده و تعدادی نازل صورت پذیرفت. آب توسط یک پمپ که به یک الکتروموتور وصل شده است از داخل مخزن ذخیره آب مکش شده و فشرده می‌گردد و داخل شیلنگ پمپاژ می‌شود. معمولاً فشار داخل شیلنگ توسط پمپ قابل تنظیم است، این شیلنگ به‌نوبه خود به پاشنده با منافذ متفاوت وصل است [۱۷-۱۵]. اندازه منافذ موردنظر با توجه به توزیع اندازه ذرات در نظر گرفته شد. با توجه به فرایند و شرایط کار سامانه مه پاش قبل از سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی تعبیه شد.

طراحی سامانه تهویه موضعی برای نوار نقاله‌ها و سرند با اقتباس از استانداردهای VS_50_20 و VS_99_01 کمیته تهویه صنعتی ACGIH [۱۸] و برای سنگ‌شکن‌های فکی و مخروطی راهنماهای ارائه‌شده در مراجع معتبر صورت گرفت [۳]. محاسبات کانال‌کشی نیز بر اساس اصل توازن فشار برآورد شد [۱۹].

با توجه به اینکه پالایشگر سیکلون و سامانه مه پاش به‌صورت مجزا کارایی مناسبی ندارند به‌منظور جمع‌آوری غبار منتشره نیاز به پالایشگر پرهزینه‌ای مانند صافی کیسه ای بود. طراحی این پالایشگر جهت برآورد هزینه‌های اقتصادی این پالایشگر و صرفه اقتصادی پروژه انجام شد ولی اجرا نشد.

با توجه به دبی هوای سامانه تهویه و مدل سیکلون در ابتدا قطر بدنه و سپس سایر ابعاد هندسی سیکلون محاسبه گردید. بازده جمع‌آوری کل و جزئی سیکلون ها نیز با قطر برشی ۵۰٪ (dp_c)، و با استفاده از رابطه کلی زیر محاسبه گردید:

$$d_{pc}= [9\mu w/(2\pi N_e v_i (\rho_p-\rho_g))]^{(0/5)}$$

μ: ویسکوزیته گاز kg/m.s

w: عرض کانال ورودی به سیکلون(m)

N_e: تعداد دور چرخش مفید سیال

Vi: سرعت جریان هوای ورودی به سیکلون (m/s)

P_P:دانسیته ذره برحسب kg/m^3

P_g: دانسیته گاز برحسب kg/m^3

بازده جزئی η_j برای ذرات مختلف با رابطه زیر محاسبه گردید:

$$\eta_j=1/(1+(d_{pc}/d_{pj})^2$$

d_{pj}: قطر بارز اندازه j ام ذره برحسب (μm).

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

بازده کلی سیکلون نیز به کمک رابطه زیر محاسبه گردید [۱۹]:

$$\eta = \sum(\eta_j m_j) / M$$

در نهایت افت فشار سیکلون موردنظر محاسبه شد. مشخصات فنی هواکش نیز پس از تعیین دبی هوا، افت فشار سامانه، مدل هواکش و بازده آن تعیین گردید [۱۹].

بعد از طراحی، ساخت، نصب و راه‌اندازی سامانه تهویه موضعی و مه پاش، بازده کنترل ذرات منتشره در محیط کار، مواجهه فردی و انتشار زیست‌محیطی سامانه تهویه موضعی به‌تنهایی و به‌صورت تلفیقی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق بررسی‌های انجام‌شده در این واحد در هر نوبت کاری ۳ نفر به‌طور مستمر در واحد سنگ‌شکن فعالیت می‌کنند، که شرایط کاری یکسانی دارند، لذا از منطقه تنفسی کارگران در چهار وضعیت (بدون هیچ‌گونه سامانه کنترلی، فعال بودن سامانه مه پاش به‌تنهایی، فعال بودن سامانه تهویه به‌تنهایی، فعال بودن هر دو سامانه مه پاش و تهویه)، نمونه‌برداری صورت گرفت. جهت نمونه‌برداری از پمپ نمونه‌برداری فردی مدل 224-PCER3، سیکلون نایلونی، و فیلترهای PVC با قطر ۲۵ mm استفاده گردید. برای تعیین غلظت ذرات منتشره در هوای کارگاه مطابق وضعیت‌های ذکرشده فوق، در هر وضعیت ۳ نمونه گرفته شد. بدین منظور از پمپ نمونه‌برداری فردی، فیلترهای PVC با قطر mm ۳۷ و نگهدارنده دوبخشی فیلتر مدل Close Face استفاده گردید. دبی موردنیاز برای نمونه‌برداری فردی ۱/۷ lit/min و برای تعیین ذرات کل در محیط lit/min ۲ در نظر گرفته شد [۲۰ و ۹]. نمونه‌برداری ایزوکنتیک ذرات در داخل کانال‌های سامانه تهویه بر اساس روش استاندارد شماره ۵ ارائه‌شده توسط سازمان EPA صورت گرفت. تعیین تعداد نقاط نمونه‌برداری در سطح مقطع کانال‌ها بر اساس استاندارد BS 3405 صورت گرفت [۹]. به‌منظور نمونه‌برداری ایزوکنتیک ذرات در داخل کانال‌های سامانه تهویه از دستگاه portable dust monitor ساخت شرکت grimm-1.108 استفاده شد. بر این اساس ۴ بار تکرار نمونه‌برداری قبل و بعد از سیکلون جهت قضاوت در مورد میزان بار ذرات در هر ایستگاه صورت گرفت. کلیه فیلترهای نمونه‌برداری قبل و بعد از انجام نمونه‌برداری به مدت ۲۴ ساعت در دسیکاتور قرار گرفت. نمونه‌های تهیه‌شده به آزمایشگاه منتقل‌شده و تعیین مقدار آن‌ها به روش گراویمتری صورت گرفت.

اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری‌ها با استفاده از نرم‌افزار spss16 مورد تجزیه‌وتحلیل آماری قرار گرفت. جهت تحلیل داده‌های مطالعه از آزمون‌های آماری One – Way Anova و T-test زوجی استفاده شد.

یافته‌ها

ساختار سامانه تهویه صنعتی و سه سیکلون استایرمند در شکل ۱ نشان داده‌شده است.

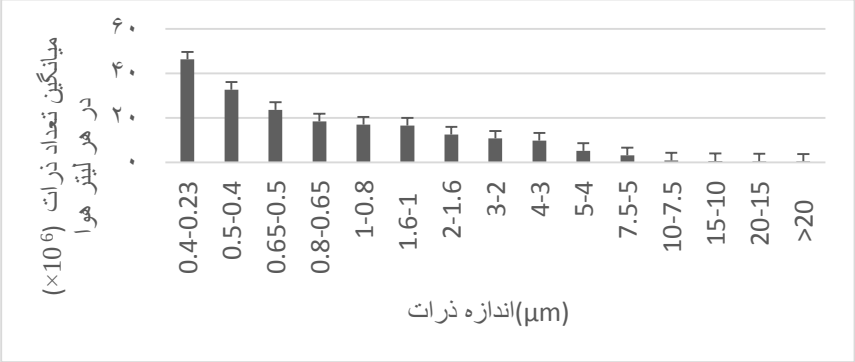
سامانه مه پاش با در نظر گرفتن عوامل مؤثر در بازده آن تعبیه شد. در این مطالعه از نازل های مخروطی استفاده شد. اندازه منافذ نازل سامانه مه پاش با توجه به توزیع اندازه ذرات که در شکل ۲ نشان داده‌شده است، ۲۰ تا ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. الگویی پاشش و زاویه آن در شکل ۳ نشان داده‌شده است.

سه سیکلون مدل استایرمند بازده بالا برای این واحد سنگ‌شکن طراحی شد. سیکلون ها ابعاد هندسی یکسانی داشتند. قطر بدنه استوانه‌ای (D_c) سیکلون با توجه به دبی ۴۴۲۳ cfm ، ۱/۱۶ m محاسبه شد. دیگر ابعاد هندسی سیکلون با توجه به روابط مرتبط با D_c تعیین شد. این ابعاد در جدول ۱ نشان داده‌شده است.

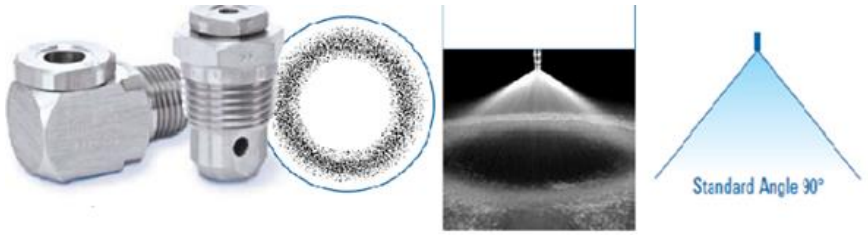
افت فشار سیکلون ها ۹۲۴ pa (۳/۷۱ in.w.g) برآورد شد. جهت مکش غبار و غلبه بر افت فشار سامانه تهویه صنعتی و پالایشگرهای سیکلون یک هواکش سانتریفیوژی با پره های های شعاعی طراحی شد. دبی هواکش ۱۳۲۷۰ cfm، فشار استاتیک کل و توان الکتریکی به ترتیب تقریباً ۴۱۸۵ pa و ۴۷/۰۴ kW حاصل شد.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

شکل ۱- ساختار و طرح سامانه تهویه صنعتی و سه سیکلون استایرمند



شکل ۲- توزیع اندازه ذرات منتشره



شکل ۳- الگو و زاویه پاشش سامانه مه پاش [۱۷-۱۵]

جدول ۲ غلظت غبار کل و قابل استنشاق را در چهار وضعیت ذکرشده نشان می‌دهد. با اجرای سامانه تلفیقی غلظت غبار کل از mg/m^3 ۵۹/۶۴ به mg/m^3 ۲/۸۷ و غلظت غبار قابل استنشاق از mg/m^3 ۱۴/۰۲ به mg/m^3 ۱/۶۰ کاهش یافت. بازده سیکلون با توجه به قطر بارز در هر محدوده قطر، در شکل ۴ ارائه گردیده است.

