

بررسی آزمایشگاهی و بهینه‌سازی عملکرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک

مرجان رکنی^۱، محمد حجت^{۲*}، محمدرضا طلایی^۳، سید فواد آقامیری^۴

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان

۲- استادیار مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان

۳- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه اصفهان

۴- استاد مهندسی شیمی، دانشگاه شیراز

پیام‌نگار: m.hojjat@eng.ui.ac.ir

چکیده

در این پژوهش عملکرد یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک استوانه‌ای تک مرحله‌ای برای جداسازی ذرات گچ و نمک با قطر متوسط ذرات ۱۸۰ و ۲۹۰ نانومتر از جریان هوا به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. اثر خواص ساختاری، اندازه ذرات و مقاومت ویژه الکتریکی و مشخصه‌های عملیاتی، اختلاف پتانسیل، قطر الکترود تخلیه، سرعت جریان هوا و جریان الکتریکی بر بازده جداسازی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد بازده جداسازی ذرات گچ بیشتر از نمک است. در محدوده اختلاف پتانسیل ۶ تا ۱۰ کیلوولت، جرقه مشاهده نشد، پس با افزایش اختلاف پتانسیل می‌توان به بازده بالاتری رسید. افت بازده با افزایش سرعت جریان هوا برای ذرات گچ بیشتر از نمک است که نشان می‌دهد برای ذرات نمک می‌توان در سرعت بالاتر هم به صورت اقتصادی عمل کرد. بازده بهینه سامانه توسط روش سطح پاسخ برای ذرات گچ در سرعت‌های ۱/۲ و ۲ متر بر ثانیه به ترتیب ۸۸/۶ و ۶۰ درصد و برای ذرات نمک در همین سرعت‌ها به ترتیب ۷۲/۸ و ۶۸ درصد تعیین شد. این مقادارها با نتایج تجربی تأیید شدند.

تاریخ دریافت: ۹۸/۱۲/۰۶

تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۲/۱۵

شماره صفحات: ۵۵ تا ۶۹

کلیدواژه‌ها: رسوب‌دهنده

الکترواستاتیک، تخلیه کرونا،

بهینه‌سازی، جداسازی ذرات

۱. مقدمه

گاز ضروری است. تجهیزات جداسازی مختلفی برای جداسازی ذرات جامد از جریان‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد که مهم‌ترین آن‌ها ته‌نشین‌کننده‌های ثقلی، جداسازهای سیکلونی، رسوب‌دهنده‌های الکترواستاتیک، پالایه‌های پارچه‌ای و شوینده‌ها هستند.

جریان گاز خروجی برخی واحدهای صنعتی حاوی ذرات جامد معلق است. این ذرات می‌توانند محصول جانبی واحد صنعتی (آلاینده) یا محصول اصلی آن باشد. در هر صورت جداسازی این ذرات از جریان

* اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

پیش از انتخاب و طراحی هر نوع وسیله جداسازی، داشتن اطلاعات راجع به نوع ذرات، جریان گاز و شرایط حاکم بر فرایند ضروری است؛ اندازه، توزیع اندازه، شکل هندسی، چگالی، مقاومت ویژه الکتریکی، چسبندگی، خوردگی، واکنش پذیری و میزان سمیت ویژگی‌های مهم ذرات هستند. ویژگی‌های مهم جریان گاز ترکیب، فشار، دما، گرانشی، درصد نم و اشتعال پذیری است. شرایط عملیاتی سرعت گاز، غلظت ذرات در جریان گاز، بازده جداسازی و افت فشار هستند. بسیاری از تجهیزاتی که برای جداسازی ذرات از جریان گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند تحت تأثیر اندازه ذرات و مولکول‌های گازی رفتار بسیار متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۱].

در تمامی تجهیزات تصفیه گاز، ذرات در اثر اعمال یک یا چند نیرو، از سیال جدا می‌شوند. این نیروها که شامل نیروی وزن، ماندگری (اینرسی)، گریز از مرکز و نیروهای الکترواستاتیک هستند، موجب می‌شوند ذرات نسبت به سرعت متوسط جریان سیال شتاب گرفته، در جهت برآیند نیروی اعمالی حرکت کنند. به منظور جلوگیری از ورود مجدد این ذرات به جریان سیال باید آن‌ها را از محیط سیال جمع‌آوری و خارج کرد [۱].

یکی از تجهیزات جداسازی ذرات جامد از جریان گاز که برای جداسازی ذرات زیر ۵ میکرون عملکرد مناسبی دارد، رسوب‌دهنده الکترواستاتیک است.

چانگ و همکاران [۲] اثر قطر سیم تخلیه، فاصله سیم‌ها و فاصله بین صفحات را بر عملکرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک سیم و صفحه در شاخص‌های عملیاتی مختلف به صورت نظری مورد ارزیابی قرار دادند. قدرت میدان الکتریکی، چگالی متوسط جریان در صفحات و نسبت توان کرونا شاخص‌های عملکرد بودند. نتایج نشان می‌دهد در میدان الکتریکی مشابه، بازده جمع‌آوری با کاهش قطر سیم افزایش می‌یابد. فاصله بهینه سیم‌ها و صفحه‌ها با تغییر قدرت میدان الکتریکی تغییر می‌کند. جدروسیک و همکاران [۳] اثر قطر ذرات و هندسه الکتروود تخلیه بر سرعت حرکت ذرات خاکستر در رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با الکتروودهای مختلف شامل صفحه خاردار، لوله خاردار، سیم و نوار میخ‌دار را بررسی کردند. کارایی رسوب‌دهنده به شدت به هندسه الکتروود بستگی دارد. نتایج نشان می‌دهد لوله میخ‌دار مؤثرترین الکتروود تخلیه است. نوبرگا و همکاران [۴] عملکرد یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک سیم و صفحه در حذف

ذرات فسفات با توزیع اندازه گسترده را مطالعه کردند. تجهیز آزمایشگاهی شامل سه رسوب‌دهنده با ابعاد متفاوت بود. عملکرد رسوب‌دهنده با افزایش فاصله بین صفحات جمع‌آوری افزایش یافت؛ نتایج نشان داد بازده در نزدیکی ذرات ۱ میکرومتر به حداقل می‌رسد. افزایش عرض مجرا باعث افزایش حذف ذرات، به ویژه در میدان الکتریکی با شدت کم، می‌شود. با افزایش عرض کانال میدان الکتریکی در نزدیکی صفحات جمع‌آوری افزایش می‌یابد و جمع‌آوری ذرات را تشدید می‌کند. جدروسیک و همکاران [۵] تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی خاکستر بر عملکرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک را بررسی کردند. پارامترهای مشخصه خاکستر به نوع زغال سنگ و پارامترهای دپگ بخار و شرایط احتراق بستگی دارد. انتخاب مناسب الکتروودهای تخلیه برای خصوصیات مشخصی از خاکستر منجر به افزایش بهره‌وری مجموعه می‌شود. به عنوان مثال؛ برای خاکستر با مقاومت زیاد و محتوای بالای ذرات ریز، یک نوار الکتروود خاردار مؤثرتر از نوار الکتروود ماریچی است. ژو و همکاران [۶] با استفاده از دستگاه پیش شارژ دوقطبی^۱ (دارای یک شارژ مثبت و یک شارژ منفی) در ورودی کانال رسوب‌دهنده الکترواستاتیک، به بازده ۹۵-۹۸٪ در جداسازی ذرات کلسیم کربنات با اندازه ۰/۱ تا ۱۰ میکرون دست یافتند. بلجان و همکاران [۷] تخلیه کرونا در یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک استوانه-سیم هم‌محور اصلاح شده را به صورت تجربی بررسی کردند. این ساختار به طور گسترده‌ای برای جداسازی ذرات گردوغبار موجود در گازهای دودکش استفاده می‌شود. الکتروود جمع‌کننده استوانه‌ای متشکل از بخش‌هایی با قطرهای کوچک و بزرگ است. تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد رسوب‌دهنده اصلاح شده دارای کارایی بالاتری نسبت به مدل استاندارد است. آرایش الکتروود سیم استوانه هم‌محور اصلاح شده دارای ویژگی‌های ولتاژ-جریان است که برای کاربرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک مفیدتر از دستگاه استاندارد است. نسبت جریان به طول در قطر یکسان بخش جمع‌آوری‌کننده دستگاه اصلاح شده بالاتر است و تضمین شارژ ذرات بهتر است. تانگلک و همکاران [۸] رسوب‌دهنده الکترواستاتیکی متشکل از لوله فولادی ضدزنگ به عنوان الکتروود جمع‌آوری و سیم تنگستن به عنوان الکتروود تخلیه ساختند که از روش پلاسمایی کرونا برای ایجاد میدان

