

فصلنامه علمی پژوهشی در ایمنی، سلامت و محیط زیست

ارزیابی فناوری های نوین کنترل آلاینده های هوا و نقش آن ها در کاهش مخاطرات سلامت انسان (مطالعه موردی سیستم اسکرابر مرطوب)

محمدحسن کامیاب^۱، زهرا کامیاب^{۲*}

۱- نویسنده مسئول: پژوهشگر و مدرس دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
۲- دکتری آموزش و ترویج مهندسی کشاورزی و محیط زیست دانشکده اقتصاد و توسعه دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	مشخصات مقاله
امروزه افزایش انتشار آلاینده های صنعتی یکی از مهم ترین عوامل تهدیدکننده سلامت انسان و کیفیت محیط زیست به شمار می رود. انتشار ذرات معلق، گازهای اسیدی، ترکیبات آلی فرار و فلزات سنگین موجب افزایش بیماری های تنفسی، قلبی-عروقی و سرطان ها شده است. انتخاب فناوری مناسب برای کنترل این آلاینده ها نقش تعیین کننده ای در کاهش مخاطرات زیست محیطی و حفظ سلامت عمومی دارد. در این پژوهش، فناوری های متداول حذف آلاینده های هوا شامل اسکرابر مرطوب، اسکرابر خشک، بگ فیلتر، سیکلون و رسوب دهنده الکترواستاتیکی از نظر راندمان حذف آلاینده ها، مصرف انرژی، هزینه های بهره برداری، قابلیت حذف آلاینده های مختلف و اثرات زیست محیطی مورد مقایسه قرار گرفته اند. همچنین با استفاده از نتایج ارائه شده در فایل های فنی، عملکرد اسکرابر مرطوب از جنبه طراحی، مدیریت پساب، الزامات بهره برداری، انطباق با استانداردهای زیست محیطی و امکان بهینه سازی به کمک شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی CFD بررسی شده است. نتایج نشان می دهد اسکرابرهای مرطوب با وجود نیاز به مدیریت پساب، راندمان بسیار مناسبی در حذف گازهای اسیدی و ذرات ریز داشته و در بسیاری از صنایع به عنوان یکی از مؤثرترین فناوری های کاهش آلاینده های هوا شناخته می شوند. همچنین استفاده از شبیه سازی عددی و بهینه سازی پارامترهای عملیاتی می تواند موجب افزایش راندمان حذف آلاینده ها و کاهش مصرف انرژی گردد	تاریخچه مقاله: نوع مقاله: پژوهشی دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۳ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۷ انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۷/۲۱ نویسنده مسئول: mohammadhkamyab@gmail.com کلید واژه ها: آلاینده های محیط زیست، سلامت انسان، آلودگی هوا، اسکرابر مرطوب، فناوری های کنترل آلاینده



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)
این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد سریع صنایع، توسعه شهرنشینی، افزایش مصرف انرژی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی موجب افزایش چشمگیر انتشار آلاینده‌های محیط زیست شده است. آلودگی هوا، آب و خاک امروزه به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در حوزه توسعه پایدار تبدیل شده و پیامدهای آن نه تنها بر اکوسیستم‌های طبیعی، بلکه بر سلامت انسان نیز به‌طور مستقیم و غیرمستقیم تأثیرگذار است. بر اساس گزارش‌های سازمان جهانی بهداشت (WHO)، سالانه میلیون‌ها نفر در سراسر جهان به دلیل قرار گرفتن در معرض آلاینده‌های محیطی جان خود را از دست می‌دهند و بخش قابل توجهی از بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی، سرطان‌ها و اختلالات عصبی با کیفیت پایین محیط زیست ارتباط دارند. از این‌رو، کاهش انتشار آلاینده‌ها و توسعه فناوری‌های نوین کنترل آلودگی به یکی از اولویت‌های اصلی کشورها در مسیر دستیابی به توسعه پایدار و حفظ سلامت عمومی تبدیل شده است.

آلاینده‌های محیط زیست شامل طیف گسترده‌ای از ترکیبات شیمیایی و فیزیکی نظیر ذرات معلق ($PM_{2.5}$ و PM_{10})، اکسیدهای گوگرد (SO_x)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x)، مونوکسید کربن (CO)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، فلزات سنگین و سایر ترکیبات سمی هستند که از منابع مختلفی مانند صنایع شیمیایی، پالایشگاه‌ها، نیروگاه‌ها، صنایع معدنی، صنایع فولاد، حمل‌ونقل و فعالیت‌های احتراقی وارد محیط زیست می‌شوند. این آلاینده‌ها با نفوذ به دستگاه تنفسی و گردش خون انسان، موجب بروز التهاب مزمن، کاهش عملکرد ریه، بیماری‌های قلبی، اختلالات ایمنی، آسیب‌های ژنتیکی و افزایش خطر ابتلا به انواع سرطان می‌شوند. علاوه بر این، انتشار آلاینده‌ها موجب بروز پدیده‌هایی مانند باران اسیدی، گرمایش جهانی، کاهش تنوع زیستی و تخریب منابع طبیعی شده و هزینه‌های اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را به جوامع تحمیل می‌کند.

در پاسخ به این چالش‌ها، طی سال‌های اخیر فناوری‌های متنوعی برای کنترل و حذف آلاینده‌های صنعتی توسعه یافته‌اند. این فناوری‌ها شامل تجهیزات

مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی هستند که هر یک با توجه به نوع آلاینده، شرایط فرآیندی و الزامات زیست‌محیطی دارای کاربردهای متفاوتی هستند. از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده می‌توان به سیکلون‌ها، بگ‌فیلترها، رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی، اسکرابرهای خشک، اسکرابرهای مرطوب، سامانه‌های جذب با کربن فعال و فناوری‌های اکسیداسیون پیشرفته اشاره کرد. انتخاب فناوری مناسب علاوه بر افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها، موجب کاهش هزینه‌های عملیاتی، کاهش مصرف انرژی، افزایش قابلیت اطمینان تجهیزات و انطباق با استانداردهای زیست‌محیطی می‌شود.

در میان فناوری‌های موجود، اسکرابرهای مرطوب به دلیل قابلیت حذف هم‌زمان ذرات معلق، گازهای اسیدی و برخی ترکیبات سمی، یکی از مؤثرترین و پرکاربردترین سامانه‌های کنترل آلودگی هوا در صنایع مختلف محسوب می‌شوند. در این سامانه‌ها، تماس مستقیم بین جریان گاز آلوده و مایع جاذب سبب انتقال جرم، جذب آلاینده‌ها و کاهش غلظت آن‌ها در جریان خروجی می‌شود. راندمان بالای حذف، انعطاف‌پذیری در شرایط مختلف عملیاتی و امکان استفاده در صنایع شیمیایی، نفت، گاز، پتروشیمی، نیروگاهی و معدنی از مهم‌ترین مزایای این فناوری به شمار می‌رود. با این حال، مدیریت پساب تولیدی، بهینه‌سازی مصرف آب و انرژی و کاهش افت فشار از جمله چالش‌های مهم بهره‌برداری از اسکرابرهای مرطوب هستند که نیازمند طراحی دقیق و بهینه‌سازی مستمر می‌باشند.

پیشرفت روش‌های شبیه‌سازی عددی، به‌ویژه دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، امکان تحلیل دقیق رفتار جریان، توزیع سرعت، افت فشار، انتقال جرم و الگوی پاشش قطرات در اسکرابرها را فراهم کرده است. استفاده از این ابزارها موجب کاهش هزینه‌های طراحی، افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها، بهبود عملکرد تجهیزات و کاهش مصرف انرژی می‌شود. بر اساس مستندات فنی مورد بررسی، طراحی اسکرابر مرطوب با بهره‌گیری از شبیه‌سازی CFD، انتخاب مناسب نازل‌ها، طراحی سیستم گردش مجدد مایع، کنترل pH و پیش‌بینی سامانه مدیریت پساب، نقش مؤثری در افزایش کارایی سامانه و دستیابی به استانداردهای زیست‌محیطی دارد. همچنین

رعایت الزامات طراحی، انتخاب مواد مقاوم در برابر خوردگی، کنترل کیفیت ساخت و پایش مستمر آلاینده‌ها از عوامل کلیدی در عملکرد پایدار این سامانه‌ها محسوب می‌شود.

با وجود توسعه فناوری‌های مختلف کنترل آلاینده‌ها، انتخاب مناسب‌ترین فناوری همچنان یکی از چالش‌های اساسی صنایع محسوب می‌شود، زیرا هر فناوری دارای مزایا، محدودیت‌ها، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و راندمان متفاوتی در حذف آلاینده‌های مختلف است. از این رو، مقایسه جامع این فناوری‌ها از نظر شاخص‌های فنی، اقتصادی، زیست‌محیطی و تأثیر آن‌ها بر سلامت انسان می‌تواند راهنمای مناسبی برای تصمیم‌گیری مدیران صنعتی، سیاست‌گذاران و پژوهشگران باشد.

طی دو دهه گذشته، آلودگی محیط زیست به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در حوزه سلامت عمومی تبدیل شده است. افزایش فعالیت‌های صنعتی، توسعه شهرنشینی، رشد جمعیت و مصرف گسترده سوخت‌های فسیلی موجب افزایش انتشار آلاینده‌های هوا، آب و خاک شده است. سازمان جهانی بهداشت آلودگی هوا را یکی از مهم‌ترین عوامل خطر محیطی معرفی کرده و گزارش کرده است که سالانه حدود هفت میلیون مرگ زودرس در جهان به دلیل مواجهه با آلاینده‌های محیطی رخ می‌دهد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ذرات معلق، اکسیدهای گوگرد، اکسیدهای نیتروژن، ترکیبات آلی فرار و فلزات سنگین نقش مهمی در افزایش بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی، سرطان‌ها و اختلالات عصبی دارند.