غلظت ذرات در ایستگاه قبل و بعد از سیکلون در

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

جدول ۱- ابعاد هندسی سیکلون استایرمند

ابعاد	D_C	H	H	Z	B	a	B	D_e	S
اندازه (m)	۱/۱۶	۴/۶۴	۱/۷۴	۲/۹	۰/۴۳۵	۰/۵۸	۰/۲۳۲	۰/۵۸	۰/۷۲۵

جدول ۳- نتایج سنجش غبار کل و قابل استنشاق

نوع سیستم	بدون هیچ‌گونه سامانه کنترلی	ضریب تغییرات (٪)	فعال بودن سامانه مه پاش به‌تنهایی	ضریب تغییرات (٪)	فعال بودن سامانه تهویه به‌تنهایی	ضریب تغییرات (٪)	فعال بودن هر دو سامانه مه پاش و تهویه صنعتی	ضریب تغییرات (٪)
غلظت غبار قابل استنشاق (mg/m^3)	۱/۵۹ ± ۱۴/۰۲	۱۱/۳۸	۰/۵۶ ± ۶/۴۴	۸/۷۲	۰/۶۸ ± ۳/۷۵	۱۸/۲۹	۰/۳۹ ± ۱/۶۰	۲۴/۸۹
غلظت غبار کل (mg/m^3)	۷/۹۴ ± ۵۹/۶۴	۱۳/۳۱	۲/۲۰ ± ۳۰/۴۶	۷/۲۲	۱/۳۰ ± ۱۴/۲۸	۹/۱۵	۰/۲۶ ± ۲/۸۷	۹/۲۹

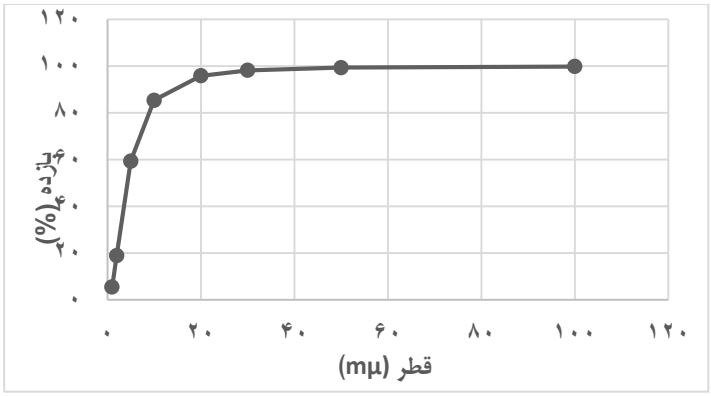
وضعیتی که سامانه تهویه به‌تنهایی فعال بود، به ترتیب $2220/83\ mg/m^3$ و $1381/49\ mg/m^3$ و در وضعیتی که هر دو سامانه مه پاش و تهویه صنعتی فعال بود، به ترتیب $1131/39\ mg/m^3$ و $105/49\ mg/m^3$ برآورد شد. نمودار بازده سامانه در کاهش مواجهه فردی، انتشار محیط کار و انتشار زیست‌محیطی در شکل ۵ نشان داده‌شده است. با توجه به این نمودار بازده سامانه مه پاش در حذف ذرات قابل استنشاق ۵۴ درصد، سامانه تهویه ۷۳ درصد و سامانه تلفیقی ۸۸ درصد و در مورد ذرات کل محیطی بازده حذف ذرات سامانه مه پاش ۴۹ درصد، سامانه تهویه ۷۶ درصد و سامانه تلفیقی ۹۵ درصد به‌دست‌آمده است. در مورد انتشار ذرات زیست‌محیطی بازده جمع‌آوری ذرات در وضعیتی که فقط سامانه تهویه فعال بود، ۳۸ درصد و در وضعیتی که هر دو سامانه مه پاش و تهویه صنعتی فعال بود، ۹۰ درصد برآورد شد. همچنین مقایسه تعداد ذرات داخل کانال در دو وضعیت فعال بودن سامانه تهویه به‌تنهایی و فعال بودن هر دو سامانه تهویه و مه پاش در شکل ۶ ارائه گردیده است.