1. Bipolar Pre-Charger

می‌شود. با این حال، در مورد ذرات ریز، این نوع پالایه‌ها از کارایی بالایی برخوردار نیستند، بنابراین از رسوب‌دهنده الکترواستاتیک استفاده می‌شود. در این مطالعه سوخت‌های زیستی، بازده جمع‌آوری ذرات جامد از یک دیگ بخار (۵۰ کیلووات) و از واحد گازی‌سازی^۱ (۱۰۰ کیلووات) مقایسه شدند. اگرچه انتشار ذرات جامد از دیگ بخار جدید کم است، ترکیب این چنین دیگ بخار با یک رسوب الکترواستاتیک ممکن است میزان انتشار ذرات را به حداقل کاهش دهد. بازده جمع‌آوری رسوب الکترواستاتیکی ۹۸ تا ۹۹٪ بود. به‌طور کلی نتایج حاصل از پژوهش‌های پیشین در جدول (۱) جمع‌بندی شده‌است.

یافتن بهترین شرایط عملیاتی برای جداسازی ذرات جامد ریز از جریان هوا توسط رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با عملکرد بالا از مهمترین چالش‌هاست. ویژگی‌های ذرات، ویژگی‌های گاز و شرایط فرایند و ساختار دستگاه رسوب‌دهنده الکترواستاتیک مؤلفه‌های کلیدی و تأثیرگذار بر بازده جداسازی ذرات توسط رسوب‌دهنده هستند. بررسی و مقایسه نشدن ذرات گچ و نمک از لحاظ ساختاری و تأثیر قطر سیم الکتروود تخلیه در پژوهش‌های پیشین، لزوم انجام یک پژوهش آزمایشگاهی را تبیین می‌نماید.

این پژوهش با هدف ساخت دستگاهی برای جداسازی مؤثر ذرات ریز همراه گاز و برآورد اولیه عملکرد آن برای کاربردهای آتی در جداسازی ذرات تولیدشده با واکنشگاه شعله‌پاششی انجام گرفت. یک سامانه رسوب‌دهنده الکترواستاتیک ساخته شد و امکان جداسازی ذرات گچ و نمک به‌وسیله آن بررسی و اثر خواص ساختاری ذرات، توزیع اندازه و مقاومت ویژه الکتریکی و مؤلفه‌های عملیاتی، اختلاف پتانسیل، سرعت جریان هوا، قطر الکتروود تخلیه و شدت جریان عبوری بر بازده رسوب‌دهنده تعیین شد. از نرم‌افزار Design-Expert 7.0 برای طراحی آزمایش، به‌دست آوردن مدل‌های حاکم بر رفتار سیستم و تعیین شرایط بهینه عملیاتی سامانه آزمایشگاهی استفاده شد. شرایط عملیاتی بهینه به‌دست آمده از نرم‌افزار با نتایج آزمایشگاهی مورد تأیید قرار گرفت. نتایج این پژوهش می‌تواند در توسعه و پیشرفت جداسازی ذرات مختلف استفاده شود و برای طراحی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک مناسب برای اهداف خاص به‌کار رود.

الکتریکی بین الکتروودها استفاده می‌کند و از آن برای دوده‌زدایی از لوله خروجی استفاده کردند. در پژوهشی دیگر کارایی مجموعه رسوب‌دهنده الکترواستاتیک باریک با الکتروودهای سیمی طولی و عرضی برای ذرات دود سیگار کوچک‌تر از ۱/۵ میکرومتر مورد بررسی قرار گرفته است [۹]. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد بازده مجموعه به‌شدت به موقعیت الکتروود تخلیه بستگی دارد و برای رسوب‌دهنده با الکتروود سیم طولی بالاتر است. کارایی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک دومرحله‌ای و یک مرحله‌ای برای حذف گردوغبار از جریان هوا مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد کارایی جمع‌آوری رسوب‌دهنده با افزایش ولتاژ و کاهش سرعت هوا افزایش می‌یابد. رسوب‌دهنده الکترواستاتیک دومرحله‌ای می‌تواند با جلوگیری از تخلیه کرونای برگشتی، گردوغبار با مقاومت بالا را جدا کند [۱۰]. ژیانو و همکاران [۱۱] عملکرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با پیکربندی استوانه-سیم در دماهای بالا را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. رسوب الکترواستاتیک در دمای بالا یک‌روش بالقوه مناسب برای پالایش گاز داغ است. سه مؤلفه بازده جمع‌آوری ذرات، شاخص مصرف انرژی و غلظت توده خروجی ذرات، برای ارزیابی عملکرد جامع یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک در دمای ۳۵۰ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس مورد بررسی قرار گرفتند و روشی برای انتخاب یک ترکیب بهینه از مؤلفه‌های عملیاتی برای شرایط مختلف پیشنهاد شد. ژو و همکاران [۱۱] اثر شکل، قطر و فاصله الکتروود بر بازده جمع‌آوری و جریان کرونای رسوب‌دهنده الکترواستاتیک برای ذرات خاکستر زغال‌سنگ با قطر متوسط ۱۶/۷ میکرومتر را بررسی و الکتروود مناسب برای رسوب‌دهنده با دمای بالا را طراحی کردند. ادابارا و همکاران [۱۲] در پژوهشی یک رسوب‌دهنده الکترواستاتیک برای پالایش گازهای حاصل از سوختن در مقیاس کوچک را طراحی کردند. رسوب‌دهنده الکترواستاتیک از نوع سیم و صفحه ساده به‌منظور آزمایش کارایی جمع‌آوری ذرات دود حاصل از سوختن چوب‌لاستیک به‌عنوان منبع انرژی زیست‌توده بود. بیشینه ولتاژ مستقیم ورودی ۱۰/۵ کیلوولت و فاصله بین صفحه و سیم‌ها قابل تنظیم بود. پوسکاس و همکاران [۱۳] پالایش گازهای حاصل از سوختن سوخت‌های زیستی با استفاده از رسوب‌دهنده الکترواستاتیک را بررسی کردند. معمولاً گاز دودکش قبل از تخلیه در جو با سیکلون‌های چندمرحله‌ای و پالایه‌های پارچه‌ای پالایش

جدول ۱. جمع‌بندی پیشینه پژوهش.

