

مدلسازی سه بعدی ته نشین کننده الکتروستاتیکی نوع استوانه‌ای به منظور جمع آوری ذرات ریز دیزل و کنترل آلودگی هوا

محمد غلامی^۱ و حنیف کازرونی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۲۹	<p>با توجه به ماهیت سرطان‌زای ذرات دیزل، این ذرات سلامت انسان‌ها را به شدت تهدید خواهد کرد. به منظور پاسخگویی به این چالش، توجه محققان و نهادهای دولتی در سراسر جهان معطوف به دستیابی به یک تکنولوژی اقتصادی و ایمن جهت کنترل این ذرات شده است. با توجه به اینکه ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی یکی از مهم‌ترین فن‌آوری‌های درمان‌کننده محسوب می‌شوند، در این مقاله به مدلسازی ریاضی یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای و پیش‌بینی راندمان جمع‌آوری ذرات رسانای دیزل در شرایط مختلف آن پرداخته می‌شود. این ته‌نشین‌کننده شامل یک سیلندر زمین‌شده به سطح مقطع دایره‌ای شکل و یک الکتروود تحریک‌شده با ولتاژ جریان مستقیم منفی می‌باشد که در مرکز این سیلندر نصب شده است. با استفاده از پاسخ تحلیلی معادلات پواسون و پایستگی جریان، چگالی بار فضایی یونی، توزیع پتانسیل الکتریکی و نیروهای حجمی الکتریکی در کانال ته‌نشین‌کننده محاسبه خواهد شد. هم‌چنین، در این مقاله از نرم‌افزار کامسول جهت مدلسازی سه بعدی ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای و حل معادلات شارش هوای آشفته با لحاظ نیروی حجمی الکتریکی استفاده می‌شود. معادلات باردارشدن و حرکت ذرات با استفاده از رابط فیزیک مسیریابی ذرات برای شارش سیال در نرم‌افزار کامسول پیاده‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی مورد تحلیل قرار گرفته است.</p>
پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷	
<p>واژگان کلیدی: موتورهای دیزلی، ذرات دیزل، ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی، رسوب‌دهنده الکتروستاتیکی، کنترل آلودگی هوا.</p>	

۱- مقدمه

دارد. به دلیل مقرون به صرفه بودن و توانایی جمع‌آوری نانو ذرات، ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی بطور گسترده برای کنترل ذرات در کاربردهای صنعتی بکار گرفته شده‌اند. راندمان بالاتر جمع‌آوری ذرات، افت فشار پایین، مصرف انرژی پایین و کارکرد در طیف گسترده‌ای از دمای گاز باعث شده است که ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی دستگاه قابل اطمینانی در زمینه کنترل ذرات باشند [۱].

اصل اساسی عملکرد یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی به این صورت است که ذراتی که به همراه گاز منتقل می‌شوند، از یک میدان الکتریکی عبور می‌کنند. این میدان با اعمال

جمع‌آوری ذرات خروجی از دیزل ژنراتور که به طور معمول کوچکتر از ۱ میکرومتر هستند، مورد توجه بسیاری از محققان به عنوان یک دغدغه بزرگ در دهه‌های اخیر قرار گرفته است. این ذرات بسیار ریز خیلی سمی و مضر برای دستگاه تنفسی انسان‌ها بوده و یکی از دلایل اصلی آلودگی در نواحی شهری هستند. با توجه به قوانین سخت‌گیرانه مربوط به کنترل آلودگی هوا، به منظور ارزیابی فرآیند جمع‌آوری ذرات و ارائه طرح‌های بهبودیافته برای کاربردهای صنعتی نیاز به بررسی با جزئیات بیشتر وجود

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hanif.kazerooni@gmail.com

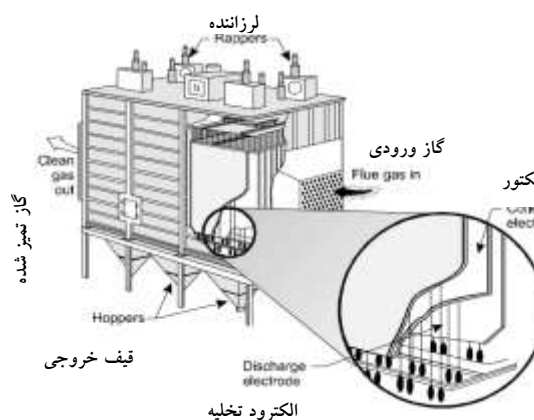
۱. پژوهشگر، گروه علوم و فناوری‌های دفاعی، پژوهشکده فناوری‌های دفاعی و پدافند غیرعامل، دانشگاه عالی دفاع ملی
۲. استادیار، گروه علوم و فناوری‌های دفاعی، پژوهشکده فناوری‌های دفاعی و پدافند غیرعامل، دانشگاه عالی دفاع ملی

لوله‌ای مرطوب در حذف ذرات دیزل انجام شده است. در این نوع ته‌نشین‌کننده، ذرات باردار روی صفحات کلکتور مرطوب جمع‌آوری شده و به طور پیوسته آب‌پاشی می‌شوند. این روش در جمع‌آوری ذرات بسیار ریز در مقایسه با ته‌نشین‌کننده نوع خشک عملکرد بسیار بهتری داشته است.

شارش الکترویهیدرودینامیکی ایجاد شده در ته‌نشین‌کننده استوانه‌ای بوسیله نیروهای حجمی الکتریکی نیز مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در مرجع [۵]، اشاره شده است که انحراف الکتروود تخلیه نسبت به مرکز استوانه یک پارامتر بسیار مهم بوده و منجر به تغییر عظیم شارش می‌شود. آن‌ها اثبات کرده‌اند که آرایش متقارن سیم و استوانه منجر به تولید شارش ثانویه الکترویهیدرودینامیکی در سطح مقطع دایره‌ای شکل نخواهد شد.

در مرجع [۶]، اثرات دمای گاز و افزودن یک فیلتر ذرات دیزل بر جمع‌آوری نانوذرات دیزل در ته‌نشین‌کننده بررسی شده است. کیم و همکاران، حذف ذرات زیرمیکرون یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی همراه با یک فیلتر فلزی برای موتورهای دیزلی و همچنین جمع‌آوری نانوذره یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی دو مرحله‌ای جدید را با استفاده از ذرات پتاسیم کلرید بررسی کردند [۷]. در مراجع [۸، ۹] به ترتیب یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی یاری شده با جریان الکترویهیدرودینامیکی و یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی سوراخ‌دار پیشنهاد شدند. آنها راندمان جمع‌آوری نانو ذرات ساطع شده از موتورهای دیزلی با سوخت نفت سبک را اندازه‌گیری کردند. همچنین، کارایی جمع‌آوری نانوذرات برای گازهای خروجی از یک موتور دیزلی با مازوت در مرجع [۱۰] بررسی شده است. در مرجع [۱۱]، یک آزمایش با استفاده از گازهای خروجی از یک موتور دیزل، با سوخت‌های نفت سبک و مازوت، برای آشکارسازی ویژگی‌های جمع‌آوری نانوذرات در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی انجام شده است. با این وجود اکثر مطالعاتی که در کارهای گذشته انجام شده است را می‌توان به دو گروه کلی تقسیم‌بندی کرد. دسته اول کارهایی هستند که مبتنی بر کارهای آزمایشگاهی و تجربی با هزینه‌های بالای اقتصادی و زمانی می‌باشند. دسته دوم کارهایی هستند که در آن‌ها از مدلسازی عددی دوبعدی