نتایج آزمون آماری نشان داد که میانگین غلظت غبار کل و قابل استنشاق در همه وضعیت‌های ذکرشده در بالا، اختلاف معناداری ازنظر آماری باهم داشتند، همچنین میانگین غلظت غبار در داخل کانال قبل و بعد از پالایشگر سیکلون در دو وضعیت (فقط سامانه تهویه کار می‌کند، سامانه تلفیقی تهویه و مه پاش کار می‌کرد) اختلاف معناداری ازنظر آماری باهم داشتند ($p<0/041$). سطح معنی داری ذکر شده بیشترین مورد در وضعیت های مطالعه شده می باشد.

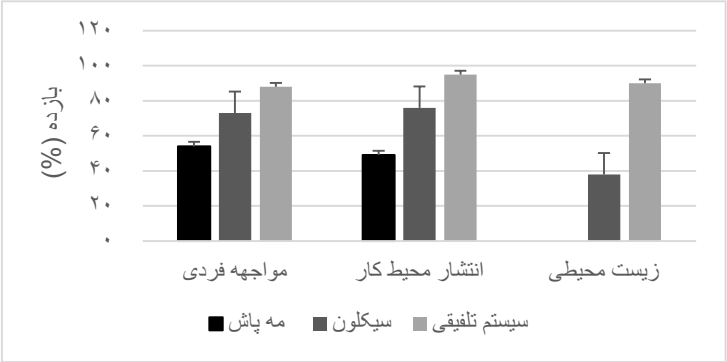
با توجه به ارزیابی‌های به‌عمل‌آمده با اجرای تلفیقی این دو سامانه میزان انتشار زیست‌محیطی ذرات به کمتر از حدود مجاز زیست‌محیطی کاهش یافت. طبق محاسبات و برآورد هزینه‌های به‌دست‌آمده، هزینه ساخت، نصب و راه‌اندازی سه سیکلون استایرمند بازده بالا و سامانه مه پاش در حدود ۲۰۰ میلیون ریال شد.

با توجه به دبی سامانه تهویه و سایر مشخصات چنانچه از صافی کیسه ای استفاده می‌گردید به تعداد ۱۷۴ کیسه فیلتر با قطر 15 cm و ارتفاع 2/5 m نیاز بود. هزینه این تعداد فیلتر همراه با هزینه کمپرسور هوا و هزینه نصب و راه‌اندازی و بدون احتساب هزینه نگهداری و پرسنل، در حدود ۱/۱۷ میلیارد ریال برآورد شد. سایر هزینه‌ها شامل ساخت و نصب هود، کانال‌کشی در هر دو سامانه یکسان بود بااین‌حال هزینه نگهداری و پرسنلی سیستم تلفیقی مه پاش و تهویه صنعتی در مقایسه با صاقی کیسه ای ناچیز است. لذا با اجرای سامانه تلفیقی ۸۳ درصد هزینه‌های اجرایی پروژه کاهش یافت و می‌توان در شرایط مشابه این سامانه تلفیقی را به‌عنوان یک راهکار مؤثر و اقتصادی پیشنهاد داد.

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]



شکل ۴- منحنی بازده جزئی جمع‌آوری سیکلون استایرمند بازده بالا در قطرهای مختلف



شکل ۵- بازده سامانه در کاهش مواجهه فردی، انتشار محیطی و زیست‌محیطی

بحث و نتیجه‌گیری

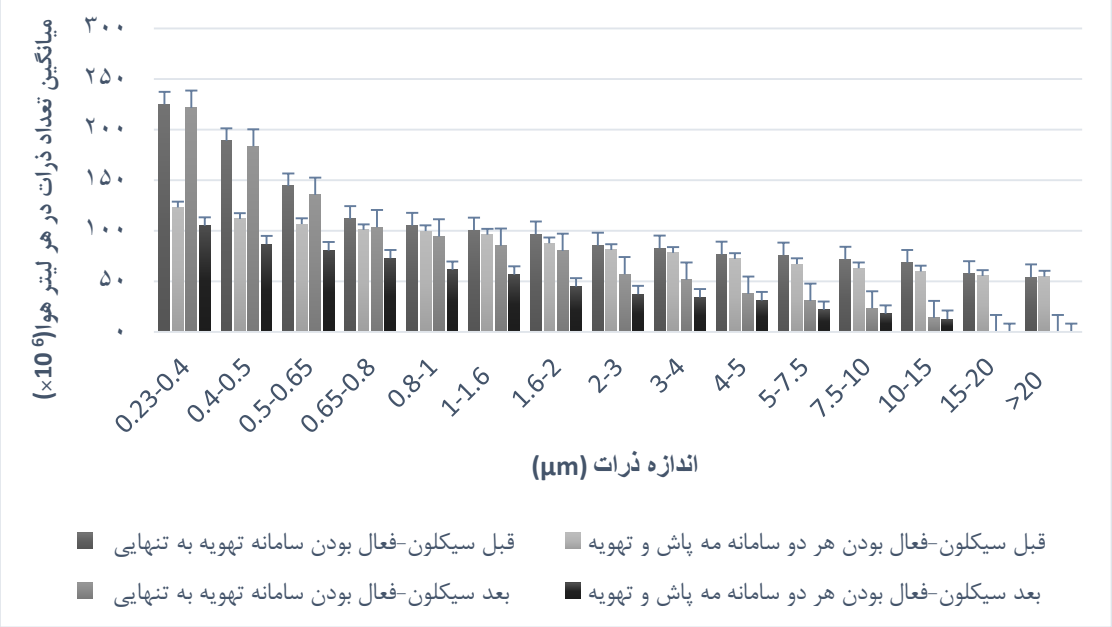
نتایج مطالعه نشان داد بین بازده سامانه تلفیقی، سامانه مه پاش و پالایشگر سیکلون در حذف ذرات قابل استنشاق و محیط کار اختلاف معناداری وجود دارد بدین ترتیب که بازده جمع‌آوری سامانه تلفیقی بالاتر از بازده جمع‌آوری سامانه مه پاش و سیکلون به‌صورت مجزا می‌باشد، همچنین سیکلون نسبت به سامانه مه پاش بازده بالاتری دارد. در مورد انتشار ذرات به زیست محیط بازده سیستم تلفیقی در حذف ذرات نسبت به بازده سیستم تهویه بالاتر بود. با توجه به و تراکم بالای غبار در این فرایندها استفاده مجزا از این وسایل غبارگیر به‌منظور پالایش هوا کافی نمی‌باشد.