مرجع	نوع رسوب‌دهنده الکترواستاتیک	نوع ذرات اندازه ذرات (μm)	سرعت گاز (m/s)	بده (L/min)		اختلاف پتانسیل (kV)	بازده (η)	مؤلفه مورد بررسی
				غلظت (mg/m^3)				
[۲]	سیم و صفحه	۱۰	۱	۵۰۰۰				مؤلفه‌های هندسی و عملیاتی
[۳]	سیم و صفحه	خاکستر ۴۰-۱۶۰	۱			۰-۴۵		شکل الکتروود تخلیه
[۴]	سیم و صفحه	فسفات ۰/۱-۱۰۰	۱، ۱/۵			۰-۴۵ مستقیم منفی		ذرات چند توزیعی
[۵]	سیم و صفحه	خاکستر ۲-۱۰۰		۲/۳۸ ۰/۶۳ ۱/۸۰		۲۰-۶۰ مستقیم		خواص فیزیکی و شیمیایی، شکل الکتروود تخلیه
[۶]	سیم و صفحه	کلسیم کربنات ۰/۱-۱۰	۰/۷۸			۰-۱۵ مستقیم مثبت و منفی ۵۰	۹۵-۹۸	دستگاه پیش شارژ دو قطبی
[۷]	استوانه	ذرات خروجی از دودکش ۰/۰۶، ۰/۰۸				۰-۱۵ مستقیم مثبت و منفی		رسوب‌دهنده اصلاح شده و استاندارد
[۸]	استوانه	کربن کوچکتر از ۱۰		۱۰		۰-۹ مستقیم منفی	۹۰	ولتاژ پالس، ولتاژ مستقیم بالا
[۹]	سیم و صفحه	دود سیگار ۰/۲-۱/۵	۰/۶					الکتروود سیمی طولی و عرضی
[۱۰]	سیم و صفحه تک‌مرحله و دو مرحله	گردوغبار سیمان ۲-۱۰	۰/۷ ۱/۷، ۱/۴، ۱			۱۱-۱۵ مستقیم منفی	۹۴/۵ ۹۷/۵	تک‌مرحله‌ای دو مرحله‌ای
[۱۱]	استوانه	خاکستر ۰/۲-۱۰۰		۲۰۰-۳۶۰		۱۲-۲۰ مستقیم منفی	۹۹/۶	انرژی مصرفی، غلظت جرمی ذرات
[۱۲]	سیم و صفحه	دود				۱۰/۵ مستقیم	۸۰	طراحی و ساخت رسوب‌دهنده
[۱۳]	استوانه	ذرات گاز دودکش و ذرات واحد گازی سازی ۰/۳-۲۰	۱/۹	۱۸۰ و ۱۳		۰-۳۰ مستقیم منفی	۹۸ ۷۵	ذرات درون دو نوع گاز
[۱۴]	سیم و صفحه موجدار مربعی	اکسید آلومینیوم ۱/۸	۲-۳/۶	۲۶۹-۵۰۴		۸-۱۵		بررسی اثر استفاده از جمع‌کننده موجدار مربعی

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲ مواد

ذرات نمک و گچ مورد استفاده قرار گرفت که مشخصات آن‌ها در جدول (۲) نشان داده شده‌است.

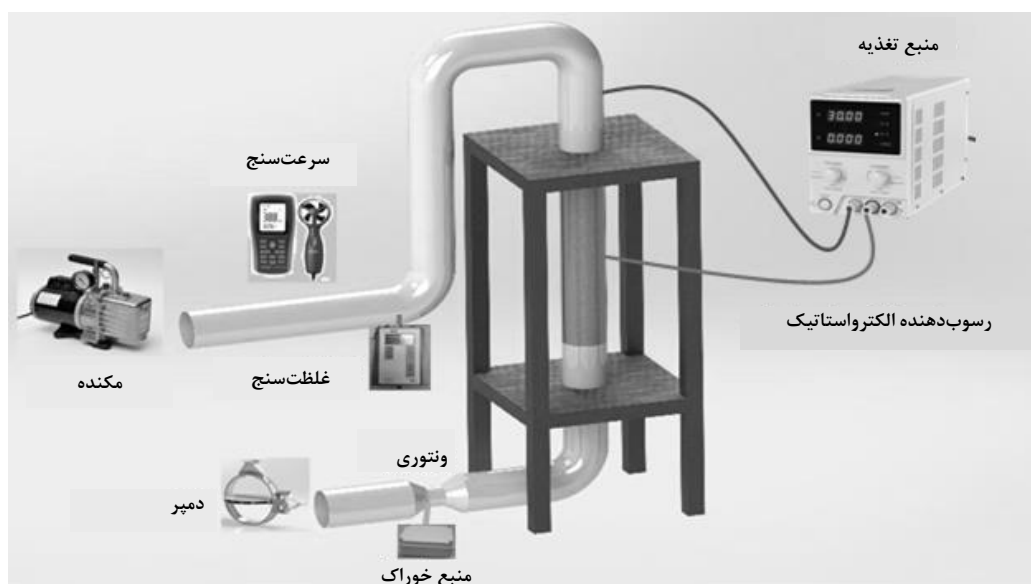
جدول ۲. مشخصات ذرات مورد استفاده.

ماده	چگالی (kg/m ³)	قطر متوسط (nm)	مقاومت ویژه الکتریکی (Ωcm)
نمک	۲۱۶۰	۱۹۸	۱۰ ^۸
گچ	۲۳۲۰	۲۸۰	۱۰ ^{۱۴}

۲-۲ سامانه آزمایشگاهی

در شکل (۱) نمای طرحواره سامانه آزمایشگاهی نمایش داده شده است. این سامانه رسوب‌دهنده الکترواستاتیک، از نوع استوانه‌ای تک‌مرحله‌ای است. الکتروود جمع‌آوری آن، لوله‌ای با قطر داخلی ۱۲/۵ سانتی‌متر و طول ۵۶ سانتی‌متر است. جداره داخلی لوله با ماشین کاری صیقل کاری شده است. برای عایق کاری الکتریکی لوله در جدار خارجی آن از لوله پی وی سی استفاده شد. برای آنکه سیال حاوی ذرات به صورت یکنواخت به لوله اصلی وارد و از آن

خارج شود و به منظور عایق‌سازی دو سر رسوب‌دهنده و نیز برای ثابت نگه‌داشتن لوله‌های رابط و رسوب‌دهنده، اتصالاتی از جنس تفلون به قطر لوله (۱۲/۵ سانتی‌متر) و طول ۳۵ سانتی‌متر ساخته و در ورودی و خروجی لوله تعبیه شدند. برای نصب سیم به‌عنوان الکتروود تخلیه، در ورودی و خروجی یک نوار باریک تفلونی به صورت قطری نصب شد. سیم رسوب‌دهنده با پیچ‌هایی که در ورودی و خروجی تعبیه شده‌است به صورت مستقیم در کانال محکم می‌شود تا کاملاً صاف و بدون تاب‌خوردگی باشد و ذرات در ورودی با سیم صاف و میدان الکتریکی یکنواخت مواجه شوند. یک منبع تغذیه، برای ایجاد اختلاف پتانسیل بالا به کار گرفته شد. قطب منفی منبع تغذیه به الکتروود تخلیه و قطب مثبت به الکتروود جمع‌آوری متصل شد. شدت جریان عبوری از رسوب‌دهنده توسط آمپرسنج اندازه‌گیری شد. برای ایجاد جریان هوای حاوی ذرات از یک جاروبرقی به‌عنوان مکند، در خروجی سیستم استفاده شد؛ برای تنظیم سرعت جریان هوا در مقادیر دلخواه مجاز از یک دریچه روی دسته جاروبرقی و دمپر، در ورودی استفاده شد. سرعت جریان هوا به وسیله سرعت‌سنج (AM-4205A)، اندازه‌گیری شد. از یک ونتوری، برای ایجاد مکش و ورود ذرات از منبع خوراک، به جریان هوا استفاده شد. غلظت ذرات در ورودی و خروجی سامانه به وسیله غلظت‌سنج (TSI DustTrak) اندازه‌گیری شد.



شکل ۱. ساختار سامانه آزمایشگاهی.

۳-۲ محاسبات

بازده جداسازی با رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$\eta = \frac{C_{p,in} - C_{p,out}}{C_{p,in}} \times 100 \quad (1)$$

که $C_{p,in}$ و $C_{p,out}$ به ترتیب غلظت ذرات ورودی به و خروجی از سامانه هستند.