ولتاژ به الکتروود تخلیه و زمین شدن صفحات کلکتور در ناحیه بین الکتروودی تشکیل می‌گردد. در یونیزاسیون منفی (اعمال ولتاژ منفی به الکتروود تخلیه)، به دلیل ایجاد تخلیه الکتریکی در مجاورت الکتروود تخلیه، الکترون‌های آزاد تولید شده و بواسطه نیروی الکتریکی به سمت صفحات کلکتور حرکت می‌کنند. در این مسیر به دلیل داشتن شتاب بالا به مولکول‌های گاز برخورد کرده و بر اساس فرآیندی که از آن به عنوان تکثیر بهمینی یاد می‌شود، تعدادی زیادی از الکترون‌های آزاد در مجاورت الکتروود تخلیه بوجود می‌آید. با دور شدن این الکترون‌ها از الکتروود تخلیه، شتاب آن‌ها کاسته شده و در برخورد با مولکول‌های گاز در فضای بین الکتروودی منجر به تولید یون‌های گازی منفی می‌شوند. این یون‌های گازی با ذرات ریز برخورد کرده و ذرات را از طریق دو روش باردار کردن میدانی^۱ و باردار کردن انتشاری^۲ ناشی از حرکت براونی گازها، باردار می‌کنند. در ادامه ذرات ریز، به عنوان یک ذره باردار در طول میدان الکتریکی منحرف می‌شوند تا به الکتروودهای کلکتور یا دریافت‌کننده منتقل شوند و روی آنها جمع‌آوری شوند [۲]. در شکل (۱)، یک ته‌نشین‌کننده نوع صفحه‌ای-سیمی نشان داده شده است.



شکل ۱- ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی صفحه‌ای-سیمی

ته‌نشین‌کننده‌ها از دیدگاه شکل کلکتور به دو دسته ته‌نشین‌کننده‌های صفحه‌ای و استوانه‌ای (سیلندری) تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع استوانه‌ای این تجهیز، جایی که یک سیم نازک در مرکز استوانه به عنوان الکتروود تخلیه بکار گرفته شده و ولتاژ تحریک بالا به آن اعمال شده است، توسط برخی از محققان برای جمع‌آوری ذرات بسیار ریز دیزل پیشنهاد شده است [۳-۱۱]. در مراجع [۳-۴] آزمایش‌هایی به منظور بررسی عملکرد ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی

² Diffusion Charging

¹ Field Charging

ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای-سیمی متقارن و مقایسه آن با پاسخ عددی بدست‌آمده از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار کامسول.

(۲) مدل‌سازی سه‌بعدی ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار کامسول و بررسی فاکتورهای مختلف نظیر، شارش الکتروهایدرودینامیکی، طول کانال، سرعت سیال و ولتاژ تحریک بر عملکرد آن.

۲- توصیف مدل

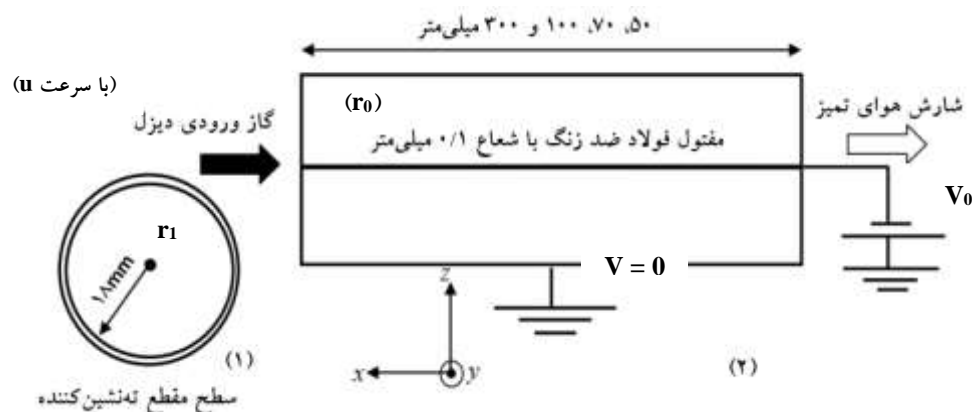
در شکل (۲) مشخصات ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی نوع استوانه‌ای در ابعاد آزمایشگاهی که در مرجع [۱] مورد بررسی قرار گرفته، نشان داده شده است. این ته‌نشین‌کننده به منظور جمع‌آوری ذرات در گاز خروجی یک ژنراتور دیزلی SGD3000S-III با نام Fuji Heavy Industries Ltd. و بیشینه قدرت خروجی ۳ کیلووات مورد آزمایش قرار گرفته است. الکتروود تخلیه مفتولی شکل از جنس فولاد ضد زنگ با شعاعی برابر ۰/۱ میلی‌متر بوده و برای تولید تخلیه کرونا توسط ولتاژ جریان مستقیم منفی با دامنه بالا برقرار می‌شود. هم‌چنین از یک سیلندر با شعاع ۱۸ میلی‌متر و جنس فولاد ضد زنگ به عنوان کلکتور استفاده شده که طول متغیری در بازه ۵۰ الی ۳۰۰ میلی‌متر دارد. گاز خروجی فرآیند با سرعت اولیه در بازه ۰/۶ الی ۱/۵ متر بر ثانیه و غلظت ۲۰ میلی‌گرم بر متر مکعب از کانال ته‌نشین‌کننده عبور می‌کند. ژنراتور دیزلی در حالت بار زیاد (۲/۶ کیلووات) مورد آزمایش قرار گرفته است. اندازه ذرات معلق دیزل به طور معمول در گستره ۱۰ الی ۱۰۰۰ نانومتر بوده و چگالی تقریباً ثابتی بین ۱۰۰۰ الی ۱۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب دارند.

استفاده شده است. در این مقالات نیز با توجه به تفاوت‌های هندسی مدل دوبعدی با تجهیز واقعی ممکن است نتایج بدست آمده قابل اتکا نباشد.

در راستای پاسخگویی به چالش‌های مذکور و مدل‌سازی سه‌بعدی ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی، در این مقاله ابتدا مدل کرونا (معادلات پواسون و پیوستگی جریان) به همراه پاسخ تحلیلی آن، مدل اولر برای دینامیک شارش هوای آشفته و مدل لاگرانژ برای دینامیک ذرات ارائه می‌گردد. در ادامه، با توجه به عدم وجود پاسخ تحلیلی برای مدل اولر و لاگرانژ، از مدل‌های مذکور و رابط‌های مختلف نرم‌افزار کامسول بهره برده می‌شود تا ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای به روش اجزاء محدود مدل‌سازی عددی سه‌بعدی گردد. نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی بدست‌آمده برای چگالی بار فضایی یونی، توزیع پتانسیل الکتریکی و میدان الکتریکی در کانال ته‌نشین‌کننده (پاسخ معادلات پواسون و پایستگی جریان) با یکدیگر مقایسه می‌شوند. هم‌چنین، با در نظر گرفتن انحراف کوچک الکتروود تخلیه نسبت به مرکز سطح مقطع سیلندر، الگوهای شارش الکتروهایدرودینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند. به علاوه، نرخ ته‌نشینی ذرات و نسبت بار الکتریکی به جرم ذرات در طول کانال و هم‌چنین راندمان جمع‌آوری ذرات در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی به ازای اندازه‌های مختلف ذرات محاسبه و مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در انتها، اثر سرعت گاز ورودی به کانال، ولتاژ تحریک و طول کانال ته‌نشین‌کننده بر سرعت جابجایی ذرات به سمت کلکتور و عملکرد ته‌نشین‌کننده ارزیابی می‌شوند.