در مطالعه‌ای که بهرامی و همکاران تحت عنوان تأثیر سرعت و بار ذرات بر کارایی سیکلون در واحد سنگ‌شکن انجام دادند، نتایج نشان داد رابطه و همبستگی معناداری بین غلظت ورودی به سیکلون و بازده جمع‌آوری ذرات وجود دارد و با افزایش غلظت ورودی بازده سیکلون افزایش می‌یابد [۱۳].

نتایج مطالعه نشان داد که غلظت غبار قابل استنشاق (۱۴/۰۲mg/m^3) در کلیه نمونه‌ها بالاتر از حد مواجهه شغلی ایران (OEL) و حد آستانه مجاز ACGIH (۳mg/m^3) [۲۳و ۲۲]، و حد پیشنهادی OSHA و NIOSH (۵mg/m^3) بودند [۲۴]. غلظت این نمونه‌ها۵-۴ برابر حد پیشنهادی OEL و ACGIH و ۳-۲ برابر حد پیشنهادی OSHA و NIOSH بودند، که با اجرای سامانه تلفیقی غلظت به ۱/۶ mg/m^3 کاهش یافت که کمتر از حدود مذکور می‌باشد.

در مطالعه‌ای که توسط Fulekar در فرایند سنگ‌شکن انجام‌شده است، نتایج مطالعه نشان می‌دهد که میانگین غلظت ذرات قابل استنشاق و کل به ترتیب ۲/۹۳ mg/m^3 و ۲۲/۵ mg/m^3 است [۲۵]، که در مقایسه با نتایج مطالعه حاضر، نشانگر بالاتر بودن غلظت

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]



شکل ۶- مقایسه تعداد ذرات داخل کانال در دو وضعیت فعال بودن سامانه تهویه به‌تنهایی و فعال بودن هر دو سامانه تهویه و مه پاش

غبار در واحد سنگ‌شکن این شرکت معدنی می‌باشد. یکی از دلایل اصلی غلظت بالای غبار در این مطالعه نوع فرایند و تجهیزات فرسوده می‌باشد.

در این مطالعه با توجه به نتایج اندازه‌گیری‌ها، به دلیل تراکم بسیار بالای ذرات منتشره ناشی از منابع آلاینده و همچنین نیاز به بازیافت مجدد ذرات که برای صنعت موردمطالعه ارزش اقتصادی داشتند، بهترین و کم‌هزینه‌ترین وسیله، استفاده از سیکلون بازده بالابود. به همین منظور از سه سیکلون موازی بازده بالای مدل استایرمند استفاده شد، به دلیل اینکه بیشترین بازده را در حذف ذرات نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

مطالعه‌ای توسط قربانی و همکاران در جهت کنترل آلاینده‌های هوا با استفاده از سامانه تهویه موضعی و پالایشگرهای تلفیقی در یک شرکت معدنی جهت انجام شد. در این مطالعه به دلیل تراکم بسیار بالای ذرات منتشره، از چهار دسته سیکلون موازی استفاده گردید. نتایج به‌دست‌آمده از سنجش میزان ذرات نشان داد که بازده سیکلون‌های موازی مورداستفاده در این مطالعه ۹۴ درصد می‌باشد [۱۳]. در مطالعه‌ای دیگر قربانی و همکاران جهت کنترل غبار کوره‌های ذوب از ۱۰ سیکلون موازی استایرمند استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که بازده سیکلون های موازی مورداستفاده ۷۳ درصد می‌باشد [۲۶].