جریان در رسوب‌دهنده الکترواستاتیک معمولاً با مشخصه متوسط چگالی جریان^۱ که طبق معادله (۲) برابر است با نسبت کل جریان رسوب‌دهنده به کل سطح الکتروود جمع‌آوری، نشان داده می‌شود.

$$J_m = \frac{I}{A_c} \quad (2)$$

بر اساس رابطه (۳) توان مصرفی حاصل ضرب شدت جریان در ولتاژ است.

$$P = V \times I \quad (3)$$

قطر متوسط ذرات با معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$d_{mean} = \frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i} \quad (4)$$

سرعت مهاجرت ذرات توسط معادله دویچ^۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta = 1 - e^{(-wA_e/Q)} \quad (5)$$

۴-۲ طراحی آزمایش‌ها

برای بررسی اثر مؤلفه‌های مؤثر بر بازده جداسازی ذرات از جریان هوا و تعیین شرایط بهینه، آزمایش‌هایی طراحی و انجام شدند. طراحی آزمایش‌ها توسط نرم‌افزار Design-Expert 7.0 به روش سطح پاسخ^۳ و حالت طراحی مرکب مرکزی^۴ انجام شد. بر اساس

1. Current Density
2. Deutsch Equation
3. Response Surface Methodology

آزمایش‌های اولیه و مطالعات علمی انجام‌شده، قطر سیم الکتروود تخلیه و اختلاف پتانسیل، بر بازده جداسازی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک تأثیرگذارند. حد پایین و بالای اختلاف پتانسیل بر اساس توانایی منبع تغذیه موجود و حدود مربوط به قطر الکتروود تخلیه با توجه به اندازه‌های متداول مورد استفاده تعیین شد. جدول (۳) مؤلفه‌های مستقل و سطوحی که برای آن‌ها در نظر گرفته شده‌اند را نشان می‌دهد.

جدول ۳. سطوح و مؤلفه‌های مستقل.

مؤلفه‌های مورد بررسی	سطوح مؤلفه‌ها		
	-۱	۰	+۱
قطر سیم الکتروود تخلیه (mm)	۰/۷	۰/۹	۱/۱
اختلاف پتانسیل (kV)	۶	۸	۱۰

آزمایش‌ها در دو سرعت متفاوت هوا ۱/۲ و ۲ متر بر ثانیه انجام شد. با توجه به مؤلفه‌های مستقل و سطوح انتخابی، روش سطح پاسخ برای هر سرعت جریان هوا ۱۰ آزمایش مطابق جداول (۴) تا (۷) ارائه داد.

جدول ۴. طراحی آزمایش برای جداسازی ذرات گچ

از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.

بازده %	اختلاف پتانسیل (kV)	قطر سیم الکتروود تخلیه (mm)	آزمایش
۴۵	۶	۰/۹	۱
۵۰	۸	۰/۹	۲
۸۱	۸	۰/۷	۳
۷۴	۱۰	۱/۱	۴
۴۰	۶	۱/۱	۵
۷۳	۶	۰/۷	۶
۸۶	۱۰	۰/۷	۷
۴۹	۸	۱/۱	۸
۸۰	۱۰	۰/۹	۹
۵۲	۸	۰/۹	۱۰

4. Central Composite Design

جدول ۷. طراحی آزمایش برای جداسازی ذرات نمک از جریان هوا با سرعت ۲ متر بر ثانیه.

آزمایش	قطر سیم الکتروود تخلیه (mm)	اختلاف پتانسیل (kV)	بازده %
۱	۰/۹	۱۰	۵۰
۲	۰/۹	۸	۴۵
۳	۱/۱	۸	۲۸
۴	۰/۷	۱۰	۷۰
۵	۱/۱	۱۰	۴۱
۶	۰/۹	۸	۴۲
۷	۰/۹	۶	۳۱
۸	۰/۷	۸	۶۲
۹	۱/۱	۶	۱۹
۱۰	۰/۷	۶	۳۶

جدول ۵. طراحی آزمایش برای جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۲ متر بر ثانیه.

آزمایش	قطر سیم الکتروود تخلیه (mm)	اختلاف پتانسیل (kV)	بازده %
۱	۱/۱	۶	۱۹
۲	۰/۹	۸	۳۶
۳	۰/۹	۸	۳۴
۴	۱/۱	۸	۲۸
۵	۰/۷	۱۰	۶۱
۶	۱/۱	۱۰	۳۱
۷	۰/۹	۱۰	۴۷
۸	۰/۷	۸	۴۲
۹	۰/۷	۶	۳۰
۱۰	۰/۹	۶	۲۵

جدول ۲-۵ بررسی خواص ساختاری ذرات

جدول ۲-۵-۱ توزیع اندازه ذرات

توزیع اندازه ذرات یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر بازده رسوب‌دهنده الکترواستاتیک است. نتایج پراکندگی نوردینامیکی در شکل‌های (۲) و (۳) نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌شود که اندازه ذرات در گستره ۱۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر قرار دارد. با توجه به رابطه (۴) [۱۵] قطر متوسط ذرات گچ ۲۸۰ نانومتر و قطر متوسط ذرات نمک ۱۹۸ نانومتر به دست می‌آید. اندازه ذرات بر میزان بار الکتریکی کسب‌شده ذرات و در نتیجه سرعت مهاجرت آن‌ها به طرف الکترودهای جمع‌آوری مؤثر است. ذرات بزرگ‌تر بار الکتریکی و سرعت حرکت بیشتری دارند، در نتیجه سریع‌تر از جریان گاز جدا شده، بازده جداسازی آن‌ها بالاتر است.

جدول ۲-۵-۲ مقاومت ویژه الکتریکی ذرات

مقاومت ویژه الکتریکی ذرات نمک 10^8 اهم سانتی‌متر است [۱۶] که در محدوده مناسب قرار دارد؛ اما ذرات گچ دارای مقاومت الکتریکی 10^{14} اهم سانتی‌متر است [۱۷]. عواملی مانند ترکیب شیمیایی و دما

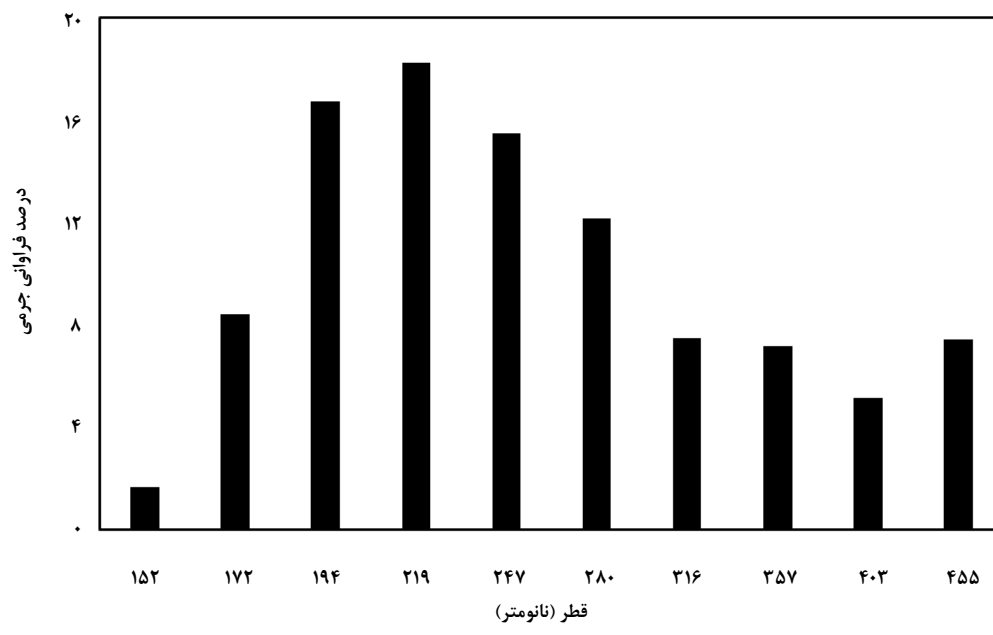
جدول ۶. طراحی آزمایش برای جداسازی ذرات نمک از جریان

هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.