نوآوری‌های ارائه‌شده در این مقاله به شرح زیر هستند:

(۱) تبیین پاسخ تحلیلی برای بخش الکتریکی



شکل ۲- دیاگرام شماتیک کانال ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای با الکتروود سیمی، (۱) نمای سطح مقطع، (۲) نمای جانبی

۳-مدلسازی ریاضی

پدیده‌هایی که در فرآیند ته‌نشینی اتفاق می‌افتند، به دلیل وجود همزمان شارش سیال، میدان الکتریکی و حرکت ذرات بسیار پیچیده هستند. سه میدان مذکور و پیوند متقابل بین آن‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است. خطوط پیوسته و خط چین به ترتیب نشان از پیوند قوی و ضعیف بین دو میدان هستند. مدلسازی ریاضی برای شبیه‌سازی ته‌نشین کننده باید شامل تخلیه کرونا، شارش گاز و سیال اصلی، بردار شدن ذرات و جابجایی ذرات باشند. با اعمال ولتاژ به اندازه کافی قوی به الکتروود تخلیه با شعاع انحنای کوچک درحالی که کلکتور زمین شده است، یک کرونا می‌تواند در طول سیم الکتروود و انحراف یون‌ها به سمت صفحات کلکتور اتفاق می‌افتد.

۳-۱-مدل کرونا

در این شبیه‌سازی از مدل ساده شده کرونا که بر پایه پایستگی جریان انتقال یافته توسط ذرات بردار است، استفاده شده است. مدل ساده شده کرونا به حل کردن انتقال یک حامل بار با استفاده از معادله پایستگی بار کوپل شده با معادله پواسون می‌پردازد. انتقال حامل‌های بار شامل حرکت در میدان الکتریکی و جریان همرفتی است. معادلات حوزه شامل روابط زیر می‌شود:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \rho_q (\mu \mathbf{E} + \mathbf{u}) - D \nabla \rho_q \quad (2)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_q}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_q}{\epsilon_0} \quad (4)$$

در روابط فوق، \mathbf{J} چگالی سطحی جریان بر حسب A/m^2 ، μ

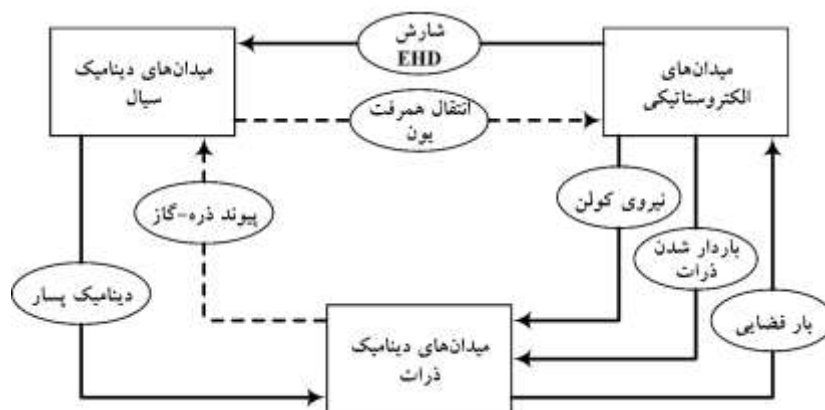
تحرك پذیری بر حسب $m^2/(V \cdot s)$ ، ρ_q چگالی بار فضایی بر حسب C/m^3 ، E میدان الکتریکی، u سرعت سیال بر حسب متر بر ثانیه، D ضریب انتشار یونی بر حسب m^2/s ، V پتانسیل الکتریکی و ϵ_0 ضریب گذردهی خلا هستند. سه مؤلفه چگالی جریان سطحی در سمت راست تساوی معادله (۲) به ترتیب، جریان‌های رانشی (ناشی از حرکت ذرات بردار بوسیله میدان الکتریکی)، همرفتی (ناشی از حرکت ذرات بردار بوسیله سیال اصلی) و انتشار (ناشی از انتشار حامل‌های بار و در نتیجه تغییر تراکم و غلظت حامل‌ها) می‌باشند. با توجه به اینکه سرعت رانشی یون‌ها معمولاً در حدود ۲ مرتبه از دیدگاه اندازه (10^2) سریعتر از سرعت معمول شارش گاز می‌باشد، می‌توان از مؤلفه همرفتی چگالی جریان یونی صرف نظر کرد. در نتیجه محاسبات میدان الکتریکی را می‌توان مستقل از میدان شارش سیال انجام داد. بنابراین، در شرایط ماندگار، چگالی جریان باید معادله پایستگی بار را ارضا کند:

$$\nabla \cdot (\mu \rho_q \mathbf{E} - D \nabla \rho_q) = 0 \quad (5)$$

بنابراین با ترکیب روابط فوق رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\mu \left(\frac{\rho_q^2}{\epsilon_0} - \nabla V \cdot \nabla \rho_q \right) - D \nabla^2 \rho_q = 0 \quad (6)$$

در رابطه فوق فرض شده است که تحرک پذیری ثابت است. با توجه به روابط تحلیلی دقیق ارائه شده در مرجع [۱۲]، برای حل معادلات پایستگی جریان و پواسون در یک ته‌نشینی کننده نوع سیلندری با محورهای منطبق سیلندر و الکتروود تخلیه، پتانسیل الکتریکی، میدان الکتریکی، توزیع چگالی بار یونی در طول کانال ته‌نشین کننده به ازای ولتاژهای مختلف اعمال شده به الکتروود تخلیه با استفاده از



شکل ۳- عکس‌العمل‌ها و ارتباطات متقابل بین میدان‌های ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی

ذرات در ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی، تعیین مشخصه‌های شارش میدان سیال است. با توجه به افت فشار پایین ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی، گاز محیط به صورت سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده که نتیجه آن ثابت بودن ویسکوزیته و چگالی می‌باشد. هم‌چنین شارش سیال پایدار بوده و آشفتگی آن با مدل $k-\varepsilon$ [۱۳] در نظر گرفته شده است. با مفروضات انجام شده، شارش هوا می‌بایست از معادلات پیوستگی و ناویر-استوکس را ارضا کند:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (12)$$

$$\rho_f \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{E} \quad (13)$$

که در آن ρ_f چگالی سیال بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب، P فشار بر حسب پاسکال، μ ویسکوزیته گاز بر حسب کیلوگرم بر متر ثانیه، \mathbf{u} سرعت سیال بر حسب متر بر ثانیه و $\rho \mathbf{E}$ نشان‌دهنده نیروی حجم یا بدنه خارجی بر مولکول‌های گاز بر مبنای واحد حجم می‌باشد. در ته‌نشین‌کننده، این نیروی کولن بوده که باعث ایجاد شارش ثانویه الکتروهایدرودینامیکی (باد یونی) توسط کرونا می‌باشد. برای میدان‌های شارش لامینار، این معادلات پایه بدست‌آمده برای پایستگی جرم و مومنتوم کافی بوده و معادلاتی که در ادامه بیان می‌شود، صرفاً برای میدان شارش آشفتگی می‌باشد. در صورتی که مدلسازی آشفتگی در معادلات شارش سیال ضروری باشد، روند مدلسازی شامل محاسبه عدد رینالدز می‌باشد [۱].