مطالعات Manisalidis و همکاران (۲۰۲۰) [5] نشان داد که افزایش غلظت آلاینده‌های هوا، به ویژه $PM_{2.5}$ و PM_{10} ، ارتباط مستقیمی با افزایش میزان مرگ و میر و کاهش امید به زندگی دارد. این پژوهش بیان می‌کند که کنترل آلاینده‌ها باید علاوه بر جنبه‌های زیست‌محیطی، به عنوان یک راهکار مؤثر برای ارتقای سلامت عمومی نیز مورد توجه قرار گیرد.

از سوی دیگر، Fuller و همکاران (۲۰۲۲) [1] در گزارش کمیسیون Lancet تأکید کردند که آلودگی محیط زیست مسئول حدود ۹ میلیون مرگ در سال است و کشورهای در حال توسعه بیشترین آسیب را از انتشار

آلاینده‌های صنعتی متحمل می‌شوند. این مطالعه همچنین نشان داد که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها، علاوه بر کاهش هزینه‌های درمان، موجب افزایش بهره‌وری اقتصادی خواهد شد. در حوزه فناوری‌های کنترل آلاینده، پژوهش‌های متعددی به مقایسه روش‌های مختلف حذف آلاینده‌های صنعتی پرداخته‌اند. به طور کلی، فناوری‌های مکانیکی، الکترو استاتیکی، جذب سطحی، جذب شیمیایی و سامانه‌های شست‌وشوی گاز (Scrubber) رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در صنایع هستند. هر یک از این فناوری‌ها با توجه به نوع آلاینده، شرایط فرآیندی و هزینه‌های بهره‌برداری دارای مزایا و محدودیت‌های خاص خود هستند.

مطالعات Zhao و همکاران (۲۰۲۳) [8] نشان داد که اسکرابرهای مرطوب یکی از مؤثرترین فناوری‌های حذف هم‌زمان ذرات معلق و گازهای اسیدی هستند. این پژوهش بیان می‌کند که راندمان حذف SO_2 در اسکرابرهای مرطوب می‌تواند به بیش از ۹۸ درصد برسد، در حالی که راندمان حذف ذرات معلق نیز در شرایط بهینه از ۹۵ درصد فراتر می‌رود. البته تولید پساب و مصرف آب از مهم‌ترین محدودیت‌های این فناوری محسوب می‌شوند.

در مقابل، Zhang و همکاران (۲۰۲۲) [7] عملکرد بگ فیلترها را بررسی کردند و نشان دادند که این فناوری قادر است بیش از ۹۹ درصد ذرات معلق را حذف کند، اما در حذف گازهای آلاینده عملکرد مناسبی ندارد. بنابراین، در بسیاری از صنایع، بگ فیلتر به همراه اسکرابر مرطوب به صورت ترکیبی استفاده می‌شود تا حذف هم‌زمان ذرات و گازها امکان‌پذیر گردد.

مطالعات انجام‌شده درباره رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی (ESP) نیز نشان می‌دهد که این سامانه‌ها برای حذف ذرات بسیار ریز عملکرد مناسبی دارند، اما هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه نگهداری آن‌ها نسبتاً زیاد است. پژوهش Jaworek و همکاران (۲۰۲۱) [2] نشان داد که استفاده از اسکرابر الکترواستاتیکی مرطوب (Wet ESP) می‌تواند راندمان حذف ذرات زیر یک میکرون را به بیش از ۹۹ درصد افزایش دهد.

توجه به این موضوع، پژوهش حاضر با تمرکز بر مقایسه فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها و بررسی عملکرد اسکرابر مرطوب از دیدگاه فنی، زیست محیطی و سلامت انسان، تلاش می‌کند تصویری جامع از وضعیت موجود و مسیرهای آینده ارائه دهد. در ادامه

برخی از نتایج مطالعات آلاینده‌های هوا بر سلامتی انسان در جدول ۱ توسط محققین مختلف بررسی شده است.

جدول ۱. مرور مهم‌ترین مطالعات انجام گرفته در حوزه آلاینده‌های زیست محیطی

مهم‌ترین یافته	موضوع پژوهش	سال	نویسنده
ارتباط مستقیم PM _{2.5} با مرگ‌ومیر و بیماری‌های تنفسی	آلودگی هوا و سلامت	۲۰۲۰	Manisalidis et al. [5]
آلودگی عامل حدود ۹ میلیون مرگ سالانه است.	آلودگی و سلامت جهانی	۲۰۲۲	al et Fuller [9]
راندمان حذف ذرات ریز بیش از ۹۹٪	Wet ESP	۲۰۲۱	et Jaworek al[2]
حذف بیش از ۹۹٪ ذرات معلق، عدم حذف گازها	Bag Filter	۲۰۲۲	et Zhang al. [7]
حذف SO ₂ تا ۹۸٪ و ذرات معلق بیش از ۹۵٪	Wet Scrubber	۲۰۲۳	al et Zhao. [12]
افزایش راندمان حذف و کاهش مصرف انرژی	CFD در اسکرابر	۲۰۲۴	al et Wang. [6]
افزایش راندمان حذف هم‌زمان گاز و ذرات	فناوری‌های هیبریدی	۲۰۲۳	et Chen al.[7]
بازيافت آب و کاهش هزینه بهره‌برداری	مدیریت پساب اسکرابر	۲۰۲۲	al et Li.[4]
کربن فعال مناسب‌ترین فناوری حذف VOC	کنترل VOCها	۲۰۲۱	et Kumar al. [3]
سامانه‌های هیبریدی بهترین عملکرد کلی را دارند	مقایسه فناوری‌ها	۲۰۲۴	al et Singh. [14]

در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های هیبریدی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. ترکیب اسکرابر مرطوب با بگ‌فیلتر، اسکرابر الکترواستاتیکی و سامانه‌های جذب سطحی موجب افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها و کاهش مصرف انرژی شده است. این فناوری‌ها علاوه بر کاهش انتشار آلاینده‌ها، امکان بازیافت برخی ترکیبات شیمیایی را نیز فراهم می‌کنند. یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهش‌های اخیر، استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) برای طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های کنترل آلودگی است. مطالعات نشان داده‌اند که شبیه‌سازی CFD امکان بررسی دقیق توزیع سرعت، الگوی جریان، اندازه قطرات، انتقال جرم و افت فشار را فراهم می‌کند. بر اساس پژوهش Wang و همکاران (۲۰۲۴) [6]، استفاده از CFD موجب افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها تا ۱۵ درصد و کاهش مصرف انرژی تا ۲۰ درصد در اسکرابرهای مرطوب شده است. علاوه بر بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات، مدیریت پساب تولیدی در اسکرابرهای مرطوب نیز یکی از موضوعات مهم پژوهش‌های اخیر است. بسیاری از محققان استفاده از سامانه‌های ته‌نشینی، فیلتراسیون و بازیافت آب را برای کاهش مصرف منابع آبی و دستیابی به الزامات زیست‌محیطی پیشنهاد کرده‌اند. این موضوع در طراحی سیستم‌های صنعتی جدید اهمیت ویژه‌ای یافته است.

بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد (جدول ۲) که اگرچه فناوری‌های مختلفی برای کنترل آلاینده‌ها توسعه یافته‌اند، اما هنوز هیچ فناوری واحدی قادر به حذف کامل تمام آلاینده‌ها نیست. به همین دلیل، پژوهشگران استفاده از سامانه‌های ترکیبی، هوشمندسازی فرآیندها، کنترل برخط آلاینده‌ها و بهینه‌سازی مبتنی بر CFD را به عنوان مهم‌ترین روندهای آینده معرفی کرده‌اند. همچنین بررسی مقالات نشان می‌دهد که بیشتر پژوهش‌ها بر افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها تمرکز داشته‌اند، در حالی که مطالعات محدودی به طور هم‌زمان اثرات سلامت انسان، مصرف انرژی، مدیریت پساب و تحلیل اقتصادی فناوری‌ها را بررسی کرده‌اند. بنابراین، انجام پژوهشی که این شاخص‌ها را به صورت یکپارچه ارزیابی کند، می‌تواند بخشی از خلأ موجود در ادبیات علمی را پوشش دهد. با

گزینه برتر معرفی نماید. در جدول زیر، مبنای نظری این انتخاب شرح داده شده است:

جدول ۲. روش‌های کنترل گردوغبار بر اساس ویژگی‌های آلاینده و شرایط عملیاتی در کوره‌های صنعتی

نقاط ضعف	نقاط قوت	سازوکار نظری	روش
راندمان پایین برای ذرات زیر ۱۰ میکرون	هزینه کم، ساخت ساده	جداسازی با نیروی گریز از مرکز	سیکلون
به رطوبت و حرارت حساس است؛ نیاز به تعویض کیسه	راندمان بسیار بالا برای ذرات خشک	عبور گاز از پارچه فیلتر	فیلتر کیسه‌ای
هزینه اولیه زیاد؛ حساس به تغییرات ترکیب گاز	راندمان بالا برای حجم زیاد گاز خشک	جذب ذرات باردار توسط صفحات جمع‌کننده	الکترواستاتیک
تولید پساب؛ مصرف آب؛ خوردگی و رسوب‌گذاری	راندمان بالا برای ذرات ریز و درشت؛ حذف همزمان گازهای اسیدی؛ مناسب برای گاز داغ و مرطوب	تماس گاز با مایع و انجام واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی	اسکراپر مرطوب

۲-۱. اصول نظری عملکرد اسکراپر مرطوب

اسکراپر مرطوب بر اساس دو اصل فیزیکی و شیمیایی کار می‌کند:

الف) حذف ذرات معلق

ذرات موجود در جریان گاز، توسط قطرات مایع به سه روش اصلی حذف می‌شوند:

- **برخورد لختی (Impaction Inertial):** ذرات درشت‌تر (بزرگ‌تر از ۱ میکرون) به دلیل اینرسی، از مسیر جریان گاز منحرف نشده و به قطرات مایع برخورد می‌کنند.
- **پخشیدگی (Diffusion):** ذرات بسیار ریز (کوچک‌تر از ۱/۱۰ میکرون) به دلیل حرکت براونی، به سطح قطرات برخورد کرده و جذب می‌شوند.
- **برخورد مستقیم (Interception):** ذراتی که از نزدیکی قطرات عبور می‌کنند، توسط سطح آنها گرفته می‌شوند.