علی‌آبادی و همکاران مطالعه مشابه ای در فرایند سنگ‌کوبی انجام دادند، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد بین بازده جمع‌آوری غبار کل و قابل استنشاق سیکلون، اسکرابر مه پاش و بازده سامانه تلفیقی اختلاف معنی‌دار آماری وجود دارد. همچنین با توجه به نتایج مطالعه سیکلون کارایی و بازده بالاتری نسبت به اسکرابر مه پاش داشت و بازده سیکلون در حذف ذرات قابل استنشاق و ذرات کل اختلاف چندانی بامطالعه حاضر ندارد [۹].

در مطالعه‌ای که توسط Kolip و Savas در ترکیه انجام شد، سیکلون‌های موازی مورداستفاده در این مطالعه بازده بالاتری را نسبت به این مطالعه حاضر در حذف ذرات زیر ۱۰ میکرون را نشان می‌دهد [۱۲]. مطالعه Karagoz و همکاران در طراحی سیکلون جدید و ارزیابی آن نشان داد که با افزایش طول جریان چرخشی و تعداد چرخش کارایی سیکلون افزایش می‌یابد [۲۷]. یار احمدی و همکاران نیز در مطالعه ای که به

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

منظور بررسی نقش فاکتورهای آئرودینامیکی-هندسی سیکلون در حذف ذرات انجام دادند از سیکلونی با قابلیت تغییر در زاویه ورودی و ارتفاع ایجاد کننده گرداب استفاده کردند. نتایج مطالعه نشان داد که این مدل سیکلون با بازده ۹۰-۶۰ درصد برای فرایند هایی با انتشار ذرات ۱۰-۱ میکرومتر موثر هستند [۲۸].

به نظر می‌رسد عوامل تأثیرگذار در تغییرات بازده این مطالعه نسبت به مطالعات ذکرشده، نوع و غلظت غبار، تکنولوژی قدیمی واحد سنگ‌شکن و ویژگی‌های سامانه تهویه باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در مطالعه حاضر سیکلون دارای بازده بالاتری نسبت به سامانه مرطوب‌سازی می‌باشد. این بازده بالا نشان‌دهنده نقش تأثیرگذار سیکلون ها در فرایندهایی با غلظت بالای غبار و توزیع سایز ذرات مختلف می‌باشد. بااین‌وجود طبق مطالعات گذشته جهت افزایش حداکثری بازده سیکلون می‌توان عوامل مؤثر بر بازده سیکلون را تغییر داد.

طی گزارشی که توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) تحت عنوان ارزیابی مواجهه با ذرات هوابرد در محیط‌های کار منتشر گردید، سیکلون را یک پیش پالایشگر بسیار مناسب در محیط‌هایی که تراکم بار ذرات خیلی بالا باشد، معرفی نمود [۲۹].

Kulkarni و همکار وی مطالعه‌ای در ارتباط با پالایشگرهای سیکلون انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که سیکلون یکی از عمده‌ترین پالایشگرهای است که به دلیل سادگی و هزینه‌های عملیاتی کم به‌طور گسترده در صنعت مورداستفاده قرار می‌گیرد [۳۰].

بااین‌وجود طبق مطالعات ذکرشده تلفیق این پالایشگر با انواع پالایشگرهای دیگر، منجر به افزایش بازده سامانه تهویه صنعتی جهت کنترل تراکم‌های بالای ذرات با سایز ذرات زیر ۱۰ میکرومتر خواهد شد. در مطالعه حاضر نیز با تلفیق سیکلون با سامانه مه پاش و با توجه به تراکم بالای ذرات این مسئله مشهود است.

طی مطالعه‌ای که توسط Jayaraman و همکاران بر روی اسپری آب اتمیزه برای کنترل غبار انجام دادند، نتایج حاصل از آزمایش‌های آن‌ها نشان داد که اسپری‌های آب اتمیزه، کاهش کل غبار قابل استنشاق، به‌ویژه غبار در محدوده سایز سه میکرون و کمتر را بهبود می‌بخشد. همچنین محدوده اندازه‌ای که نشان داده‌شده است شامل مقدار قابل‌توجهی از غبار قابل استنشاق کوارتز می‌باشد. همچنین در مطالعه‌ای دیگر که توسط بیاتیان و همکاران انجام شد، نتایج نشان داد که با افزایش دبی آب بازده جمع‌آوری ذرات قابل استنشاق و غیرقابل استنشاق فلدسپار افزایش می‌یابد. Mason و Janas طبق مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که هنگامی‌که قطر قطرات مایع اسپری شده کاهش یابد بازده جمع‌آوری ذرات افزایش می‌یابد [۳۳-۳۱]. Fangwei و همکاران به‌منظور کنترل ذرات معادن از فوم شارژ الکتریکی شده و نازل جت اسپری استفاده کردند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد بازده این سامانه در حذف غبار کل و قابل استنشاق به ترتیب ۸۵/۸ ٪ و ۸۲/۶ ٪ بود که ۱/۳۹ و ۱/۳۷ برابر بیشتر از نازل‌های مخروطی می‌باشد[۳۴].