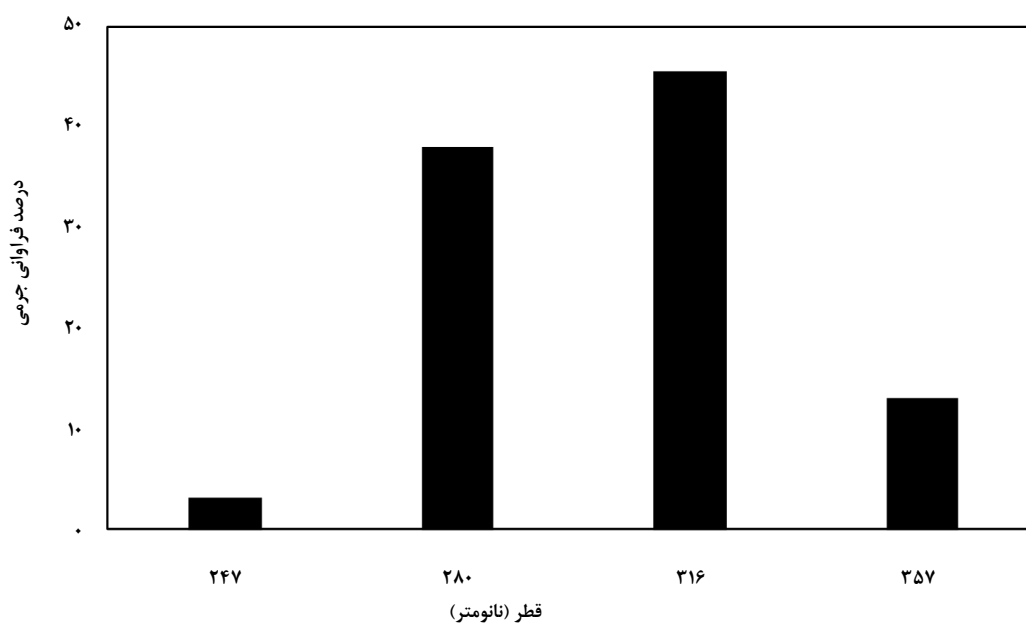
آزمایش	قطر سیم الکتروود تخلیه (mm)	اختلاف پتانسیل (kV)	بازده %
۱	۱/۱	۶	۳۲
۲	۰/۷	۸	۶۹
۳	۱/۱	۱۰	۴۹
۴	۱/۱	۸	۴۱
۵	۰/۹	۶	۳۵
۶	۰/۷	۱۰	۷۸
۷	۰/۹	۸	۴۴
۸	۰/۹	۸	۴۷
۹	۰/۹	۱۰	۵۷
۱۰	۰/۷	۶	۴۰

قرار گرفتند. مقاومت الکتریکی ذرات بر میزان باردار شدن ذرات و سرعت مهاجرت آن‌ها تأثیر دارد؛ پس برای جداسازی مؤثر، مقاومت الکتریکی باید در محدوده مناسب قرار گیرد.

و نم باعث تغییر مقاومت الکتریکی می‌شود. به‌نظر می‌رسد در این پژوهش جذب سطحی نم توسط ذرات گچ باعث کاهش مقاومت الکتریکی آن‌ها شد، در نتیجه در محدوده مناسب جداسازی



شکل ۲. توزیع اندازه ذرات نمک ورودی.



شکل ۳. توزیع اندازه ذرات گچ ورودی.

۳. نتایج

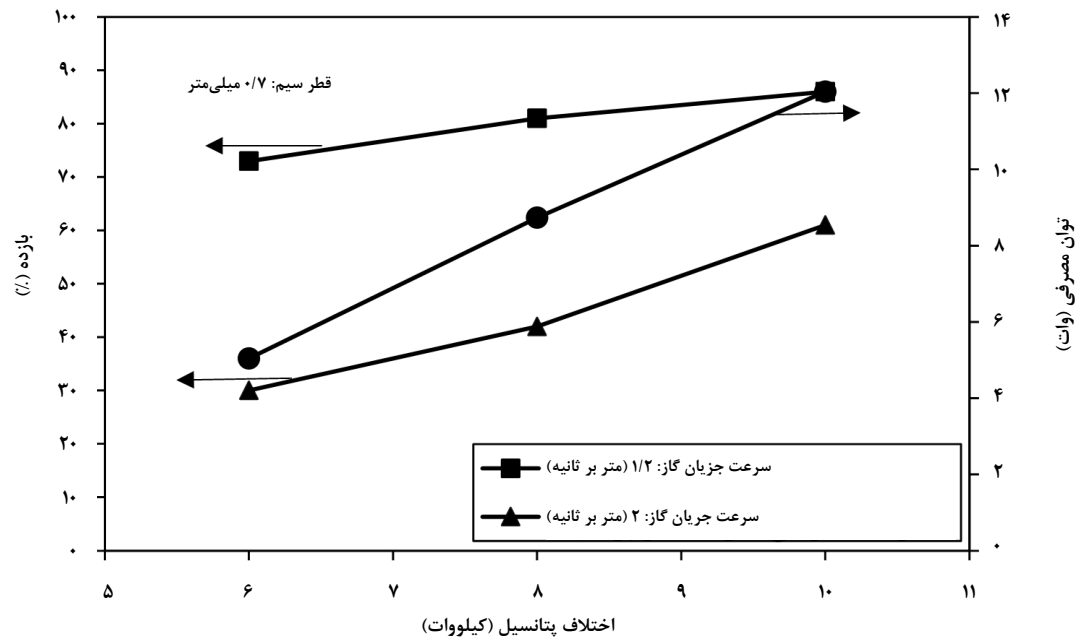
۱-۳ بررسی اثر مؤلفه‌های عملیاتی بر بازده

۱-۱-۳ اختلاف پتانسیل

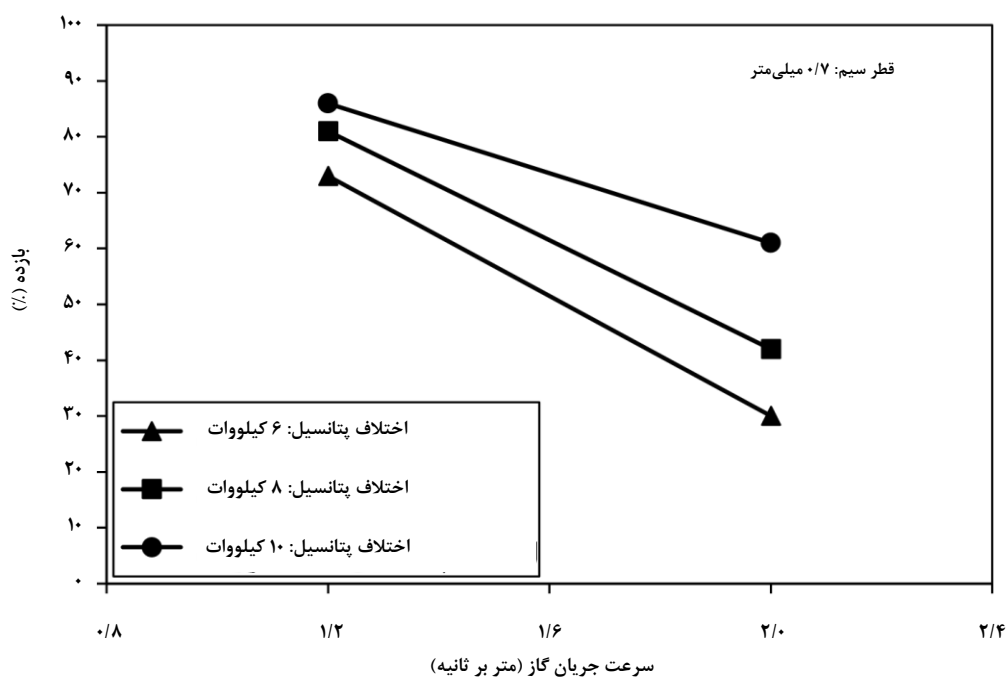
در شکل (۴) بازده جداسازی ذرات گچ و توان مصرفی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با سیم به قطر ۰/۷ میلی‌متر برحسب اختلاف پتانسیل در سرعت‌های متفاوت جریان هوا نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف پتانسیل بازده و توان مصرفی افزایش می‌یابد. برای مثال؛ در جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه، بازده جداسازی از ۷۳ به ۸۶٪ و توان مصرفی از ۵ به ۱۲ وات افزایش می‌یابد. علت این است که با افزایش اختلاف پتانسیل، میدان الکتریکی افزایش می‌یابد، این امر باعث می‌شود که میزان باردار شدن ذره و نیرویی که از طرف میدان بر ذره باردار وارد می‌شود، افزایش یابد و در نتیجه سرعت مهاجرت ذره که تابعی از بار ذره و نیروی الکترواستاتیک وارد بر ذره است زیاد می‌شود و بازده نیز افزایش می‌یابد. رفتاری مشابه برای رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با قطر سیم‌های متفاوت و همین‌طور ذرات نمک مشاهده می‌شود.