۳-۳- رویکرد لاگرانژ برای فاز پراکندگی (ذرات)

در مسائل ته‌نشین‌کننده‌های الکتروستاتیکی که سیال ورودی به‌مراه ذرات موجود در آن تشکیل یک محیط دوفازه را می‌دهند، مدل اولر برای توصیف رفتار گاز (فاز پیوستگی) و فاز ذرات (فاز پراکندگی) بر مبنای رویکرد لاگرانژ شبیه‌سازی می‌شوند. در روش لاگرانژ، مسیر تعداد زیادی از ذرات منحصر به فرد (از دیدگاه قطر) با استفاده از حرکت آن‌ها تحت شارش سیال و نیروهای الکتروستاتیکی تحت نظر قرار می‌گیرند. موقعیت‌های ذرات با استفاده از حل معادلات مرتبه دوم حرکت برای مؤلفه‌های بردار موقعیت ذرات که از قانون دوم نیوتون تبعیت می‌کنند، بدست می‌آید:

$$\frac{d\mathbf{q}}{dt} = \mathbf{v} \quad (14)$$

روابط زیر تعیین می‌گردد. در این روابط، ناحیه‌ی استوانه‌ای شکل بین دو شعاع I_0 (شعاع الکتروود تخلیه) و I_1 (شعاع سیلندر) در نظر گرفته شده است.

پتانسیل الکتریکی (V):

$$V(r) = V_0 - \alpha (\sqrt{r^2 + \beta^2} - r_0^2 - \beta + \dots) \\ - \frac{r (\sqrt{\beta^2 - r_0^2} + \beta)}{r_1 (\sqrt{\beta^2 - r_0^2} + \sqrt{r^2 + \beta^2 - r_0^2})} \quad (7)$$

که در آن:

$$\alpha = \sqrt{\frac{r_0 E_p \rho_0}{\varepsilon_0}}, \quad \beta = \alpha \frac{\varepsilon_0}{\rho_0} \quad (8)$$

میدان الکتریکی (E):

$$E(r) = \frac{\alpha}{r} \sqrt{r^2 + \beta^2 - r_0^2} \quad (9)$$

چگالی بار فضایی یونی (ρ_q):

$$\rho_q(r) = \frac{\alpha \varepsilon_0}{\sqrt{r^2 + \beta^2 - r_0^2}} \quad (10)$$

در روابط فوق V_0 ولتاژ اعمال شده به الکتروود تخلیه بوده و مقدار آن بسته به شرایط مسئله مشخص است. ρ_0 چگالی بار فضایی یونی در سطح الکتروود تخلیه است که با قرار دادن $r = r_1$ و $V(r_1) = 0$ در معادله (۷) محاسبه می‌شود. هم‌چنین، E_p میدان الکتریکی در سطح الکتروود تخلیه است که مقدار آن برابر آستانه قدرت میدان الکتریکی برای شروع کرونا در هوا بوده و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است (قانون پیک).

$$E_p = 3 \times 10^6 \delta \left(1 + \frac{0.03}{\sqrt{\delta r_0}} \right) \quad (11)$$

که δ نسبت چگالی تعداد گاز به چگالی گاز در دمای ۷۶۰ درجه کلوین و فشار $toit$ ۷۶۰ است.

لازم به ذکر است، پاسخ تحلیلی ارائه شده برای کمیت‌های مختلف یک بعدی بوده و تنها تابع شعاع استوانه است. در صورتی که محورهای استوانه و الکتروود تخلیه بر هم منطبق نباشند، پاسخ فوق معتبر نبوده و باید از حل عددی و سه‌بعدی معادلات مشتق جزئی پواسون و پیوستگی جبران بهره برد.

۳-۲- روش اولر برای فاز پیوسته (شارش هوا)

ابتدایی‌ترین و شاید مهم‌ترین قدم در مطالعه ته‌نشینی

$$R_d = \frac{v_e - v_s}{\exp(v_e - v_s) - 1} \quad (21)$$

$$v_e = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_p k_B T_i} \quad (22)$$

$$v_s = 3\omega_e \frac{\epsilon_{r,p}}{\epsilon_{r,p} + 2} \quad (23)$$

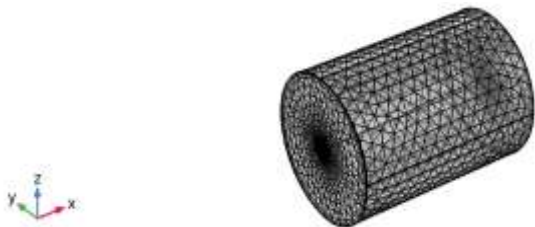
$$\omega_e = \frac{er_p |E|}{k_B T_i} \quad (24)$$

در این معادلات، $\epsilon_{r,p}$ گذردهی نسبی ذرات است. همچنین f_a تابعی است که برای پیوند نرخ‌های شارژ میدانی و انتشار به کار می‌رود و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f_a = \begin{cases} \frac{1}{(\omega_e + 0.475)^{0.575}} & (\omega_e \geq 0.525) \\ 1 & (\omega_e < 0.525) \end{cases} \quad (25)$$

۴- نتایج شبیه‌سازی و تحلیل آن‌ها

مطابق شکل (۴)، ناحیه محاسباتی ارائه شده در بخش ۲ (شکل (۲)) با استفاده از نرم‌افزار COMSOL مش‌بندی شده و به بخش‌های کوچک‌تری شبکه‌بندی می‌شوند.



شکل ۴- مش‌بندی مدل ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی استوانه‌ای با الکتروود تخلیه سیمی صاف

با توجه به اینکه مش‌بندی مناسب برای دستیابی به دقت نتایج مناسب ضروری می‌باشد، به عنوان مثال مدل ته‌نشین کننده با طول کانال ۵۰ میلی‌متر به ۵۳۶ المان مرزی لبه‌ای و ۱۰۷۳۵۶ المان ناحیه‌ای (از نوع Free Tetrahedral) تقسیم‌بندی شده است. همچنین به طور خاص این مش‌بندی در بخش الکتروود شامل ۴۰۵۴ المان صفحه‌ای (از نوع Free Triangular) می‌باشد. برای این ته‌نشین کننده، المان‌ها در مجاورت میله الکتروود به شدت سبب کوچک‌تری نسبت به بخش‌های دیگر دارند و با نزدیک شدن به سمت کلکتور سبب المان‌ها افزایش پیدا می‌کند. در این شبیه‌سازی فرض شده است که توزیع بار یونی در کانال بواسطه شارش هوای اصلی مختل نشده و به

$$\frac{d}{dt}(m_p \mathbf{v}) = \mathbf{F}_f \quad (15)$$

در رابطه فوق q موقعیت ذرات بر حسب متر، v سرعت ذرات بر حسب متر بر ثانیه، m_p جرم ذره بر حسب کیلوگرم و \mathbf{F}_f کل نیرویی است که بر ذرات اثر می‌کند. در این مورد، نیرووهایی که بر روی ذرات اثر می‌کنند، نیروی الکتریکی و پسار هستند. اثرات کاهش چگالی سیال می‌بایست در نیروی پسار اعمال شود، زیرا شعاع ذرات خیلی کوچک هستند. در این مقاله، نیروی پسار (نیرویی که ذرات را از حرکت در سیال باز می‌دارند) F_D بر اساس مدل کانینگهام-میلیکان-دیویس به صورت زیر می‌باشد.

$$\mathbf{F}_D = \frac{1}{\tau_p S} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (16)$$

که در آن $S = 1 + K_n(C_1 + C_2 \exp(-C_3/K_n))$ ضریب اصلاح پسار است. همچنین τ_p زمان پاسخ سرعت ذرات هستند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_p = \frac{4\rho_p d_p^2}{3\mu C_D \text{Re}_r} \quad (17)$$

در رابطه فوق، ρ_p چگالی ذرات بر حسب kg/m^3 ، d_p قطر ذرات بر حسب متر، C_D ضریب پسار و Re_r عدد نسبی رینالد ($\text{Re}_r = \frac{\rho_f \|\mathbf{u} - \mathbf{v}\| d_p}{\mu}$) هستند.