هدف این پژوهش، بررسی ارتباط میان آلاینده‌های محیط زیست و سلامت انسان و مقایسه فناوری‌های متداول کنترل آلاینده‌های هوا با تأکید بر اسکراپرهای مرطوب است. در این مطالعه، فناوری‌های مختلف از نظر راندمان حذف آلاینده‌ها، مصرف انرژی، هزینه‌های اجرایی، قابلیت حذف انواع آلاینده‌ها، الزامات بهره‌برداری و اثرات زیست محیطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. همچنین با استفاده از نتایج طراحی و مستندات فنی موجود، عملکرد اسکراپر مرطوب به‌عنوان یک مطالعه موردی بررسی شده و نقش بهینه‌سازی مبتنی بر شبیه‌سازی CFD در افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها و کاهش مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی تبیین می‌شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای علمی برای انتخاب فناوری‌های کارآمد کنترل آلودگی و ارتقای سلامت انسان در صنایع مختلف فراهم آورد.

۲. مبنای نظری تحقیق

سیستم کنترل آلودگی با کاهش غلظت آلاینده‌ها در هوای خروجی، مستقیماً از مواجهه انسان با مواد سمی می‌کاهد. این کاهش خطر از دو راه اصلی انجام می‌شود:

۱. حذف ذرات معلق (PM):

ذرات ریز (به‌ویژه PM_{۲.۵} و PM_{۱۰}) با بیماری‌های تنفسی، قلبی و حتی مرگ‌ومیر زودرس ارتباط مستقیم دارند. اسکراپر مرطوب با راندمان بالای ۹۹٪ برای ذرات ریز، می‌تواند این ذرات خطرناک را از جریان گاز جدا کند و بنابراین ریسک سلامت را به شدت کاهش دهد.

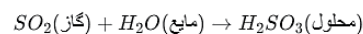
۲. خنثی‌سازی گازهای اسیدی:

گازهایی مانند SO₂ و HCl نه تنها برای تنفس مضر هستند، بلکه عامل اصلی باران اسیدی به‌شمار می‌روند. در اسکراپر مرطوب، با استفاده از مایع قلیایی (مانند آب آهک)، این گازها جذب و به نمک‌های بی‌خطر (مانند سولفات کلسیم) تبدیل می‌شوند.

به عنوان نمونه، برای کوره‌های آجر پزی چهار روش اصلی کنترل گردوغبار بر اساس ویژگی‌های آلاینده و شرایط عملیاتی، می‌تواند اسکراپر مرطوب را به‌عنوان

ب) حذف گازهای اسیدی (جذب شیمیایی)

گازهای آلاینده مانند SO_2 در مایع قلیایی حل شده و واکنش می‌دهند.



این واکنش باعث تبدیل گاز سمی به ترکیب جامد بی‌خطر (گچ) می‌شود که قابل دفع است.

۲-۲. پارامترهای کلیدی طراحی اسکرابر مرطوب

برای اینکه اسکرابر بتواند به‌خوبی خطرات سلامت را کاهش دهد، طراحی آن باید بر اساس پارامترهای زیر بهینه شود:

- **نسبت مایع به گاز (G/L):** هرچه این نسبت بیشتر باشد، تماس بیشتری بین گاز و مایع رخ می‌دهد و راندمان حذف بالا می‌رود، اما مصرف آب و انرژی نیز افزایش می‌یابد.

- **سرعت گاز:** بر افت فشار و احتمال برخورد ذرات با قطرات تأثیر می‌گذارد. در اسکرابر ونتوری، سرعت بالا در گلوگاه برای حذف ذرات ریز حیاتی است.

- **اندازه قطرات مایع:** قطرات ریزتر سطح تماس بیشتری داشته و برای جذب گازهای اسیدی مؤثرتر هستند.

- **شیمی مایع اسکرابر:** برای خنثی‌سازی گازهای اسیدی، pH مایع باید در محدوده مناسب (مثلاً ۶ تا ۸ برای SO_2) کنترل شود.

یکی از چالش‌های اساسی اسکرابر مرطوب، تولید پساب آلوده است. این پساب حاوی ذرات جداشده و مواد شیمیایی واکنش داده است که باید قبل از تخلیه یا بازچرخانی، تصفیه شود. بخش جداگانه‌ای برای طراحی سیستم تصفیه پساب در نظر گرفته شده است تا اطمینان حاصل شود که آلودگی صرفاً از هوا به آب منتقل نشود و کل چرخه زیست محیطی مدیریت شود. براساس مبانی نظری مطرح شده، موفقیت این سیستم در کاهش واقعی مخاطرات سلامت، مستلزم طراحی دقیق مهندسی (با کمک شبیه سازی CFD، انتخاب مواد مقاوم در برابر خوردگی (مانند استنلس استیل ۳۱۶) و مدیریت صحیح پساب است. در نهایت، اجرای درست این فناوری می‌تواند

گامی مؤثر در راستای ارتقای سلامت عمومی و حفاظت از محیط‌زیست باشد.

۳-۲- انواع آلاینده‌های محیط زیست و اثرات آن‌ها بر سلامت انسان

آلودگی محیط زیست یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در قرن حاضر محسوب می‌شود که پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و توسعه پایدار دارد. افزایش فعالیت‌های صنعتی، توسعه شهرنشینی، رشد جمعیت، استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی و افزایش تولید پسماندها موجب شده است که انواع مختلفی از آلاینده‌ها وارد هوا، آب و خاک شوند. این آلاینده‌ها علاوه بر تخریب منابع طبیعی، باعث افزایش بیماری‌های تنفسی، قلبی-عروقی، سرطان‌ها، اختلالات عصبی و کاهش کیفیت زندگی انسان می‌شوند. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت (WHO)، آلودگی محیط زیست یکی از مهم‌ترین عوامل خطر برای سلامت عمومی بوده و سالانه میلیون‌ها مرگ زودرس در جهان به آن نسبت داده می‌شود.

به طور کلی آلاینده‌های محیط زیست به چهار گروه اصلی شامل آلاینده‌های هوا، آلاینده‌های آب، آلاینده‌های خاک و آلاینده‌های فیزیکی و بیولوژیکی تقسیم می‌شوند که هر یک دارای ویژگی‌ها، منابع انتشار و اثرات متفاوتی بر سلامت انسان هستند.

۲-۱- آلاینده‌های هوا

آلودگی هوا مهم‌ترین و گسترده‌ترین نوع آلودگی محیط زیست محسوب می‌شود که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، احتراق سوخت‌های فسیلی، حمل‌ونقل، نیروگاه‌ها و فرآیندهای تولیدی است. مهم‌ترین آلاینده‌های هوا شامل ذرات معلق (PM)، منواکسید کربن (CO)، اکسیدهای نیتروژن (NOx)، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، هیدروژن فلوراید (HF)، هیدروژن کلرید (HCl) و سایر گازهای اسیدی هستند. این آلاینده‌ها علاوه بر ایجاد آلودگی هوا، موجب تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی، باران اسیدی، کاهش دید افقی و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی می‌شوند.

۲-۱-۱- منواکسید کربن (CO)

منواکسید کربن یکی از خطرناک‌ترین آلاینده‌های گازی است که در اثر احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی تولید

فولاد، پالایشگاه‌ها و نیروگاه‌ها منتشر می‌شود. این گاز در حضور رطوبت به اسید سولفوریک تبدیل شده و عامل اصلی ایجاد باران‌های اسیدی است. تماس طولانی‌مدت با SO_2 باعث تحریک مجاری تنفسی، تشدید آسم، کاهش عملکرد ریه و افزایش بیماری‌های قلبی-عروقی می‌شود. به همین دلیل، استفاده از اسکرابرهای مرطوب، سیستم‌های گوگردزدایی و سوخت‌های کم‌گوگرد به‌عنوان مهم‌ترین راهکارهای کنترل این آلاینده شناخته می‌شوند.

- هیدروژن فلوراید (HF) و ترکیبات فلوئور

هیدروژن فلوراید یکی از گازهای بسیار خورنده و سمی است که در صنایع آلومینیوم، شیشه، سرامیک، کودهای فسفاته و صنایع شیمیایی تولید می‌شود. این گاز قابلیت نفوذ بالایی در بافت‌های بدن داشته و تماس با آن می‌تواند باعث سوختگی‌های شدید، آسیب‌های ریوی و اختلالات استخوانی شود. از سوی دیگر، ترکیبات فلوئور در غلظت‌های پایین در صنایع و محصولات بهداشتی کاربرد دارند، اما افزایش غلظت آن‌ها در محیط موجب بروز بیماری فلوروزیس، آسیب‌های دندانی و اختلالات اسکلتی خواهد شد.

- هیدروژن کلرید (HCl)

هیدروژن کلرید گازی بی‌رنگ و بسیار خورنده است که در صنایع شیمیایی، تولید اسید کلریدریک، صنایع فلزی و برخی فرآیندهای احتراقی تولید می‌شود. استنشاق این گاز موجب تحریک شدید دستگاه تنفسی، التهاب مخاط، آسیب ریه و در غلظت‌های بالا ادم ریوی می‌شود. از این رو، کنترل انتشار HCl با استفاده از اسکرابرهای مرطوب و جاذب‌های قلیایی در بسیاری از صنایع ضروری است.