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده در این مطالعه بازده حذف ذرات قابل استنشاق (۵۴ ٪) سامانه مه پاش نسبت به ذرات کل (۴۹ ٪) بالاتر بوده است و با مطالعه Fangwei و همکارانش در ارتباط با نازل های مخروطی مطابقت دارد.

به نظر می‌رسد در صورت افزایش دبی آب و کوچک‌تر شدن قطرات آب، بازده حذف ذرات کوچک‌تر افزایش یابد. همچنین نتایج ارائه‌شده در شکل ۵ نشان داد که سامانه مه پاش علاوه بر حذف ذرات در منابع مولد آلودگی، منجر به چسبندگی و افزایش وزن ذرات می‌گردد که به‌نوبه خود بازده حذف ذرات را افزایش می‌دهد.

با توجه به نتایج مطالعه استفاده از سامانه تلفیقی مه پاش و سیکلون نقش مؤثری در کاهش غبار هوای واحد سنگ‌شکن این شرکت معدنی را داشته است. این سامانه تلفیقی غبارگیر ازنظر هزینه‌های نگهداری و ملاحظات مصرف انرژی نسبت به غبارگیرهای پرهزینه‌تری مثل صافی کیسه‌ای و اسکرابرها مقرون‌به‌صرفه تر بوده و بر این اساس استفاده از این

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

سامانه تلفیقی در فرایندهای مشابهی که استفاده از رطوبت تأثیری بر خلوص مواد ندارد، با در نظر گرفتن ملاحظات طراحی پیشنهاد می‌گردد. انتظار می‌رود با اجرای این مطالعه، با کاهش غبار خروجی از این صنعت، به مقادیر کمتر از استانداردهای زیست‌محیطی، گام مؤثرتری در کاربردی نمودن علوم دانشگاهی در حل معضلات صنعتی برداشته شود.

منابع

1. Onder S, Dursun S. Air borne heavy metal pollution of Cedrus libani (A. Rich.) in the city centre of Konya (Turkey). Atmospheric Environment. 2006;40(6):1122-33.
2. Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. Environ Pollut. 2008;151(2):362-7.
3. Mody V, Jakhete R. Dust control handbook. New jersey: Noyes publications; 1988.
4. Giasooddin m. Air Pollution. Tehran: Tehran University Press; 2001.[Persian]
5. Silvester SA, Lowndes IS, Kingman SW, Arroussi A. Improved dust capture methods for crushing plant. Applied Mathematical Modelling. 2007;31(2):311-31.
6. Cecala BA. Controlling Respirable Silica Dust in Mineral Processing Operations. In: F. Colinet J, B. Cecala A, J. Chekan G, A. Organiscak J, L. Wolfe A, editors. Best Practices for Dust Control in Metal/Nonmetal Mining. Pittsburgh, PA Centers for Disease Control and Prevention; 2010. p. 26-58.
7. Ray MB, Luning PE, Hoffmann AC, Plomp A, Beumer MI. Improving the removal efficiency of industrial-scale cyclones for particles smaller than five micrometre. International journal of mineral processing. 1998;53(1):39-47.
8. Yang J, Sun G, Gao C. Effect of the inlet dimensions on the maximum-efficiency cyclone height. Separation and Purification Technology. 2013;105:15-23.
9. Aliabadi M, Bahrami A, Golbabae F, Ghorbani F. Comparative Study of Efficiency using of Cyclone, Spray Scrubber and integrated system of cyclone- spray scrubber to collect Silica Particles in stone Crushing Workshops. Journal of environmental science and technology. 2010;12(2):71-8. [Persian]
10. Kim H, Lee K, Kuhlman M. Exploratory design modifications for enhancing cyclone performance. Journal of aerosol science. 2001;32(10):1135-46.
11. Goodman GV. Using water sprays to improve performance of a flooded-bed dust scrubber. Appl Occup Environ Hyg. 2000;15(7):550-60.
12. Kolip A, Savas AF. Energy and exergy analyses of a parallel flow, four-stage cyclone precalciner type cement plant. International Journal of Physical Sciences. 2010;5(7):1147-63.
13. Bahrami A, Qorbani F, Mahjub H, Aliabadi M. Effects of velocity and particles load on efficiency of cyclone in the stone crushing units at Azendarian Area. Journal of research in health sciences. 2008;8(1):12-7.
14. Ghorbani Shahna F, Bahrami A, Farasati F. Application of local exhaust ventilation system and integrated collectors for control of air pollutants in mining company. Industrial health. 2012;50(5):450-7.
15. Co. SS. A Guide to Spray Technology for Dust Control: Spraying Systems Co. Bulletin B; 2008.
16. Schick RJ. Spray technology reference guide: Understanding drop size. Spraying Systems Co Bulletin B. 2008;459:8-16.
17. Co SS. Optimizing Your Spray System:Spray nozzle maintenance and control for improved production efficiency: Spraying Systems Co; 2009.
18. (ACGIH) ACoGIH. Industial Ventilation. 27 ed. Cincinnati: ACGIH Signature Publication; 2010.
19. Cralley LJ. Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice. American Journal of Public Health and the Nations Health. 1955;45(10):1369.
20. Theodore L. Air pollution control equipment calculation. new jersey: John Wiley & Sons 2008.
21. National Institute for Occupational Safety and Health,NIOSH Manual of Analytical Methods (NMAM), 4th,particulates not otherwise regulated, RESPIRABLE: METHOD 0600, NIOSH, Issue 3, dated 15 January 1998 - Page 2 of 6.
22. Ministry of Health and Medical Edication,Depatement of Health,Iranian Occupational Exposure Limits, Iran.
23. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, thereshold limit value for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. ACGIH Signature Publication, Cincinnati
24. National Institute for Occupational Safety