نیروی الکتریکی \mathbf{F}_e که بر ذرات اثر می‌کند، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathbf{F}_e = eZ\mathbf{E} \quad (18)$$

که e بار الکتریکی پایه بر حسب کولن و Z تعداد بار انباشته بر هر ذره هستند.

در این شرایط، بار انباشته شده بر روی ذرات با استفاده از مدل بی قانونی قابل محاسبه است.

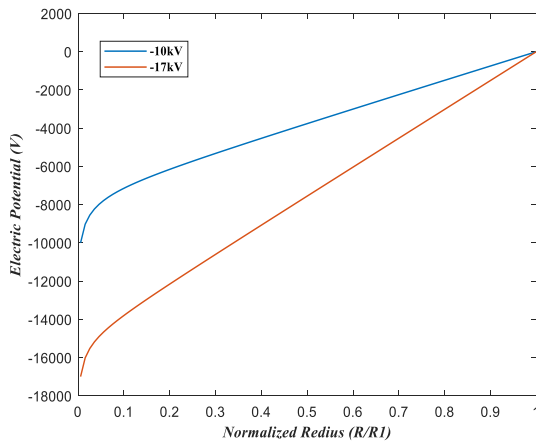
$$\tau_c \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} R_f + f_a (|v_e| \leq |v_s|) \\ R_d f_a (|v_e| > |v_s|) \end{cases} \quad (19)$$

$$\tau_c = \frac{e^2}{4\pi\rho_q \mu k_B T_i}$$

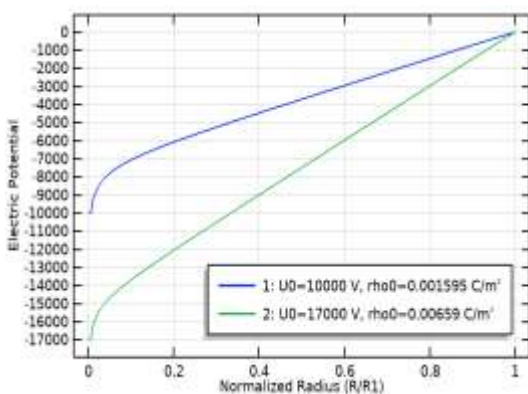
که در آن τ_c زمان شارژ مشخصه، k_B ثابت بولتزمن و T_i درجه دمای یون هستند. همچنین R_f و R_d نرخ‌های شارژ در اثر انتقال میدانی و انتشاری بوده و با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند.

$$R_f = \frac{v_s}{4\epsilon_0} \left(1 - \frac{v_e}{v_s}\right)^2 \quad (20)$$

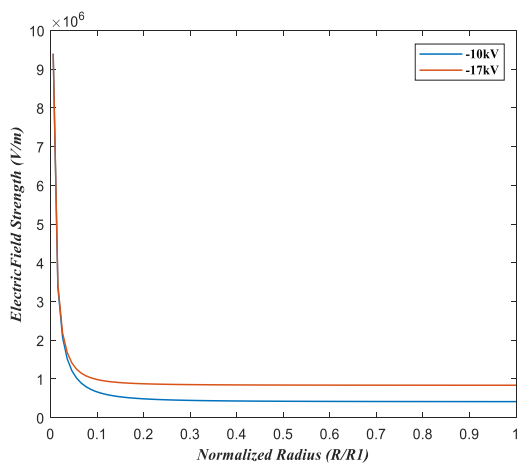
برابر ۹۴۰۰ کیلوولت بر متر است. در سطح کلکتور (مقادیر میدان الکتریکی مربوط به شعاع نرمالیزه شده ۱)، نمودارهای بدست آمده حاکی از آن هستند که مقدار میدان الکتریکی برای ولتاژهای مذکور به ترتیب برابر ۴۱۵- و ۸۳۸- کیلوولت بر متر می‌باشند.



شکل ۵- توزیع پتانسیل الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از پاسخ تحلیلی



شکل ۶- توزیع پتانسیل الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از شبیه‌سازی



شکل ۷- توزیع میدان الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از پاسخ تحلیلی

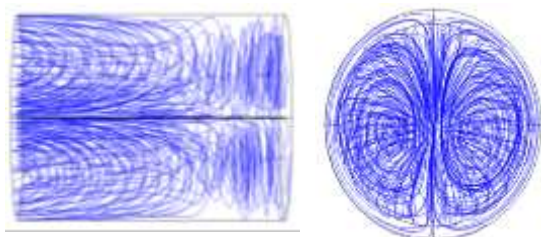
دلیل وجود بار فضایی یونی در میدان‌های الکتریکی، تنها اثرات شدید نیروهای الکتروستاتیکی بر الگوی شارش هوای اصلی در نظر گرفته شده است. معادلات مربوط به شارش هوا با استفاده از نرم‌افزار COMSOL و رابط فیزیک Turbulent Flow حل شده و برای در نظر گرفتن اغتشاش در شارش هوا از مدل k-ε بهره‌مند شده است. برای ورودی کانال سرعت ثابت سیال و برای خروجی کانال فشار پیمانه‌ای صفر به عنوان شرایط مرزی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، دمای ثابت ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد برای دیزل ژنراتور پربار به عنوان شرایط مرزی در دیوارها فرض شده است. غلظت‌های تعدادی ذرات دیزل در ورودی کانال در شرایط پرباری دیزل ژنراتور در مرجع [۱] ارائه گردیده است. ذرات دیزل با سایزهای مختلف از ۲۴۸ نقطه از ورودی کانال به طور یکنواخت به درون تهنشین‌کننده تزریق می‌شوند که با توجه به سایزهای مختلف در نظر گرفته شده برای ذرات، به ترتیب ۷۴۴۰ و ۶۶۹۶ جریان ذره با مسیر متفاوت را در درون کانال برای حالات بی‌باری و بار زیاد بوجود می‌آورند. در این شبیه‌سازی چگالی ذرات دیزل برابر ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به هادی بودن ذرات دیزل، با فرض بی‌نهایت بودن ضریب گذردهی نسبی بار اشباع برای این ذرات بدست خواهد آمد. همچنین از رویکرد حرکت تصادفی لاگرانژی به منظور تعیین حرکت ذرات که تحت تأثیر شارش الکتروهایدروینامیکی و اثرات اغتشاشی هستند، استفاده شده است. این بخش با استفاده از رابط فیزیک Particle Tracking for Fluid Flow در نرم‌افزار COMSOL قابل پیاده‌سازی است.