۲-۲- آلاینده‌های آب

آلودگی منابع آب عمدتاً ناشی از ورود فاضلاب‌های صنعتی، شهری و کشاورزی است. فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، هیدروکربن‌های نفتی، نیتрат‌ها، فسفات‌ها و میکروپلاستیک‌ها از مهم‌ترین آلاینده‌های آب محسوب می‌شوند. ورود این ترکیبات به زنجیره غذایی باعث تجمع زیستی و افزایش خطر بیماری‌های کلیوی، کبدی، سرطان‌ها، اختلالات هورمونی و مشکلات رشد در کودکان می‌شود.

۲-۳- آلاینده‌های خاک

آلودگی خاک عمدتاً ناشی از دفن غیراصولی پسماندهای صنعتی، مصرف بی‌رویه کودها و سموم شیمیایی، نشت

می‌شود. این گاز بی‌رنگ، بی‌بو و بدون مزه بوده و حتی در غلظت‌های پایین نیز برای انسان خطرناک است. میل ترکیبی CO با هموگلوبین حدود ۲۵۰ برابر بیشتر از اکسیژن است؛ بنابراین با تشکیل کربوکسی‌هموگلوبین، انتقال اکسیژن در خون را مختل کرده و موجب کاهش اکسیژن‌رسانی به بافت‌ها می‌شود. منابع اصلی انتشار این گاز شامل وسایل نقلیه، صنایع، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی است. مطابق متن فنی شما، خودروها در مناطق شهری تا حدود ۹۵ درصد انتشار CO را به خود اختصاص می‌دهند و سالانه حدود ۳۵۰ میلیون تن از این گاز در جهان تولید می‌شود.

- ذرات معلق (Particulate Matter)

ذرات معلق یکی از مهم‌ترین شاخص‌های آلودگی هوا هستند که از ترکیبات جامد و مایع معلق در هوا تشکیل شده‌اند. این ذرات می‌توانند شامل سولفات‌ها، نیترات‌ها، آمونیوم، کربن سیاه، فلزات سنگین و مواد معدنی باشند. ذرات $PM_{2.5}$ و PM_{10} به دلیل اندازه کوچک خود به اعماق ریه نفوذ کرده و حتی وارد جریان خون می‌شوند. مطالعات نشان داده‌اند که مواجهه طولانی‌مدت با این ذرات موجب افزایش خطر ابتلا به آسم، برونشیت مزمن، بیماری انسدادی مزمن ریه (COPD)، سکته قلبی، سکته مغزی و سرطان ریه می‌شود. بر اساس گزارش سازمان جهانی بهداشت، آلودگی هوا سالانه حدود ۷ میلیون مرگ زودرس در جهان ایجاد می‌کند که سهم عمده‌ای از آن مربوط به ذرات معلق است.

- اکسیدهای نیتروژن (NOx)

اکسیدهای نیتروژن شامل اکسید نیتریک (NO) و دی‌اکسید نیتروژن (NO_2) از مهم‌ترین آلاینده‌های ناشی از احتراق در دمای بالا هستند. این ترکیبات در صنایع، نیروگاه‌ها، موتورهای احتراقی و کوره‌های صنعتی تولید می‌شوند. NO_2 علاوه بر تحریک دستگاه تنفسی، در تشکیل مه‌دود فتوشیمیایی و باران اسیدی نقش مهمی دارد. تشکیل NOx به دمای احتراق، غلظت اکسیژن و زمان ماند گازها در محفظه احتراق وابسته است؛ ازاین‌رو، بهینه‌سازی فرآیند احتراق و استفاده از فناوری‌های کنترل آلاینده از مهم‌ترین روش‌های کاهش انتشار این گازها محسوب می‌شود.

- دی‌اکسید گوگرد (SO_2)

دی‌اکسید گوگرد عمدتاً از احتراق سوخت‌های گوگرددار مانند زغال‌سنگ، مازوت و گازوئیل و همچنین صنایع

پایدار دارد. امروزه انتخاب فناوری مناسب به عواملی نظیر نوع آلاینده، غلظت آلاینده، دبی جریان، شرایط عملیاتی، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه بهره‌برداری، مصرف انرژی، تولید پسماند و الزامات قانونی وابسته است. زبه‌طور کلی، فناوری‌های کنترل آلاینده‌های هوا را می‌توان به پنج گروه اصلی شامل تجهیزات مکانیکی، تجهیزات فیلتراسیون، سامانه‌های الکترواستاتیکی، فناوری‌های جذب و شست و شوی گازها و فناوری‌های اکسیداسیون و تجزیه آلاینده‌ها تقسیم‌بندی کرد. هر یک از این فناوری‌ها برای حذف گروه خاصی از آلاینده‌ها طراحی شده‌اند و در بسیاری از صنایع به صورت مستقل یا ترکیبی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۳-۱- سیکلون

سیکلون یکی از قدیمی‌ترین و اقتصادی‌ترین تجهیزات کنترل آلودگی هوا است که بر اساس نیروی گریز از مرکز عمل می‌کند. در این سامانه، جریان گاز آلوده به صورت مارپیچی وارد محفظه سیکلون شده و ذرات سنگین‌تر تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز به دیواره برخورد کرده و در قسمت پایینی جمع‌آوری می‌شوند، در حالی که گاز تصفیه‌شده از بخش فوقانی خارج می‌شود. مزیت اصلی سیکلون، سادگی ساخت، هزینه سرمایه‌گذاری پایین، افت فشار کم و نیاز اندک به تعمیر و نگهداری است. با این حال، این فناوری در حذف ذرات بسیار ریز (کمتر از ۵ میکرومتر) راندمان محدودی دارد و معمولاً به‌عنوان مرحله پیش تصفیه قبل از تجهیزات با راندمان بالاتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۲- بگ‌فیلتر

بگ‌فیلتر یکی از مؤثرترین تجهیزات حذف ذرات معلق است که در صنایع سیمان، فولاد، نیروگاه‌ها، صنایع معدنی و صنایع شیمیایی کاربرد گسترده‌ای دارد. در این سامانه، گاز آلوده از میان کیسه‌های پارچه‌ای عبور کرده و ذرات معلق بر روی سطح فیلتر باقی می‌مانند. با تشکیل لایه گردوغبار بر روی پارچه، راندمان حذف افزایش یافته و در بسیاری از کاربردها به بیش از ۹۹ درصد می‌رسد. از مهم‌ترین مزایای بگ‌فیلتر می‌توان به راندمان بسیار بالا در حذف ذرات ریز، قابلیت استفاده در دبی‌های مختلف و عملکرد پایدار اشاره کرد. با این حال، این فناوری برای حذف گازهای آلاینده مناسب نبوده و نسبت به دما و رطوبت حساس است؛ بنابراین در بسیاری از صنایع همراه با اسکرابرهای مرطوب یا خشک استفاده می‌شود.

فرآورده‌های نفتی و رسوب آلاینده‌های جوی است. فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و ترکیبات آلی پایدار با ورود به گیاهان و محصولات کشاورزی وارد زنجیره غذایی شده و سلامت انسان را تهدید می‌کنند. این آلاینده‌ها با بیماری‌های عصبی، اختلالات غدد درون‌ریز، آسیب‌های کلیوی و سرطان ارتباط دارند.

۴-۲- آلاینده‌های فیزیکی و بیولوژیکی

آلاینده‌های فیزیکی شامل آلودگی صوتی، ارتعاش، تشعشعات یونیزان و غیریونیزان، آلودگی حرارتی و آلودگی نوری هستند که می‌توانند موجب استرس، اختلال خواب، کاهش شنوایی، بیماری‌های قلبی و اختلالات روانی شوند. آلاینده‌های بیولوژیکی نیز شامل باکتری‌ها، ویروس‌ها، قارچ‌ها، آلرژن‌ها و انگل‌ها هستند که از طریق آب، هوا و خاک منتقل شده و عامل بسیاری از بیماری‌های عفونی و آلرژیک هستند.

۵-۲- اثرات آلاینده‌های محیط زیست بر سلامت انسان

پیامدهای ناشی از مواجهه با آلاینده‌های محیط زیست محدود به یک دستگاه خاص از بدن نیست و تقریباً تمامی اندام‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهم‌ترین اثرات شامل بیماری‌های تنفسی، آسم، COPD، سرطان ریه، بیماری‌های قلبی-عروقی، سکته قلبی و مغزی، اختلالات عصبی، کاهش عملکرد شناختی، آسیب‌های کلیوی و کبدی، اختلالات غدد درون‌ریز، کاهش باروری و افزایش خطر ابتلا به انواع سرطان است. شدت این اثرات به نوع آلاینده، غلظت، مدت مواجهه، سن، وضعیت سلامت افراد و شرایط محیطی بستگی دارد. از این‌رو، استفاده از فناوری‌های پیشرفته کنترل آلاینده‌ها، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی و پایش مستمر انتشار آلاینده‌ها از مهم‌ترین راهکارهای حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست محسوب می‌شود.