۳-۱-۲ سرعت جریان هوا

بازده جداسازی برای ذرات گچ و نمک در سرعت‌های مختلف جریان هوا (۱/۲ و ۲ متر بر ثانیه) و سیم به قطرهای (۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ میلی‌متر) تعیین شد. شکل (۵) بازده جداسازی ذرات گچ را به صورت تابعی از سرعت جریان هوا با سیم به قطر ۰/۷ میلی‌متر نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، بازده جداسازی ذرات گچ کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال؛ با افزایش سرعت جریان هوا از ۱/۲ به ۲ بازده جداسازی از ۷۳ به ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه در این پژوهش قطر و طول لوله ثابت است وقتی دبی هوا افزایش می‌یابد سرعت جریان هوا زیاد می‌شود و زمان اقامت ذرات کاهش می‌یابد و ذرات کمتر تحت تأثیر نیروی الکتریکی قرار می‌گیرند. علاوه بر این با افزایش سرعت جریان هوا آشفتگی افزایش یافته، باعث بازگشت تعدادی از ذرات جذب‌شده به جریان هوا می‌شود. رفتاری مشابه برای رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با قطر سیم‌های متفاوت و همین‌طور ذرات نمک مشاهده می‌شود. اما افت بازده جداسازی ذرات نمک کمتر است.



شکل ۴. اثر اختلاف پتانسیل بر بازده جداسازی ذرات گچ و توان مصرفی رسوب‌دهنده الکترواستاتیک با سیم به قطر ۰/۷ میلی‌متر.



شکل ۵. اثر سرعت جریان گاز بر بازده جداسازی ذرات گچ با سیم به قطر ۰/۷ میلی‌متر.

۳-۱-۳ قطر الکتروود تخلیه

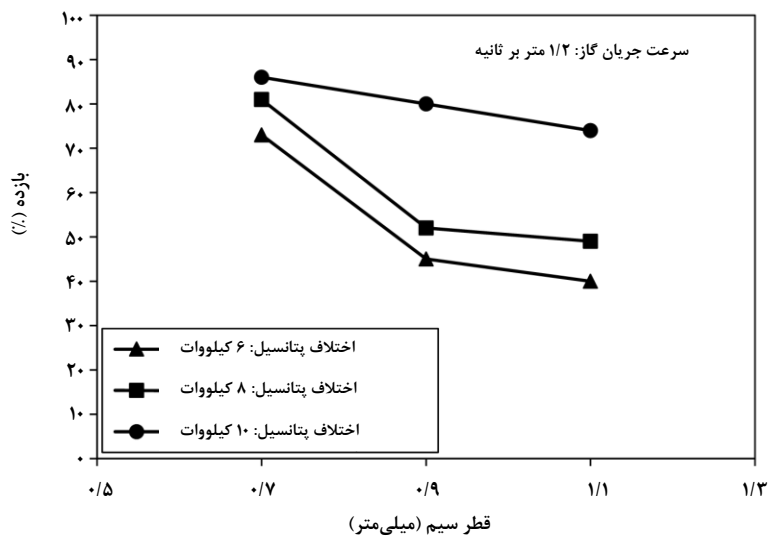
با ثابت نگه‌داشتن سرعت گاز حامل در ۱/۲ و ۲ متر بر ثانیه در اختلاف پتانسیل‌های ۶، ۸ و ۱۰ کیلوولت، بازده در سه قطر الکتروود تخلیه ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ میلی‌متر بررسی شد. اثر قطر الکتروود تخلیه بر بازده جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه در شکل (۶) نمایش داده شده‌است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر الکتروود تخلیه، بازده کاهش می‌یابد. برای مثال؛ در جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه، در اختلاف پتانسیل ۶ کیلوولت با افزایش قطر سیم از ۰/۷ به ۱/۱ میلی‌متر، بازده جداسازی ذرات گچ از ۷۳ به ۴۰٪ کاهش می‌یابد. طبق رابطه زیر میدان الکتریکی و قطر الکتروود تخلیه رابطه معکوس دارد [۱۸]:

$$r \times E_r = \text{Constant} \quad (6)$$

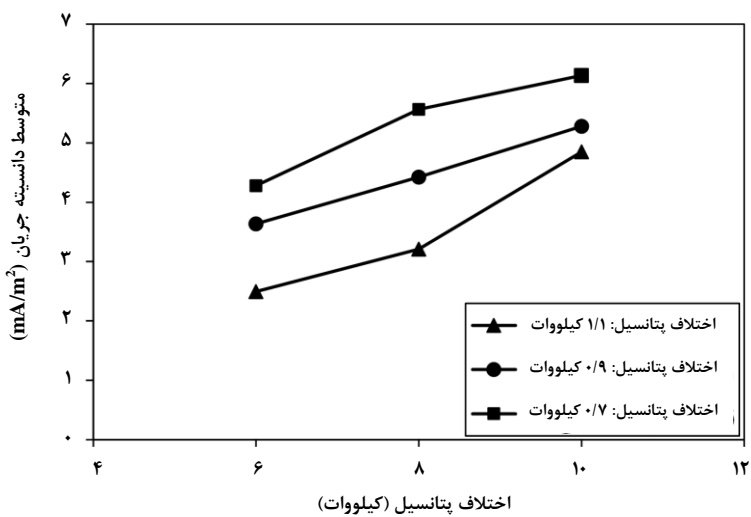
هرچه قطر الکتروود تخلیه کوچک‌تر شود کرونا قوی‌تر و شدت جریان بیشتری برقرار می‌شود. علاوه بر این میدان الکتریکی قوی‌تر می‌شود، الکترون‌های بیشتری آزاد می‌شود که مقدار بار و سرعت مهاجرت ذرات را بالا می‌برد و بازده زیاد می‌شود. رفتاری مشابه برای سرعت‌های متفاوت و همین‌طور ذرات نمک مشاهده می‌شود.