۴-۱- مشخصه‌های الکتریکی

در شکل‌های (۵) تا (۱۰)، پاسخ تحلیلی و پاسخ بدست آمده از شبیه‌سازی سه‌بعدی برای توزیع پتانسیل الکتریکی، توزیع میدان الکتریکی و توزیع چگالی بار الکتریکی در راستای شعاع استوانه و اعمال ولتاژهای مختلف به الکتروود تخلیه نشان داده شده است.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نتایج تحلیلی و نتایج شبیه‌سازی کاملاً بر هم منطبق و سازگار هستند. در نمودارهای فوق مقدار چگالی بار یونی در سطح الکتروود تخلیه برای ولتاژهای ۱۰- و ۱۷- کیلوولت به ترتیب برابر ۱۵۹۵- و ۶۵۹۰- میکروکولن بر مترمکعب هستند. همچنین اندازه میدان الکتریکی در سطح الکتروود تخلیه

در تعادل قرار داشته و این مسئله در مرجع [۵] اثبات شده است. در این شرایط، به منظور تشکیل شارش ثانویه الکتروهایدرودینامیکی، می‌توان موقعیت الکتروود تخلیه را به صورت جزئی تغییر داده تا آرایش ته‌نشین کننده از حالت هم‌مرکز خارج شود. با اعمال این تغییر موقعیت، متوسط نیروی حجم در اطراف الکتروود تخلیه نامتعادل شده و مولکول‌های هوا در سمتی که الکتروود تخلیه از محور استوانه فاصله گرفته است، نیروی حجم قوی‌تری احساس می‌کنند. بنابراین، مولکول‌های هوا از الکتروود تخلیه رانده شده و شکل جریان جت به خود می‌گیرند. با فرض ۱٪ تفاوت بین موقعیت محور استوانه و الکتروود تخلیه در راستای بخش مثبت محور z ، مطابق شکل (۱۱)، جریان‌های سریعی در راستای الکتروود تخلیه به همراه دو تاوه فضایی در دو سمت جت شکل گرفته است که جهت حرکت دو تاوه در سمت راست و چپ (از دید سطح مقطع یا ورودی کانال) به ترتیب خلاف و در جهت حرکت عقربه‌های ساعت هستند. این تاوه‌ها تقریباً کل ناحیه دایره‌ای شکل ورودی ته‌نشین کننده را اشغال می‌کنند.



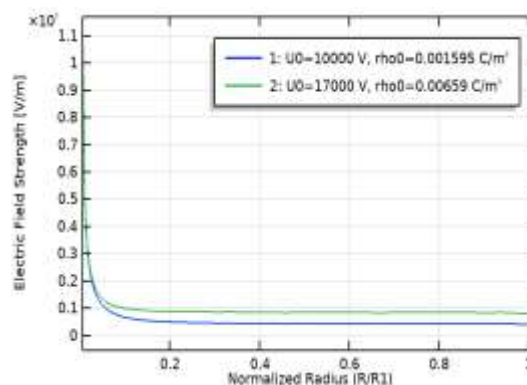
(۲)

(۱)

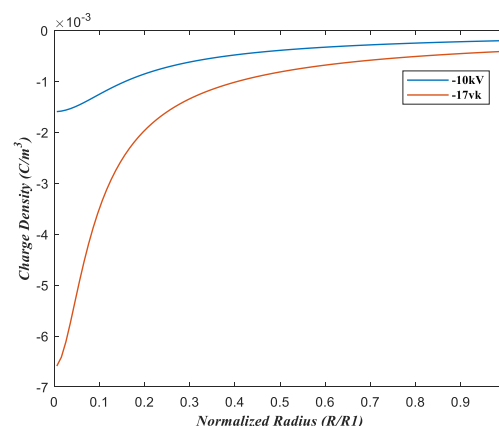
شکل ۱۱- خطوط جریان شارش الکتروهایدرودینامیکی: (۱) نمای yz ، (۲) نمای xy

۳-۴- باردارشدن، مسیر حرکت و ته‌نشینی ذرات زیرمیکرون

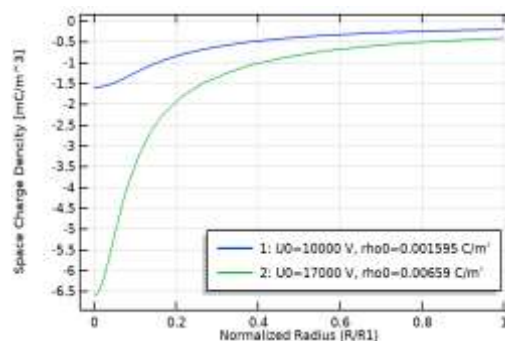
نسبت بار به جرم ذرات و نرخ ته‌نشینی آن‌ها در طول کانال ته‌نشین کننده برای ذرات با قطرهای ۴۰ و ۳۰۰ نانومتر در شکل (۱۲) نشان داده شده است. در این نمودار، دیزل ژنراتور در حالت پرباری با دمای ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد قرار داشته و ولتاژ ۱۰- کیلوولت به الکتروود تخلیه اعمال شده است. همچنین در این نمودار، سرعت‌های مختلفی نظیر ۰٫۰۶، ۱ و ۱/۵ متر بر ثانیه برای سیال شارش هوا در نظر گرفته شده است. برای ذرات با قطر ۴۰ نانومتر (شکل (۱۲-الف))، ضریب اصلاح لغزش کانینگهام به دلیل ماهیت نمایی منفی آن، بالاترین مقدار را نسبت به سایر ذرات داشته و در نتیجه



شکل ۸- توزیع میدان الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از پاسخ شبیه‌سازی



شکل ۹- توزیع چگالی بار الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از پاسخ تحلیلی



شکل ۱۰- توزیع چگالی بار الکتریکی در راستای شعاعی بدست آمده از شبیه‌سازی

۲-۴- الگوهای شارش سه بعدی الکتروهایدرودینامیکی

شارش ثانویه الکتروهایدرودینامیکی به علت اعمال نیروهای حجمی الکتروستاتیکی بر روی مولکول‌های هوا در این بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به هم‌مرکز بودن الکتروود تخلیه و کلکتور استوانه‌ای ته‌نشین کننده الکتروستاتیکی، انتظار می‌رود شارش الکتروهایدرودینامیکی به دلیل این تقارن هندسی تشکیل نشود. زیرا در این حالت نیروی حجمی بوسیله نیروی فشار در راستای شعاع استوانه

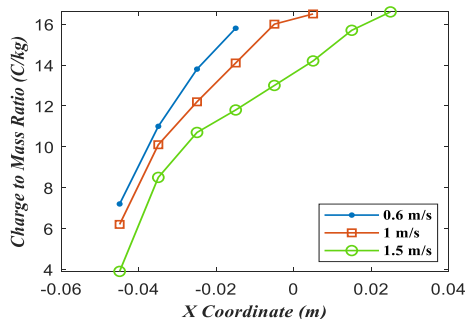
از مدل راه رفتن تصادفی گسسته استفاده شده که نحوه انتشار ذرات در شارش دارای اغتشاش را تعیین می‌کند. بنابراین، مسیر حرکت ذرات تحت تأثیر انتشار دارای اغتشاش بوده و همانند اینکه نیروهای پَسار و الکتروستاتیکی به ترتیب در جهت‌های شارش اصلی و دیوارها مؤثر هستند، این اغتشاش‌ها نیز در همه جهت‌ها مؤثر می‌باشند.