۳-۲- فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها

افزایش انتشار آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، صنایع شیمیایی، حمل‌ونقل و سایر منابع احتراقی، ضرورت استفاده از فناوری‌های کارآمد برای کنترل و کاهش انتشار آلاینده‌ها را بیش از پیش آشکار ساخته است. توسعه فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها علاوه بر کاهش اثرات زیست محیطی، نقش مهمی در حفظ سلامت انسان، افزایش بهره‌وری انرژی، رعایت استانداردهای زیست محیطی و دستیابی به اهداف توسعه

۳-۳- رسوب‌دهنده الکترواستاتیکی

رسوب‌دهنده الکترواستاتیکی یا ESP یکی از فناوری‌های پیشرفته حذف ذرات معلق است که بر اساس ایجاد میدان الکتریکی قوی عمل می‌کند. در این سامانه، ذرات معلق پس از باردار شدن به صفحات جمع‌کننده جذب شده و از جریان گاز جدا می‌شوند. این رسوب‌دهنده‌ها دارای افت فشار کم، قابلیت کار در دبی‌های بالا و راندمان بیش از ۹۹ درصد در حذف ذرات بسیار ریز است. با این وجود، هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، نیاز به تجهیزات الکتریکی تخصصی و کاهش راندمان در برخی شرایط عملیاتی از محدودیت‌های این فناوری محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر، توسعه رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی مرطوب (ESP Wet) امکان حذف هم‌زمان ذرات بسیار ریز و مه اسیدی را نیز فراهم کرده است.

۳-۴- اسکرابرهای خشک

اسکرابرهای خشک از جمله فناوری‌های متداول حذف گازهای اسیدی مانند دی‌اکسید گوگرد (SO_2)، هیدروژن کلرید (HCl) و هیدروژن فلوراید (HF) هستند. در این سامانه‌ها، جاذب‌های جامد یا نیمه‌خشک مانند آهک هیدراته یا بی‌کربنات سدیم با گاز آلوده واکنش داده و ترکیبات اسیدی را به نمک‌های پایدار تبدیل می‌کنند. عدم تولید پساب، مصرف پایین آب و سهولت بهره‌برداری از مهم‌ترین مزایای این فناوری است؛ اما راندمان حذف آن معمولاً کمتر از اسکرابرهای مرطوب بوده و برای جریان‌های با غلظت بالای آلاینده محدودیت دارد.

۳-۵- اسکرابرهای مرطوب

اسکرابر مرطوب یکی از پرکاربردترین فناوری‌های کنترل آلاینده‌های گازی و ذرات معلق در صنایع نفت، گاز، پتروشیمی، فولاد، سیمان، نیروگاه‌ها و صنایع شیمیایی محسوب می‌شود. عملکرد این سامانه بر پایه تماس مستقیم میان جریان گاز آلوده و مایع جاذب است. در اثر این تماس، انتقال جرم بین فاز گاز و مایع انجام شده و آلاینده‌ها جذب یا شسته می‌شوند. اسکرابرهای مرطوب قادرند به طور هم‌زمان ذرات معلق، دی‌اکسید گوگرد، هیدروژن کلرید، هیدروژن فلوراید، آمونیاک و بسیاری از ترکیبات محلول در آب را با راندمان بالا حذف کنند. راندمان حذف گازهای اسیدی در این سامانه‌ها معمولاً بیش از ۹۵ درصد و در شرایط بهینه به بیش از ۹۹ درصد می‌رسد. یکی از مهم‌ترین مزایای اسکرابرهای مرطوب،

قابلیت حذف هم‌زمان چندین آلاینده در یک سامانه است. با این حال، تولید پساب، احتمال خوردگی تجهیزات، مصرف آب و نیاز به مدیریت مناسب مایع شست‌شو از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری این فناوری به شمار می‌رود. بر اساس مستندات فنی پروژه، طراحی مناسب سیستم گردش مجدد مایع، کنترل pH، انتخاب جنس مقاوم در برابر خوردگی، استفاده از نازل‌های مناسب و مدیریت پساب نقش مهمی در افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری دارند.

۳-۶- فناوری جذب با کربن فعال

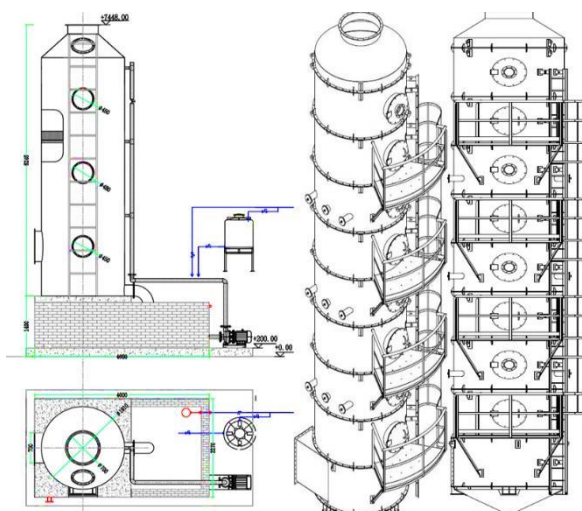
جذب سطحی با استفاده از کربن فعال یکی از مؤثرترین روش‌ها برای حذف ترکیبات آلی فرار (VOCs)، بخارات سمی، بوهای نامطبوع، جیوه و برخی آلاینده‌های آلی است. در این روش، آلاینده‌ها بر روی سطح متخلخل کربن فعال جذب شده و از جریان گاز جدا می‌شوند. این فناوری راندمان بالایی دارد، اما به دلیل اشباع تدریجی جاذب، نیازمند احیا یا تعویض دوره‌ای کربن فعال است.

۳-۷- فناوری‌های نوین کنترل آلاینده‌ها

در سال‌های اخیر، روند توسعه فناوری‌های کنترل آلاینده‌ها به سمت استفاده از سامانه‌های ترکیبی و هوشمند حرکت کرده است، به گونه‌ای که ترکیب روش‌های مختلف مانند اسکرابرهای مرطوب و خشک، بگ‌فیلترها و رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیکی به همراه فناوری‌های نوینی نظیر اکسیداسیون پیشرفته، نانوجاذب‌ها و راکتورهای پلاسمایی، موجب افزایش قابل توجه راندمان حذف آلاینده‌ها شده است. همچنین به کارگیری ابزارهای نوین طراحی مانند دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) و الگوریتم‌های بهینه‌سازی، امکان تحلیل دقیق جریان، بهبود اختلاط گاز و مایع، کاهش افت فشار و کاهش مصرف انرژی را فراهم کرده است. این رویکردهای نوین نه تنها عملکرد سیستم‌های کنترل آلودگی را ارتقا می‌دهند، بلکه نقش مهمی در کاهش هزینه‌های بهره‌برداری، مدیریت بهتر پسماندها و انطباق با استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی دارند و مسیر توسعه فناوری‌های پایدار در حوزه حفاظت از محیط زیست را هموار می‌سازند.

بررسی فناوری‌های مختلف کنترل آلاینده‌ها نشان می‌دهد که هیچ فناوری واحدی قادر به حذف کامل همه آلاینده‌ها نیست. انتخاب فناوری مناسب باید با توجه به

مخاطرات سلامت ارائه می‌دهد. شماتیکی از نمونه مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه گردیده است.



شکل ۱. شماتیکی از اسکرابر مرطوب مورد مطالعه

۳-۱- مطالعه موردی طراحی و عملکرد اسکرابر مرطوب

اسکرابر مرطوب یک گزینه مؤثر برای کنترل آلودگی هوا در صنایع شیمیایی و احتراقی است، اما طراحی بهینه آن نیازمند تعادل بین راندمان، افت فشار و هزینه عملیاتی است. اسکرابر بستر پرشده یکی از کارآمدترین و فرآیندی محسوب می‌شود که قابلیت حذف همزمان ذرات معلق و گازهای اسیدی را داراست. در یک مطالعه موردی، این سیستم با دبی گاز ورودی ۵۰,۰۰۰ متر مکعب بر ساعت و دمای کاری ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد طراحی شده است. سیال شستشو شامل آب و محلول سدیم هیدروکسید (NaOH) بوده که با نسبت مایع به گاز حدود ۱۰ لیتر بر متر مکعب، از بالای برج بر روی بستر پاشیده می‌شود. مکانیزم عملکرد بر این اساس است که گاز آلوده از پایین برج وارد شده و در تماس متقابل با قطرات مایع، جذب آلاینده‌ها از طریق مکانیسم‌های ضربه اینرسی، جذب سطحی و انتقال به فاز مایع حذف می‌گردند. نتایج عملکرد نشان‌دهنده راندمان حذف ذرات معلق بین ۹۵ تا ۹۹ درصد و حذف گاز SO_2 بین ۹۰ تا ۹۸ درصد (بسته به pH محلول) است، در حالی که افت فشار سیستم در محدوده ۸۰۰ تا ۱۵۰۰ پاسکال قرار دارد. از نقاط قوت این فناوری می‌توان به مناسب بودن برای گازهای داغ و مرطوب، قابلیت تنظیم pH برای افزایش جذب و حذف همزمان انواع آلاینده‌ها اشاره کرد. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر تولید پساب نیازمند تصفیه، خطر

نوع آلاینده، مشخصات جریان، الزامات زیست‌محیطی و شرایط اقتصادی انجام شود. در این میان، اسکرابرهای مرطوب به دلیل توانایی حذف همزمان ذرات معلق و گازهای اسیدی، یکی از کارآمدترین فناوری‌ها محسوب می‌شوند. با این حال، استفاده از سامانه‌های ترکیبی، بهینه‌سازی طراحی به کمک شبیه‌سازی CFD و مدیریت صحیح پساب می‌تواند عملکرد این فناوری را به میزان قابل توجهی بهبود بخشد. بر همین اساس، در جدول ۳، فناوری‌های مختلف کنترل آلاینده‌ها از نظر راندمان حذف، مزایا و محدودیت‌ها به صورت تطبیقی مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