۳-۱-۴ شدت جریان الکتریکی

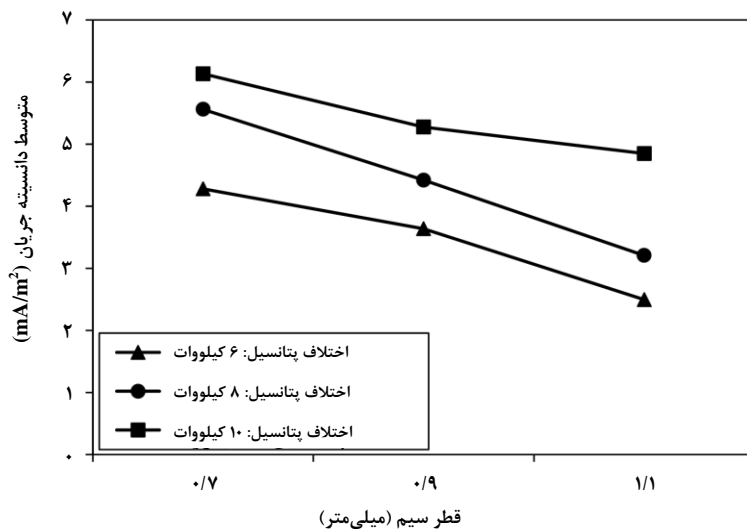
شکل (۷) و (۸) منحنی مشخصه رسوب‌دهنده الکترواستاتیک را برای سه قطر سیم ۰/۷، ۰/۹ و ۱/۱ میلی‌متر در اختلاف پتانسیل‌های ۶، ۸ و ۱۰ کیلوولت را نشان می‌دهد. منحنی مشخصه نشان‌دهنده تغییر متوسط چگالی جریان عبوری برحسب اختلاف پتانسیل و قطر سیم است. متوسط چگالی جریان با رابطه (۲) محاسبه شده است [۱]. با توجه به شکل (۷) برای سیم با قطر مشخص با افزایش اختلاف پتانسیل چگالی جریان افزایش می‌یابد. علاوه بر این با توجه به شکل (۸) در یک اختلاف پتانسیل مشخص با افزایش قطر سیم چگالی جریان کاهش می‌یابد؛ علت این است که حول سیم با قطر کمتر شدت میدان الکتریکی قوی‌تری ایجاد می‌شود؛ بنابراین در اختلاف پتانسیل‌های پایین‌تری شدت میدان لازم برای تشکیل پدیده کرونا ایجاد می‌شود. شدت جریان مؤلفه‌ای است که در عملکرد رسوب‌دهنده الکترواستاتیک نقش کلیدی دارد. البته لازم به ذکر است که شدت جریان مؤلفه مستقلی نیست، بلکه تابع اختلاف پتانسیل است. انتظار می‌رود وقتی اختلاف پتانسیل افزایش می‌یابد یا قطر الکتروود تخلیه کاهش می‌یابد، جریان عبوری زیاد شود.



شکل ۶. اثر قطر الکترود تخلیه بر بازده جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.



شکل ۷. اثر اختلاف پتانسیل بر متوسط چگالی جریان.



شکل ۸. اثر قطر سیم بر متوسط چگالی جریان.

۲-۲ تحلیل آماری روش سطح پاسخ

با وارد کردن پاسخ‌های آزمایشگاهی (بازده جداسازی) به نرم‌افزار و تجزیه و تحلیل آماری، تأثیر عوامل مختلف بر پاسخ سیستم تعیین شد. مدل مناسب منطبق بر داده‌ها ارائه و نمودارهای سطح پاسخ تحلیل شدند. در نهایت شرایط عملکرد بهینه تعیین شد.

۲-۳ نتایج تحلیل واریانس برای جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه

نتایج تحلیل واریانس طراحی مرکب مرکزی به‌دست‌آمده برای جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه توسط رسوب‌دهنده الکترواستاتیک در جدول‌های (۸) و (۹) نشان داده شده‌است. پایین بودن مقدار F^1 یک عامل، نشان‌دهنده تأثیر ناچیز آن بر پاسخ است. مقادیر P^2 احتمال تصادفی به‌دست آمدن مقدار F برای یک عامل را نشان می‌دهد. اگر مقدار P عاملی کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان‌دهنده معنی‌دار بودن آن عامل است و اگر مقدار P

بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد نشان‌دهنده بی‌معنی بودن آن است. مقدار F مدل ۱۷/۹۹ است که نشان می‌دهد مدل معنی‌دار است و به‌خوبی می‌تواند رفتار سیستم را پیش‌بینی کند. مقدار F برای ضعف برازش^۵ برابر ۱۸/۸۴ است که نشان‌دهنده بی‌معنی بودن ضعف برازش و مناسب بودن مدل انتخاب‌شده است. مقدار F مربوط به اختلاف پتانسیل، از قطر الکتروود تخلیه بزرگ‌تر است که نشان می‌دهد در شرایط عملیاتی این پژوهش اثر اختلاف پتانسیل بر پاسخ بیشتر است.

جدول (۸) مقادیر ضرایب همبستگی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تحلیل واریانس مقدار کم ضریب تغییرات %C.V. و اندازه‌های ضریب همبستگی R که نزدیک به یک می‌باشند نشان‌دهنده کفایت مدل است و می‌توان از آن برای بهینه‌سازی استفاده کرد. مقدار ضریب همبستگی اصلاح‌شده ($R^2_{adjusted}$) به ضریب همبستگی R^2 نزدیک است، یعنی الگوی به‌دست‌آمده یک مدل آماری مناسب است.

جدول ۸. نتایج تحلیل واریانس برای جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.

منبع	مجموع مربعات خطا	درجه آزادی	میانگین مجموع مربعات خطا	مقادیر F	مقادیر P
مدل	۲۵۸۶/۹۴	۵	۵۱۷/۳۹	۱۷/۹۹	۰/۰۰۷۶
A- قطر سیم	۹۸۸/۱۷	۱	۹۸۸/۱۷	۳۴/۳۵	۰/۰۰۴۲
B- اختلاف پتانسیل	۱۱۲۰/۶۷	۱	۱۱۲۰/۶۷	۳۸/۹۶	۰/۰۰۳۴
AB	۱۱۰/۲۵	۱	۱۱۰/۲۵	۳/۸۳	۰/۱۲۱۹
A ²	۲۰۱/۱۹	۱	۲۰۱/۱۹	۶/۹۹	۰/۰۵۷۳
B ²	۱۰۷/۴۴	۱	۱۰۷/۴۴	۳/۷۴	۰/۱۲۵۴
باقی‌مانده	۱۱۵/۰۶	۴	۲۸/۷۶		
ضعف برازش	۱۱۳/۰۶	۳	۳۷/۶۹	۱۸/۸۴	۰/۱۶۷۴
خطا	۲/۰۰	۱	۲/۰۰		

1. F-Value
4. Not Significant

2. P-Value
5. Lack of Fit

3. Significant

جدول ۹. اندازه‌های ضرایب همبستگی برای جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.

% C.V.	R ² _{adjusted}	R ² _{Predicted}	R ²
۸/۵۱	۰/۹۰۴۲	۰/۵۹۷۷	۰/۹۵۷۴

ذرات گچ با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه

$$\eta = -52.28 + 49.16D + 16.1V - 11.87D \times V \quad (۸)$$

ذرات نمک با سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه

$$\eta = 46.61 - 54.16D + 6.41V \quad (۹)$$

ذرات نمک با سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه

$$\eta = 52.4 - 66.66D + 6.25V \quad (۱۰)$$

که D قطر سیم و V اختلاف پتانسیل است.

۴. نتایج بهینه‌سازی

شرایط عملیاتی بهینه برای بیشینه بازده جداسازی توسط نرم‌افزار تعیین شد. این شرایط در جدول (۱۰) ارائه شده است. برای تأیید درستی نتیجه بهینه‌سازی، بازده جداسازی در این شرایط به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد. آزمایش سه‌بار تکرار و میانگین نتایج آن‌ها در جدول مذکور ارائه شده است. نتیجه به دست آمده مؤید صحت بهینه‌سازی است.

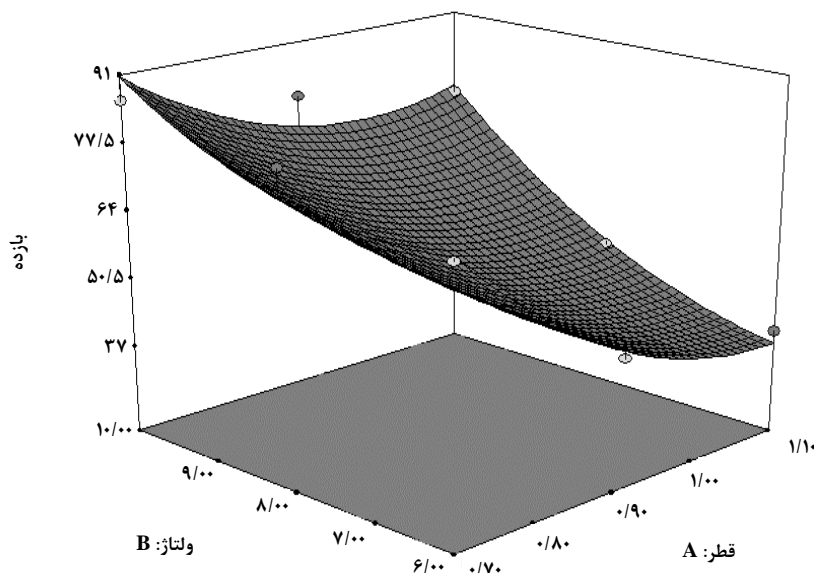
اثر هم‌زمان اختلاف پتانسیل و قطر سیم بر بازده جداسازی ذرات گچ در شکل (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش اختلاف پتانسیل و کاهش قطر سیم، بازده جداسازی ذرات از جریان هوا افزایش می‌یابد.