۴-۴- زمان اقامت ذرات

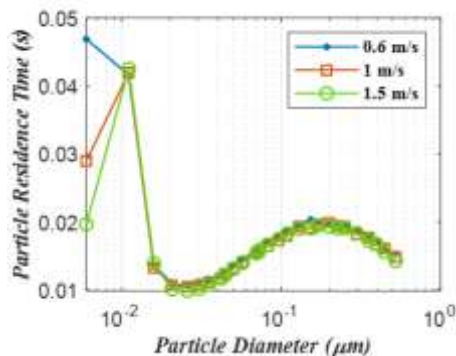
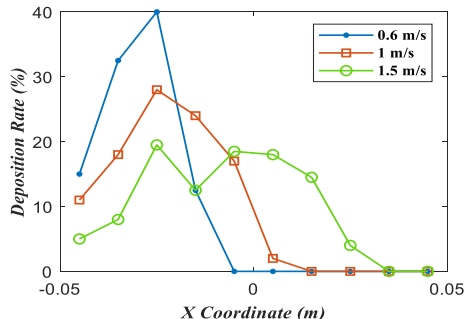
در شکل (۱۳)، زمان اقامت ذرات ته‌نشین شده به ازای ولتاژها و سرعت‌های ورودی مختلف مورد مقایسه قرار گرفته است. به طور کلی، با افزایش ولتاژ تحریک، زمان اقامت ذرات کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، با افزایش ولتاژ تحریک، ذرات به دلیل دستیابی به بار بیشتر در یک بازه زمانی مشخص و هم‌چنین نیروی الکتروستاتیکی قوی‌تر، در زمان کمتری به دام می‌افتند.

همانگونه که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، برای ولتاژ تحریک بالاتر (شکل ۱۳-ب)) که دارای چگالی بار فضایی یونی بیشتری در کانال نیز هستند، زمان اقامت ذرات (با

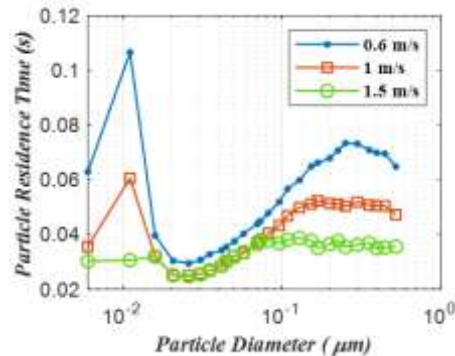
نیروی پَسار در کمینه‌ترین حالت خود قرار دارد. با وجود اثرات قابل چشم‌پوشی نیروهای الکتروستاتیکی اعمال شده به این ذرات نرخ ته‌نشینی بالایی در نیمه ابتدایی کانال مشاهده شده است. با بررسی نمودارهای مربوط به نسبت بار به جرم ذرات با قطر ۴۰ نانومتر مشاهده می‌شود، افزایش سرعت سیال ورودی منجر به افزایش سرعت ذرات و در نتیجه کاهش بار اکتسابی آن‌ها می‌شود. برای ذرات با قطر بیشتر، روندی مشابه به ذرات با قطر ۴۰ نانومتر مشاهده می‌شود. با بررسی نمودارهای بار به جرم ذرات مشاهده می‌شود، مقدار بار ذرات با عبور آن‌ها از کانال ته‌نشین‌کننده افزایش می‌یابد. از طرفی، در یک زمان مشابه، مقدار بار انباشته شده بر ذرات بزرگتر بیشتر از ذرات کوچکتر بوده و در نتیجه ذرات بزرگتر زودتر به بار اشباع می‌رسند. در این شرایط، اثر سرعت سیال بر نسبت بار به جرم ذرات کاهش یافته و نمودارهای مربوطه، با افزایش قطر ذرات به همدیگر نزدیک‌تر می‌شوند. در طول کانال نرخ‌های ته‌نشینی ذرات برای ذرات با قطر مختلف نشان‌دهنده برخی نوسانات بوده که نشئت‌گرفته از جابجایی تصادفی ذرات زیرمیکرون هستند. در شبیه‌سازی انجام‌شده در نرم‌افزار COMSOL.



(الف)

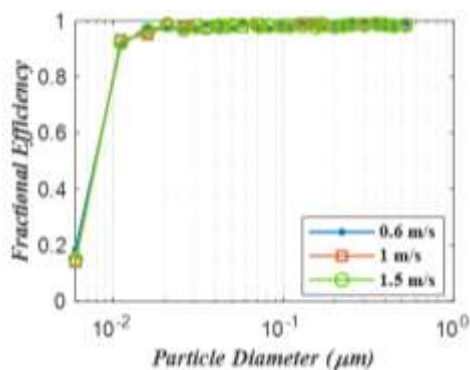


(ب)

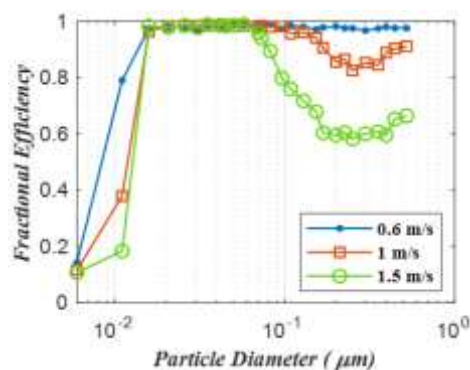


(الف)

شکل ۱۳- زمان اقامت ذرات انباشته شده بر حسب قطر ذرات به ازای سرعت‌های مختلف سیال ورودی، (الف) ۱۰kV-، (ب) ۱۷kV-



(ب)



(الف)

شکل ۱۴- راندمان کسری ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی با در نظر گرفتن سه سرعت مختلف برای سیال ورودی، الف) 10 kV ، ب) 17 kV

حالت بهره‌برداری پرباری برای دیزل ارائه شده است. انتظار می‌رود با افزایش طول کانال ته‌نشین‌کننده به 300 میلی‌متر، زمان اقامت و راندمان کسری جمع‌آوری ذرات به طور آشکاری افزایش پیدا کرده و تقریباً تمامی ذرات جذب خواهند شد. در جدول ۱، نتایج مذکور برای راندمان جمع‌آوری جرم کل به صورت خلاصه گزارش شده است.

جدول ۱- راندمان جمع‌آوری جرم کل برای کانال با طول‌های مختلف (سرعت ورودی 0.6 متر بر ثانیه و ولتاژ اعمالی برابر 10 kV)

راندمان کل	طول کانال ته‌نشین‌کننده
۸۶٪	۵۰ میلی‌متر
۹۸٪/۲	۷۰ میلی‌متر
۹۹٪/۶	۱۰۰ میلی‌متر
۱۰۰٪	۳۰۰ میلی‌متر

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله یک ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی سیلندری تک‌مرحله‌ای در ابعاد آزمایشگاهی به منظور جمع‌آوری ذرات زیر میکرون شبیه‌سازی شده است. معادلات پیوستگی جریان و پواسون، معادلات ناویر استوکس شارش هوا و معادلات لاگرانژ مربوط به باردار شدن و انحراف ذرات با استفاده از نرم‌افزار COMSOL پیوند شده است. نشان داده شده است که شارش ثانویه الکترو هیدرو دینامیکی هنگامی که محورهای الکتروود تخلیه و استوانه بر هم منطبق نباشند، تشکیل می‌شود. به ازای اندازه‌های مختلف ذرات و سرعت سیال ورودی، نسبت بار به جرم ذرات و نرخ ته‌نشینی ذرات در طول کانال مورد مقایسه قرار گرفت. نشان داده شد که با افزایش زمان اقامت ذرات (معادل با

قطره‌های مختلف) مستقل از سرعت‌های در نظر گرفته شده برای سیال ورودی بوده و تفاوتی مشاهده نشده است. اما برای ولتاژهای تحریک کمتر (شکل ۱۳-الف)، زمان اقامت ذرات با افزایش سرعت سیال ورودی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطابق نمودارهای فوق، به ازای همه مقادیر ولتاژ و سرعت سیال ورودی، بیشینه زمان اقامت ذرات برای ذرات با قطرهایی در بازه 200 الی 300 نانومتر رخ داده است.