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

anad Health(NIOSH), Depatement of Health and Human Services.

25. Fulekar M. Occupational exposure to dust in quartz manufacturing industry. Annals of Occupational Hygiene. 1999;43(4):269-73.

26. Garkaz AH, Ghorbani Shahna F, Assari M, faradmal J. The designing and assessment of a local exhaust ventilation system coupled with hybrid collectors for air pollution control of an alloy steel company. Iran Occupational Health Journal. 2015;12(1):38-46. [Persian]

27. Karagoz I, Avci A, Surmen A, Sendogan O. Design and performance evaluation of a new cyclone separator. Journal of Aerosol Science. 2013;59:57-64.

28. Yarahmadi R, Borani jabali M, Moridi P. Survey of aerodynamic-geometric factors role on particle filtration efficiency of cyclone. Iran Occupational Health Journal. 2013;10(5):33-43.

29. Organization WH. evaluation of exposure to airborne particles in the work inviroment. Geneva: WHO offset publication; 1984.

30. Kulkarni SJ, Shinde NL. Studies and Research on Cyclone Separators: A Review. International Journal of Scientific Research in Science and Technology. 2016

31. Jayaraman NI, Jankowski RA. Atomization of water sprays for quartz dust control. Applied Industrial Hygiene. 1988;3(12):327-31.

32. Bayatian M, Bahrami AR, Golmohammadi R, Ghorbani Shahna F. The study of water droplets electrical charging effect on spray tower scrubber efficiency for feldspar particles removal. Iran Occupational Health Journal. 2012;8(4):61-9. [Persian]

33. Vaaraslahti K, Laitinen A, Keskinen J. Spray charging of droplets in a wet scrubber. Journal of the Air & Waste Management Association. 2002;52(2):175-80.

34. Fangwei H, Deming W, Jiaxing J, Xiaolong Z. A new design of foam spray nozzle used for precise dust control in underground coal mines. International Journal of Mining Science and Technology. 2016

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]

Control of fugitive dust emitted by combination of water spray and industrial ventilation as an efficient and economical solution at a mining company

Morteza Babaei[1], Abdolrahman Bahrami[2], Farshid Gorbani Shahna[3]

Received: 2016/01/05 Revised: 2016/09/13 Accepted: 2016/11/07

Abstract

Background and aims: Dust emission is one of the main health and environmental problems during the crushing, screening and conveying process in mining company. The goal of this study was designing, implementation and evaluation of industrial ventilation and combination with a water spray for control the airborne particles as well as economic analysis on crushing unit of a mining company.

Methods: After ensuring the lack of destructive effect of humidity on material properties, a water spray system was designed and installed for settling some of produced dusts. Other emitted particles were also controlled by designing and implementation of local exhaust ventilation system. This system was evaluated after installation. For collection of dust, three Stairmand cyclone with high efficiency were used. Finally, the efficiency of water spray and industrial ventilation systems was investigated as single and combined in the control of fugitive particles in ambient air, occupational exposure and environmental emission.

Results: The efficiency of the wet and ventilation system, alone and combined in reducing workplace dust concentration were 49%, 76% and 95%, respectively. Moreover, the efficiency of the wet, ventilation and combined system in reducing the exposure to repairable particles were 54%, 73% and 88%, respectively.

Conclusion: According to the present evaluations by implementing the combination of these two systems, the occupational exposure of workers, ambient dust concentration and emitted dust to environmental was fell to less than permissible limits. According to the economic analysis, over 80% of total costs by combined procedure was reduced. Therefore, this system can be proposed as an effective and cost-effective in such conditions.

Keywords: Mining, Water spray, Cyclone, Industrial Ventilation, Dust.

1. MSc, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran.
2. Professor, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran.
3. (**Corresponding author**) Associate Professor, Center of Excellence for Occupational Health, Occupational Health and Safety Research Center, School of Public Health, Hamadan University of Medical Science, Hamadan, Iran. fghorbani@umsha.ac.ir

[Downloaded from ioh.iums.ac.ir on 2026-06-10]