جدول ۳. مقایسه فناوری‌های مختلف کنترل آلاینده‌های هوا

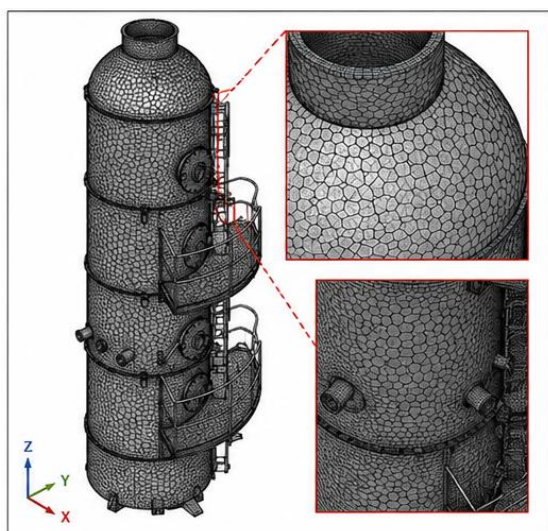
اثر بر سلامت انسان	محدودیت‌ها	مزایا	راندمان حذف	نوع آلاینده قابل حذف	فناوری
کاهش چشمگیر آلاینده‌های تنفسی	تولید پساب، نیاز به کنترل pH	حذف همزمان گاز و ذرات، راندمان بالا	۹۰-۹۹٪	گازهای اسیدی، ذرات معلق، بخارات	اسکرابر مرطوب
کاهش بیماری‌های ریوی ناشی از PM _{۱۰}	عدم حذف گازها	راندمان بسیار بالا برای ذرات	۹۹٪	ذرات معلق (PM)	بگ فیلتر
مناسب به عنوان پیش تصفیه	حذف ضعیف ذرات ریز	ساختار ساده، هزینه پایین	۷۰-۹۰٪	ذرات درشت	سیکلون
کاهش انتشار ذرات سرطان‌زا	هزینه اولیه زیاد	افت فشار کم، ظرفیت بالا	۹۵-۹۹٪	ذرات بسیار ریز	رسوب‌دهنده الکترواستاتیکی (ESP)
کاهش انتشار SO_2 و HCl	راندمان کمتر نسبت به نوع مرطوب	عدم تولید پساب	۸۰-۹۵٪	گازهای اسیدی	اسکرابر خشک
کاهش مواد سرطان‌زا	نیاز به تعویض جاذب	حذف ترکیبات آلی و بو	۹۰-۹۹٪	VOC، بو، جیوه	جذب با کربن فعال

۳. روش تحقیق

روش تحقیق بر پایه شبیه‌سازی CFD با ANSYS Fluent، شامل مراحل پیش‌پردازش (هندسه‌سازی، شبکه‌بندی، تعیین خواص)، حل عددی (جریان چندفازی با مدل لاگرانژی و UDF برای انتقال حرارت/جرم) و پس‌پردازش (محاسبه راندمان، افت فشار و اعتبارسنجی) است. این روش امکان بررسی دقیق میدان جریان، توزیع قطرات و عملکرد حذف آلاینده‌ها را فراهم کرده و با اعتبارسنجی بر اساس داده‌های تجربی، ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی طراحی اسکرابر مرطوب و کاهش

بهینه (سرعت گاز ۶۰ متر بر ثانیه و ارتفاع مایع ۱۰۰ سانتی‌متر) به دست آمد که نشان دهنده عملکرد عالی این سیستم است. استفاده از آب خاکستری به عنوان سیال شستشو، این روش را از نظر اقتصادی و زیست محیطی نیز جذاب می‌سازد. این سیستم به عنوان یک راهکار اصلاح شده نسبت به اسکرابرهای مرطوب معمولی، گامی مؤثر در جهت کنترل آلودگی هوا و کاهش اثرات بهداشتی ناشی از انتشار ذرات صنعتی محسوب می‌شود.

شکل ۲، هندسه سه‌بعدی اسکرابر مرطوب و شبکه‌بندی محاسباتی (Mesh) مورد استفاده در شبیه‌سازی CFD را نشان می‌دهد. برای گسسته‌سازی دامنه محاسباتی از شبکه چندوجهی (Polyhedral Mesh) استفاده شده است که به دلیل کیفیت بالاتر سلول‌ها، همگرایی بهتر و دقت بیشتر در هندسه‌های پیچیده انتخاب گردید. همچنین، در نواحی دارای انحنا، محل اتصالات، ورودی و خروجی جریان، شبکه به صورت موضعی ریزتر تولید شده است تا تغییرات شدید میدان سرعت و فشار با دقت بیشتری محاسبه شوند. بزرگ‌نمایی‌های ارائه شده در شکل ۲، یکنواختی و کیفیت مناسب شبکه در سطوح مختلف اسکرابر را نشان می‌دهند که بیانگر مناسب بودن شبکه برای تحلیل جریان، افت فشار و فرآیند انتقال جرم در اسکرابر مرطوب است.



شکل ۲. هندسه مش زده اسکرابر مرطوب

به منظور اطمینان از صحت و پایداری نتایج شبیه‌سازی، آزمون استقلال از شبکه با استفاده از چندین شبکه با تراکم‌های مختلف انجام شد. مطابق شکل ۳

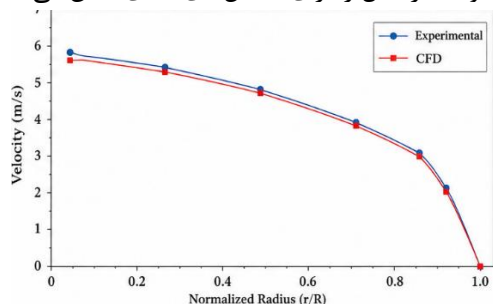
خوردگی تجهیزات در محیط‌های اسیدی و مصرف نسبتاً بالای انرژی برای پمپ و فن نیز وجود دارد که با مدیریت بهینه pH، استفاده از آلیاژهای مقاوم به خوردگی و بازیافت آب می‌توان این چالش‌ها را تا حد زیادی مرتفع ساخت. نمونه مشخصات طراحی و عملکرد یک سیستم اسکرابر مرطوب استاندارد در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. مشخصات سیستم اسکرابر مرطوب

بخش	پارامتر	شرح / مقدار
مشخصات طراحی	دبی گاز ورودی	$50000 \text{ m}^3/\text{h}$
	دمای گاز	180°C
	نوع اسکرابر	بستر پر شده (Bed Packed)
	سیال شستشو	آب + محلول NaOH (برای حذف گازهای اسیدی)
	نسبت مایع به گاز (G/L)	حدود $10 \text{ L}/\text{m}^3$
مکانیزم عملکرد	ورود گاز	گاز آلوده از پایین برج وارد شده و به سمت بالا حرکت می‌کند.
	پاشش مایع	مایع شستشو از بالای برج روی بستر پاشیده می‌شود.
	جذب آلاینده‌ها	تماس بین قطرات مایع و جریان گاز باعث جذب گازهای آلاینده می‌شود.
	حذف ذرات	ذرات معلق از طریق برخورد اینرسی، جذب در قطرات و انتقال به فاز مایع حذف می‌شوند.
نتایج عملکرد	راندمان حذف ذرات	۹۵-۹۹٪
	راندمان حذف SO ₂	۹۰-۹۸٪ (بسته به pH محلول شستشو)
	افت فشار	۸۰۰-۱۵۰۰ Pa
	مصرف آب	متوسط تا بالا (وابسته به نسبت G/L)
نقاط قوت	مزایا	مناسب برای گازهای داغ و مرطوب؛ حذف همزمان گازها و ذرات؛ امکان تنظیم pH برای افزایش راندمان جذب.
محدودیت‌ها	معایب	تولید پساب نیازمند تصفیه؛ احتمال خوردگی تجهیزات در محیط اسیدی؛ مصرف انرژی برای پمپ و فن.

اسکرابر و تئوری خودمکش غوطه‌ور یک فناوری بسیار مؤثر و مقرون به صرفه برای حذف ذرات معلق با راندمان بالا از گازهای خروجی صنایع، به ویژه صنعت سیمان، است. حداکثر راندمان حذف ۹۹٫۷۷٪ در شرایط عملیاتی

تطابق بسیار خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های آزمایشگاهی در امتداد شعاع نرمال‌شده وجود دارد. اختلاف اندک بین دو منحنی، به‌ویژه در نزدیکی دیواره، ناشی از پیچیدگی‌های جریان و خطاهای اجتناب‌ناپذیر اندازه‌گیری است. این همخوانی مناسب، توانایی مدل CFD در پیش‌بینی دقیق میدان سرعت داخل اسکرابر را تأیید کرده و اعتبار مدل را برای تحلیل‌های بعدی نشان می‌دهد.



شکل ۵. مقایسه پروفیل سرعت شعاعی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی CFD

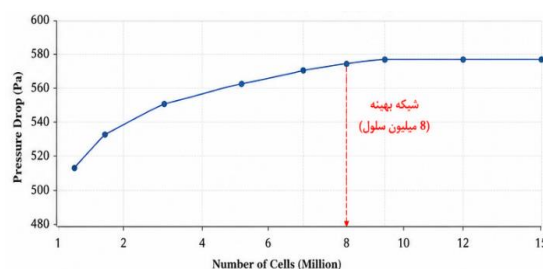
از آنجا که تمامی خطاها کمتر از معیار اعتبارسنجی ۵٪ هستند، می‌توان نتیجه گرفت که مدل عددی از دقت مناسبی برخوردار بوده و قادر است رفتار واقعی اسکرابر مرطوب را با اطمینان قابل قبول پیش‌بینی کند.