۴-۵- عملکرد ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی در جمع‌آوری ذرات زیر میکرون

در شکل (۱۴)، راندمان کسری جمع‌آوری ذرات با قطرهای مختلف در شرایطی که ولتاژهای 10 و 17 کیلوولت به الکتروود تخلیه اعمال شده و سرعت ورودی سیال برابر 0.6 ، 1 و 1.5 متر بر ثانیه هستند، نشان داده شده است. در این حالت، ذرات توسط دیزل ژنراتور پربار با دمای بهره‌برداری 210 درجه سانتی‌گراد، به کانال تزریق می‌شوند.

مطابق شکل (۷-الف)، برای ولتاژ تحریک 10 کیلوولت، کمینه راندمان کسری جمع‌آوری ذرات در قطرهای 200 الی 300 نانومتر رخ داده است. هم‌چنین، با افزایش سرعت سیال ورودی از 0.6 تا 1.5 متر بر ثانیه، راندمان کسری جمع‌آوری ذرات کاهش پیدا می‌کند. با این وجود، برای ولتاژ 17 کیلوولت (شکل ۷-ب)، راندمان کسری جمع‌آوری ذرات برای تمامی ذرات، بزرگتر از 95% می‌باشد.

۴-۶- در نظر گرفتن طول‌های مختلف برای کانال ته‌نشین‌کننده

در این بخش، نتایج بدست آمده برای راندمان جمع‌آوری جرم کل در شبیه‌سازی به ازای طول‌های مختلف کانال ته‌نشین‌کننده (طولی در گستره 50 الی 300 میلی‌متر) در

نظیر جمع‌آوری ذرات خروجی دیزل از دیدگاه هزینه سرمایه‌گذاری، نصب، بهره‌برداری و نگهداری اشاره کرد. در واقع، پیکربندی ته‌نشین‌کننده استوانه‌ای مورد مطالعه در این مقاله می‌تواند به راحتی برای کنترل مؤثر ذرات خروجی دیزل از یک منبع انتشار دیزل ثابت در زمان اقامت مطلوب گاز استفاده شود. همچنین می‌توان ته‌نشین‌کننده را برای درمان میزان جریان خروجی آگزوز حجمی بالاتر تولید شده از موتورهای دیزلی بزرگتر افزایش داد. با این حال، از نظر عملی برای استفاده واقعی این نوع فناوری در چنین تجهیزاتی ثابت دیزل یا وسایل نقلیه دیزلی، چندین جنبه عملی باید در نظر گرفته شود تا عملکرد ته‌نشین‌کننده با توجه به سرمایه و هزینه عملیاتی آن و همچنین سهولت نگهداری و رسیدگی بهینه شود.

کاهش سرعت سیال)، نسبت بار به جرم ذرات و راندمان جمع‌آوری ذرات افزایش یافته‌است. در ادامه، راندمان کسری ته‌نشین‌کننده برای ذرات با قطر مختلف مورد به ازای طول‌های مختلف برای ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی و بررسی قرار گرفت. بر اساس نمودارهای بدست‌آمده برای راندمان جمع‌آوری بر حسب قطر ذرات، مشخص گردید که مقدار کمینه راندمان برای ولتاژهای تحریک کم، در گستره ۲۰۰ الی ۳۰۰ نانومتر رخ می‌دهد. از طرف دیگر، برای حالتی که ولتاژ بزرگتری به الکتروود تخلیه اعمال شده و سیال ورودی سرعت کمتری دارد، راندمان جمع‌آوری ذرات برای تمامی ذرات با قطرهای مختلف حداقل ۹۵٪ است. به عنوان پیشنهاد برای کارهای آتی می‌توان به بهینه‌سازی طراحی ته‌نشین‌کننده الکتروستاتیکی برای موارد عملی

مراجع

- [1] H. Hayashi, Y. Takasaki, K. Kawahara, T. Takenaka, K. Takashima, and A. Mizuno, "Electrostatic charging and precipitation of diesel soot", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 1, 2011, pp. 331-335.
- [2] M. Gholami, and H. Kazerooni, "Numerical evaluation of electrohydrodynamic flow and particle concentration effects on the wire-plate electrostatic precipitator efficiency", Scientific Journal of Applied Electromagnetics, Vol. PP, No. 99, 2021.
- [3] P. Saiyasitpanich, T. C. Keener, M. Lu, S.-J. Khang, and D. E. Evans, "Collection of ultrafine diesel particulate matter (DPM) in cylindrical single-stage wet electrostatic precipitators", Environmental Science and Technology, Vol. 40, 2006, pp. 7890-7895.
- [4] P. Saiyasitpanich, T. C. Keener, S.-J. Khang, and M. Lu, "Removal of diesel particulate matter (DPM) in a tubular wet electrostatic precipitator", Journal of Electrostatics, Vol. 65, 2007, pp. 618-624.
- [5] R. Baghaei Lakeh, and M. Molki, "Patterns of airflow in circular tubes caused by a corona jet with concentric and eccentric wire electrodes", Journal of Fluids Engineering, Vol. 132, 2008.
- [6] T. Mitsuhiro, K. Hirofumi, K. Toma, T. Kazunori, H. Masahiro, and M. Akira, "Electrostatic precipitation of diesel PM at reduced gas temperature", 2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2015.
- [7] Y.J. Kim, B. Han, C. Woo, and H.-J. Kim, "Performance of Ultrafine Particle Collection of a Two-Stage ESP Using a Novel Mixing Type Carbon Brush Charger and Parallel Collection Plates", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 53, No. 1, 2017, pp. 466-473.
- [8] H. Kawakami, T. Sakurai, Y. Ehara, T. Yamamoto, and A. Zukeran, "Performance characteristics between horizontally and vertically oriented electrodes EHD ESP for collection of low-resistive diesel particulates," Journal of Electrostatics, Vol. 71, No. 6, 2013, pp. 1117-1123.
- [9] Y. Ehara, M. Ohashi, A. Zukeran, K. Kawakami, T. Inui, and Y. Aoki, "Development of hole-type electrostatic precipitator", International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, Vol. 11, No. 1, 2017, pp. 9-12.
- [10] H. Kawakami, A. Zukeran, K. Yasumoto, T. Inui, Y. Ehara, and T. Yamamoto, "Diesel PM collection for marine emissions using double cylinder type electrostatic precipitator", International Journal of Plasma Environmental Science and Technology, Vol. 5, 2011, pp. 174-178.
- [11] A. Zukeran, H. Sawano, K. Yasumoto, "Collection Characteristic of Nanoparticles Emitted from a Diesel Engine with Residual Fuel Oil and Light Fuel Oil in an Electrostatic Precipitator," Energies, Vol. 12, No. 17, Aug. 2019, pp. 1-9.
- [12] W. Janischewskyj and G. Gela, "Finite element solution for electric fields of coronating dc transmission lines", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 98, 1979, pp. 1000-1012.
- [13] C. J. Chen, and S. Y. Jaw, "Fundamentals of turbulence modeling", Taylor and Francis, 1998.