نتایج تحلیل واریانس برای ذرات گچ در سرعت هوای ۲ متر بر ثانیه و ذرات نمک در سرعت‌های هوای ۱/۲ و ۲ متر بر ثانیه هم مؤید مدل‌های معناداری برای بازده است. مدل‌های ارائه شده (سطوح با مقادیر واقعی) با طراحی مرکب مرکزی برای محاسبه بازده ذرات با روابط (۷) تا (۱۰) داده شده‌اند.

ذرات گچ با سرعت هوای ۱/۲ متر بر ثانیه

$$\eta = 447.54 - 587.02D - 32.12V + 13.12D \times V + 232.14D^2 + 1.69V^2$$

(۷)



شکل ۹. تأثیر هم‌زمان دو مؤلفه اختلاف پتانسیل و قطر سیم بر بازده جداسازی ذرات گچ از جریان هوا با سرعت ۱/۲ متر بر ثانیه.

جدول ۱۰. نتایج بهینه‌سازی برای جداسازی ذرات.

نوع ذره	سرعت گاز (m/s)	قطر الکتروود تخلیه (mm)	اختلاف پتانسیل (kV)	بازده بهینه‌نرم افزار	بازده آزمایشگاهی
گچ	۱/۲	۰/۷	۹/۸۳	۸۸/۸	۸۶
گچ	۲	۰/۷	۱۰	۶۰	۵۸
نمک	۱/۲	۰/۷	۱۰	۷۲/۸	۶۹
نمک	۲	۰/۷	۱۰	۶۸	۶۶

تجزیه و تحلیل آماری به روش سطح پاسخ، تأثیر عوامل مختلف بر پاسخ سیستم تعیین شد. مدل مناسب منطبق بر داده‌ها ارائه شدند؛ در نهایت شرایط عملکرد بهینه تعیین شدند.

مراجع

- [1] Cooper, C. D., Alley, F. C., "Air pollution control: a design approach", Waveland Press, (2011).
- [2] Chang, C. -L., Bai, H., "Effects of Some Geometric Parameters on the Electrostatic Precipitator Efficiency at Different Operation Indexes", Aerosol Sci Technol, Vol. 33, (3), pp. 228-238, (2000).
- [3] Jędrusik, M., Gajewski, J. B., Świerczok, A. J., "Effect of the particle diameter and corona electrode geometry on the particle migration velocity in electrostatic precipitators", Journal of Electrostatics, Vol. 51-52, pp. 245-251, (2001).
- [4] Nóbrega, S. W., Falaguasta, M. C. R., Coury, J. R., "A study of a wire-plate electrostatic precipitator operating in the removal of polydispersed particles", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 21, pp. 275-284, (2004).
- [5] Jędrusik, M., Świerczok, A., "The influence of fly ash physical and chemical properties on electrostatic precipitation process", Journal of Electrostatics, Vol. 67, (2), pp. 105-109, (2009).
- [6] Zhu, J., Zhang, X., Chen, W., Shi, Y., Yan, K., "Electrostatic precipitation of fine particles with a bipolar pre-charger", Journal of Electrostatics, Vol. 68, (2), pp. 174-178, (2010).
- [7] Blejan, O., Notingher, P., Dumitran, L. M., Younes, M., Samuila, A., Dascalescu, L., editors. "Experimental Study of the Corona Discharge in a Modified Coaxial Wire-Cylinder Electrostatic Precipitator", 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting, 23-27 sep. (2007).

۵. نتیجه‌گیری کلی

اثر مؤلفه‌های عملیاتی - اختلاف پتانسیل، سرعت جریان هوا، شدت جریان و قطر الکتروود تخلیه - بر جداسازی ذرات گچ و نمک از جریان هوا توسط رسوب‌دهنده الکترواستاتیک به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج کلی حاصل از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- به دلیل بزرگتر بودن اندازه متوسط ذرات گچ، بازده جداسازی ذرات گچ از ذرات نمک بیشتر است.
- با افزایش اختلاف پتانسیل، به دلیل افزایش سرعت مهاجرت ذرات در اثر افزایش قدرت میدان الکتریکی و بار ذرات، بازده افزایش می‌یابد.
- با افزایش سرعت جریان گاز، به دلیل کاهش زمان ماند و افزایش آشفتگی جریان سیال، بازده جداسازی کاهش می‌یابد. افت بازده جداسازی ذرات نمک کمتر از مقدار مربوط به ذرات گچ است.
- با افزایش قطر الکتروود تخلیه، بازده کاهش می‌یابد.
- برای سیم با قطر مشخص با افزایش اختلاف پتانسیل چگالی جریان افزایش می‌یابد.
- در یک اختلاف پتانسیل مشخص با افزایش قطر سیم چگالی جریان کاهش می‌یابد.
- با افزایش اختلاف پتانسیل در قطر مشخص، توان مصرفی افزایش می‌یابد.
- با استفاده از پاسخ‌های آزمایشگاهی بازده جداسازی و

- [8] Thonglek, N., Dechthummarong, C., Kiatsiriroat, T., "Soot Treatment by Using High Voltage Pulse Energized Electrostatic Precipitator", *Energy Procedia*, Vol. 9, pp. 292-298, (2011).
- [9] Niewulis, A., Podlinski, J., Shapoval, V., Mizeraczyk, J., "Collection efficiency in narrow electrostatic precipitators with a longitudinal or transverse wire electrode", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 18, (5), pp. 1423-1428, (2011).
- [10] Al-Shujairi, S. O., "Comparing electrostatic precipitator performance of two-stage with single-stage to remove dust from air stream", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 4, (2), (2013).
- [11] Xiao, G., Wang, X., Yang, G., Ni, M., Gao, X., Cen, K., "An experimental investigation of electrostatic precipitation in a wire-cylinder configuration at high temperatures", *Powder Technol*, Vol. 269, pp. 166-177, (2015).
- [12] Adabara, I., Hassan, A. S., "Design and implementation of an electrostatic precipitator and its cleaning system for small scale combustion", *Indo-Iranian Journal of Scientific Research*, Vol. 1, (1), pp. 213-224, (2017).
- [13] Poškas, R., Sirvydas, A., Poškas, P., Striūgas, N., Pedišius, N., Valinčius, V., "Investigation of the biofuel flue and producer gases cleaning efficiency using ESP", *E3S Web Conf*, Vol. 22, 00138, (2017).
- [14] Wen, T. -Y., Xue, Q. -Z., "Capturing heavy loading microparticles using electrostatic precipitator with square-wave collecting electrode", *Powder Technol*, Vol. 361, pp. 520-528, (2020)
- [15] Colls, J., "Air pollution", 2nd. ed., CRC Press, (2002).
- [16] Zhuang, Y., Jin Kim, Y., Gyu Lee, T., Biswas, P., "Experimental and theoretical studies of ultra-fine particle behavior in electrostatic precipitators", *Journal of Electrostatics*, Vol. 48, (3), pp. 245-260, (2000).
- [17] Louie, O., Massoudi, A. H., Ejtehadi, M. M., Sajjadifar, S., Mirghani, M., Alavi, S. J., "Characterization of the gypsum composite for electrical conductivity", *American Journal of Chemistry*, Vol. 2, (5), pp. 245-247, (2012).
- [18] Talaie, M. R., Taheri, M., Fathikaljahi, J., "A new method to evaluate the voltage-current characteristics applicable for a single-stage electrostatic precipitator", *Journal of Electrostatics*, Vol. 53, (3), pp. 221-233, (2001).