۳-۳- تحلیل نتایج

شکل ۶ توزیع فشار استاتیکی داخل اسکرابر مرطوب را نشان می‌دهد. مطابق کانتور فشار، بیشترین فشار در ناحیه ورودی گاز و بخش پایینی اسکرابر مشاهده می‌شود که ناشی از ورود جریان با سرعت بالا و برخورد آن با حجم داخلی تجهیز است. با حرکت جریان به سمت بالای ستون، فشار به تدریج کاهش یافته و در نزدیکی خروجی گاز به کمترین مقدار خود می‌رسد. این روند بیانگر تبدیل بخشی از انرژی فشاری به انرژی جنبشی و همچنین افت فشار ناشی از اصطکاک، آشفستگی جریان و برهم‌کنش گاز با قطرات پاشش‌شده از نازل‌ها است.

همچنین، توزیع یکنواخت گرادیان فشار در امتداد ارتفاع اسکرابر نشان می‌دهد که جریان بدون ایجاد نواحی با افت فشار موضعی شدید یا بازچرخش گسترده از داخل تجهیز عبور می‌کند. بر اساس نتایج شبیه‌سازی، افت فشار کل اسکرابر حدود ۱۳۰۰ پاسکال به‌دست آمده است که در محدوده قابل قبول برای اسکرابرهای مرطوب قرار داشته و بیانگر عملکرد مناسب سیستم از نظر تعادل بین راندمان حذف آلاینده‌ها و مصرف انرژی است.

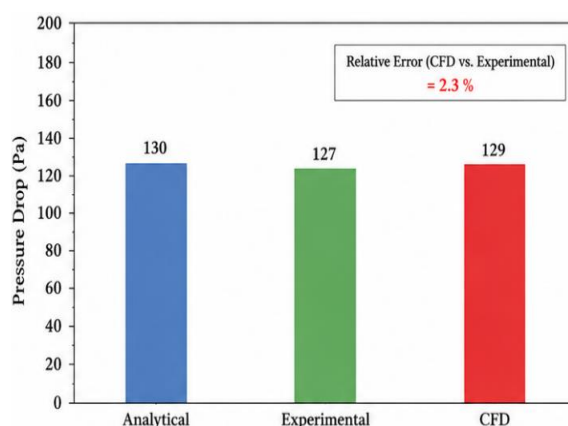
تغییرات پارامترهای کلیدی نظیر افت فشار و سرعت متوسط جریان با افزایش تعداد سلول‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پس از رسیدن به تعداد مشخصی از سلول‌ها، تغییرات نتایج ناچیز (کمتر از ۰.۲٪) بوده و پاسخ‌ها به حالت پایدار می‌رسند. بنابراین، شبکه نهایی به عنوان شبکه بهینه انتخاب شد، زیرا ضمن حفظ دقت مناسب، هزینه محاسباتی قابل قبولی نیز دارد.



شکل ۳. نمودار استقلال از مش هندسه شکل اسکرابر

۳-۲- اعتبارسنجی

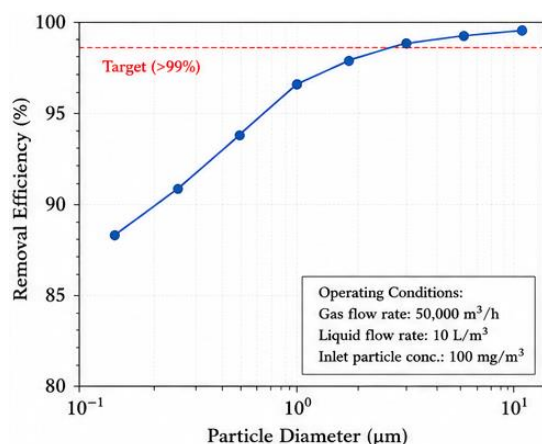
به منظور ارزیابی دقت مدل عددی، نتایج شبیه‌سازی با داده‌های تجربی مربوط به افت فشار در اسکرابر مرطوب مقایسه شد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تطابق مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های تجربی وجود دارد و اختلاف مقادیر در محدوده قابل قبول قرار گرفته است. این همخوانی نشان‌دهنده توانایی مدل CFD در پیش‌بینی صحیح رفتار هیدرودینامیکی جریان و افت فشار در اسکرابر مرطوب بوده و صحت مدل عددی برای ادامه تحلیل‌ها را تأیید می‌کند.



شکل ۴. بررسی میزان افت فشار شبیه‌سازی شده با داده‌ها و نتایج تجربی

به منظور ارزیابی دقت مدل عددی، پروفیل سرعت پیش‌بینی‌شده توسط شبیه‌سازی CFD با داده‌های تجربی مقایسه شد. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود،

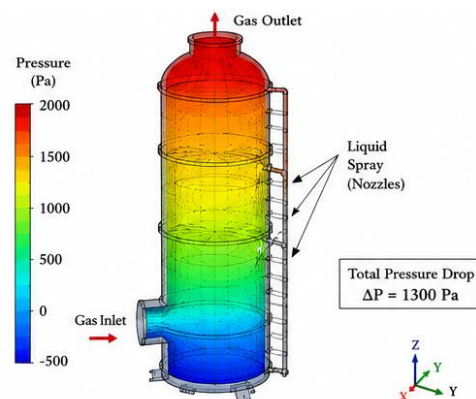
شکل ۸ تغییرات راندمان حذف ذرات بر حسب قطر ذرات را در اسکرابر مرطوب نشان می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که با افزایش قطر ذرات، راندمان جمع‌آوری به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. راندمان حذف برای ذرات با قطر حدود ۰٫۱ میکرومتر نزدیک به ۸۸٪ بوده و با افزایش اندازه ذرات به ۱ میکرومتر به حدود ۹۷٪ می‌رسد. همچنین، برای ذرات بزرگ‌تر از ۳ میکرومتر، راندمان حذف از ۹۹٪ فراتر رفته و در قطر ۱۰ میکرومتر تقریباً به ۱۰۰٪ نزدیک می‌شود. این روند ناشی از افزایش اینرسی ذرات بزرگ‌تر و احتمال بیشتر برخورد آن‌ها با قطرات مایع است. در مقابل، ذرات بسیار ریز به دلیل جرم کم، تمایل بیشتری به تبعیت از خطوط جریان گاز داشته و احتمال برخورد و جذب آن‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین، نتایج نشان می‌دهد که اسکرابر مرطوب عملکرد بسیار مطلوبی در حذف ذرات با قطر متوسط و بزرگ داشته و قادر است تحت شرایط عملیاتی مورد بررسی (دبی گاز ۵۰٫۰۰۰ m^3/h ، نسبت مایع به گاز ۱۰ L/m^3 و غلظت ذرات ۱۰۰ mg/m^3) راندمان حذفی بیش از ۹۹٪ برای ذرات بزرگ‌تر از حدود ۳ میکرومتر فراهم کند.



شکل ۸. تغییرات راندمان حذف ذرات بر حسب قطر ذره در اسکرابر مرطوب.

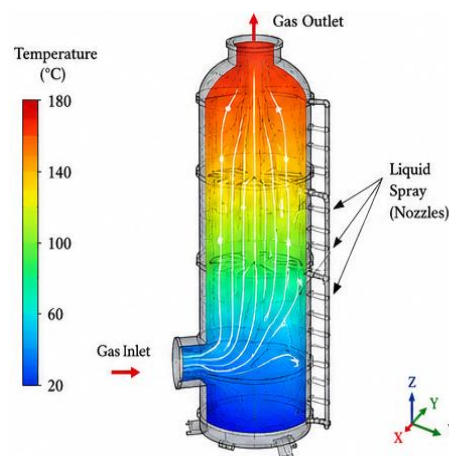
افزایش اندازه ذرات موجب افزایش احتمال برخورد با قطرات مایع و دستیابی به راندمان حذف بیش از ۹۹٪ برای ذرات بزرگ‌تر از حدود ۳ μm می‌شود.

از منظر مقایسه فناوری‌های کنترل آلودگی هوا، نتایج نشان می‌دهد که انتخاب فناوری مناسب باید با تمرکز بر حذف مؤثر ذرات معلق انجام گیرد، زیرا این آلاینده اصلی‌ترین عامل تجاوز از حدود استاندارد است. در این



شکل ۶. کانتور توزیع فشار استاتیکی در داخل اسکرابر مرطوب و افت فشار کل تجهیز ($P_{\Delta} \approx 1300 \text{ Pa}$).

شکل ۷ توزیع دما و خطوط جریان داخل اسکرابر مرطوب را نشان می‌دهد. مطابق نتایج شبیه‌سازی، گاز داغ با دمای حدود ۱۸۰°C از قسمت ورودی وارد اسکرابر شده و در اثر تماس مستقیم با قطرات مایع پاشش‌شده از نازل‌ها، دمای آن به تدریج کاهش می‌یابد. بیشترین دما در بخش بالایی اسکرابر و کمترین دما در ناحیه پایین و اطراف محل تجمع مایع مشاهده می‌شود که بیانگر انتقال مؤثر حرارت بین فاز گاز و مایع است. خطوط جریان نشان می‌دهند که گاز پس از ورود به ستون، در مسیر عمودی به سمت خروجی حرکت کرده و ضمن عبور از نواحی پاشش، فرآیند تبادل حرارت و جرم به‌صورت یکنواخت انجام می‌شود. همچنین، گرادیان منظم دما در امتداد ارتفاع اسکرابر نشان‌دهنده عملکرد مناسب سیستم پاشش و اختلاط مطلوب بین گاز و قطرات مایع است. این توزیع دمایی بیانگر کاهش مؤثر دمای گاز و فراهم شدن شرایط مناسب برای افزایش راندمان جذب آلاینده‌ها در اسکرابر مرطوب است.



شکل ۷. کانتور توزیع دما و خطوط جریان داخل اسکرابر مرطوب

۵- مراجع

- [1] R. Fuller, P. J. Landrigan, K. Balakrishnan, et al., "Pollution and health: A progress update," *The Lancet Planetary Health*, vol. 6, no. 6, pp. e535–e547, 2022.
- [2] A. Jaworek, A. Krupa, and T. Czech, "Modern electrostatic devices and wet electrostatic precipitators for air pollution control," *Journal of Electrostatics*, vol. 112, Art. no. 103610, 2021.
- [3] A. Kumar, R. Singh, and P. Sharma, "Volatile organic compounds removal technologies: A review," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 6, Art. no. 106376, 2021.
- [4] X. Li, Y. Wang, and Z. Chen, "Wastewater management in wet scrubber systems: Challenges and opportunities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 365, Art. no. 132801, 2022.
- [5] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, "Environmental and health impacts of air pollution: A review," *Frontiers in Public Health*, vol. 8, Art. no. 14, 2020.
- [6] Y. Wang, H. Liu, and X. Zhang, "CFD-based optimization of wet scrubbers for industrial air pollution control," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 202, pp. 320–334, 2024.
- [7] L. Zhang, H. Chen, and J. Li, "Performance evaluation of baghouse filtration systems for particulate matter control," *Separation and Purification Technology*, vol. 289, Art. no. 120741, 2022.
- [8] H. Zhao, Y. Sun, and Q. Wu, "Recent advances in wet scrubber technology for simultaneous removal of gaseous pollutants and particulate matter," *Journal of Environmental Management*, vol. 337, Art. no. 117703, 2023.
- [9] R. Fuller, P. J. Landrigan, K. Balakrishnan, et al., "Pollution and health: A progress update," *The Lancet Planetary Health*, vol. 6, no. 6, pp. e535–e547, 2022.
- [10] World Health Organization, WHO Global Air Quality Guidelines. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2021.
- [11] United States Environmental Protection Agency, Integrated Science Assessments for Criteria Air Pollutants. Washington, DC, USA: U.S. Environmental Protection Agency, 2024.

میان، اسکرابر مرطوب به دلیل توانایی بالا در حذف هم‌زمان ذرات ریز و برخی گازهای آلاینده، گزینه‌ای کارآمد برای شرایط مورد مطالعه محسوب می‌شود. با این حال، کارایی نهایی این سیستم به پارامترهای طراحی، شرایط بهره‌برداری و مدیریت صحیح سیستم وابسته است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل CFD توسعه‌یافته، پس از انجام آزمون استقلال از شبکه و اعتبارسنجی با داده‌های تجربی، از دقت مناسبی برخوردار است و خطای نسبی پارامترهای کلیدی کمتر از ۵ درصد به دست آمد. بررسی کانتورهای فشار بیانگر کاهش تدریجی فشار از ورودی به سمت خروجی اسکرابر و افت فشار کل حدود ۱۳۰۰ پاسکال بود که عملکرد مناسب تجهیز را از نظر هیدرودینامیکی تأیید می‌کند. همچنین، تحلیل کانتور دما نشان داد که تماس مؤثر گاز داغ با قطرات پاشش شده موجب کاهش یکنواخت دمای جریان و بهبود انتقال حرارت در داخل اسکرابر می‌شود. نتایج شبیه‌سازی راندمان حذف ذرات نیز نشان داد که با افزایش قطر ذرات، راندمان جمع‌آوری افزایش یافته و برای ذرات بزرگ‌تر از ۳ میکرومتر به بیش از ۹۹ درصد می‌رسد. این نتایج بیانگر عملکرد مطلوب اسکرابر مرطوب در حذف ذرات معلق و کنترل آلاینده‌ها است. در مجموع، شبیه‌سازی CFD به‌عنوان ابزاری کارآمد، قابلیت تحلیل دقیق رفتار جریان و بهینه‌سازی پارامترهای طراحی و بهره‌برداری اسکرابر را فراهم کرده و می‌تواند در طراحی سامانه‌های کنترل آلودگی هوا با راندمان بالا و مصرف انرژی مناسب مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به مقایسه فناوری‌های مختلف کنترل آلودگی هوا در این پژوهش، مشخص شد که اسکرابر مرطوب به دلیل راندمان بالای حذف ذرات ریز و گازهای اسیدی، گزینه‌ای مؤثر برای کاهش آلاینده‌های ناشی از این واحد صنعتی محسوب می‌شود. در این راستا، به‌کارگیری سیستم اسکرابر مرطوب در کنار بهینه‌سازی شرایط عملیاتی و استفاده از شبیه‌سازی می‌تواند نقش مهمی در افزایش راندمان حذف آلاینده‌ها و کاهش بار زیست‌محیطی و کاهش مخاطرات سلامت انسان داشته باشد.

- [19] Z. Barnett-Itzhaki, S. Meir, Y. Rozolio, A. Noy, and B. Ben-David, "Evaluating the effectiveness of abatement technologies in reducing air pollution from power plants," *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 21, no. 5, pp. 1039–1046, 2025.
- [20] O. Imarhiagbe, A. C. Okafor, and M. C. Ogwu, "Air Pollution Control Technologies and Strategies," in *Evaluating Environmental Processes and Technologies*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, pp. 231–258.
- [21] R. A. Tavella, F. M. R. da Silva Júnior, M. A. Santos, S. G. E. K. Miraglia, and R. D. Pereira Filho, "A review of air pollution from petroleum refining and petrochemical industrial complexes: Sources, key pollutants, health impacts, and challenges," *ChemEngineering*, vol. 9, no. 1, p. 13, 2025.
- [22] Y. A. Fahim et al., "Heavy Metal Air Pollution: Human Health Effects and Nanomaterial Strategies for Monitoring and Remediation," *Biological Trace Element Research*, pp. 1–23, 2026.
- [23] M. Ruiz-Colmenero et al., "Air treatment technologies in pig farms. Life cycle assessment of dry and wet scrubbers in Northern Italy and Northeastern Spain," *Science of the Total Environment*, vol. 922, p. 171197, 2024.
- [24] T. Chen, L. Deng, Y. Li, J. Li, X. Zhao, and L. Fu, "Removal of multiple pollutants in air pollution control devices of a coal-fired boiler installed with a flue gas condensation scrubber," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, p. 139971, 2024.
- [12] Y. Zhao, A. J. A. Aarnink, M. C. M. De Jong, N. W. M. Ogink, and P. G. Koerkamp, "Effectiveness of multi-stage scrubbers in reducing emissions of air pollutants from pig houses," *Transactions of the ASABE*, vol. 54, no. 1, pp. 285–293, 2011.
- [13] K. Ramaswamy, L. T. Jule, N. N., K. Subramanian, S. R., and V. Seenivasan, "Reduction of environmental chemicals, toxicity and particulate matter in wet scrubber device to achieve zero emissions," *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 9170, 2022.
- [14] A. Verma and N. P. Singh, "Delhi's Air Pollution as an Environmental Disaster: An Evaluation of Policies and Initiatives for Sustainable Development," *IDRiM Journal*, vol. 16, no. 1, 2026.
- [15] A. Sutar, M. A. Chakraborty, M. Dey, and M. V. M. P. Satuluri, *Air Pollution and Control Engineering*. BR Publications, 2026.
- [16] L. Lin et al., "Emission Characteristics and Suppression Measures of Dust from Open-Pit Coal Mine: A Review," *Energy & Fuels*, vol. 40, no. 15, pp. 7839–7861, 2026.
- [17] T. Gulzar, A. Yasar, and I. Wasif, "A review on air pollution control technologies commonly employed in the industrial sector," (no publication details provided).
- [18] P. S. Warke, D. M. Chaudhari, V. S. Naik, D. D. Patil, S. S. Dhokale, K. G. Maniyar, and G. H. Patil, "Wet Scrubber System for Exhaust Gas Emission Reduction," *Journal of Mines, Metals & Fuels*, vol. 73, no. 5, 2025.



دانشگاه جامع امام حسین
موسسه علمی پژوهشی در زمینه سلامت و محیط زیست

Journal of Research in safety, health and environment/ 2026/ Vol.4/ No.3/ 39-53

Journal of Research in safety, health and environment



Performance Evaluation of a Wet Scrubber System for Air Pollutant Removal and Human Health Risk Reduction: A Case Study

Mohammad Hassan Kamyab¹, Zahra Kamyab^{2*}

¹ Researcher and Lecturer, Faculty of Engineering, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran.

² Ph.D. Candidate/Graduate in Agricultural and Environmental Engineering Education and Extension, Faculty of Economics and Development, University of Tehran, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 29 October 2021

Received in revised form: 7 December 2021

Accepted: 8 December 2021

Available online: 13 December 2021

*Correspondence:

mohammadhkamyab@gmail.com

Keywords:

Air pollutants

Human health

Air pollution

Wet scrubber

Air pollution control technologies

ABSTRACT

Today, the increasing emission of industrial air pollutants is recognized as one of the most significant threats to human health and environmental quality. The release of particulate matter, acidic gases, volatile organic compounds (VOCs), and heavy metals has been associated with a higher incidence of respiratory diseases, cardiovascular disorders, and various types of cancer. Therefore, selecting appropriate air pollution control technologies plays a critical role in mitigating environmental impacts and protecting public health. In this study, the most widely used air pollution control technologies, including wet scrubbers, dry scrubbers, bag filters, cyclones, and electrostatic precipitators, were comparatively evaluated in terms of pollutant removal efficiency, energy consumption, operating costs, capability to remove different classes of pollutants, and environmental impacts. Furthermore, based on the technical documentation analyzed in this research, the performance of the wet scrubber system was assessed with respect to design characteristics, wastewater management, operational requirements, compliance with environmental standards, and optimization potential through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The results indicate that, despite requiring appropriate wastewater management, wet scrubbers provide excellent removal efficiencies for acidic gases and fine particulate matter and are therefore considered among the most effective air pollution control technologies across a wide range of industrial applications. In addition, numerical simulation and optimization of operating parameters can further improve pollutant removal efficiency while reducing energy consumption.